

ПРАВИТЕЛЬСТВО РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ



МЕЖДУНАРОДНЫЙ СИМПОЗИУМ

**«АТМОСФЕРНАЯ РАДИАЦИЯ и ДИНАМИКА»
(МСАРД – 2019)**

25 – 27 июня 2019, Санкт-Петербург-Петродворец

Тезисы

Санкт–Петербург

2019

GOVERNMENT OF RUSSIAN FEDERATION

SAINT – PETERSBURG STATE UNIVERSITY



INTERNATIONAL SYMPOSIUM

**«ATMOSPHERIC RADIATION and DYNAMICS»
(ISARD – 2019)**

25 – 27 June 2019, Saint-Petersburg- Petrodvorets

Theses

Saint–Petersburg

2019

ОГЛАВЛЕНИЕ (TABLE of CONTENTS)

ПЛЕНАРНАЯ СЕССИЯ	4
PLENARY SESSION	4
СЕКЦИЯ 1. "СПУТНИКОВОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ АТМОСФЕРЫ и ПОВЕРХНОСТИ"	15
SESSION 1. "SATELLITE SOUNDING OF ATMOSPHERE AND SURFACE"	15
СЕКЦИЯ 2. "ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ АТМОСФЕРЫ и ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ в РАЗЛИЧНЫХ ОБЛАСТЯХ СПЕКТРА"	65
SESSION 2. "REMOTE SENSING OF ATMOSPHERE AND UNDERLYING SURFACE IN DIFFERENT SPECTRAL RANGES"	65
СЕКЦИЯ 3. "ТЕОРИЯ ПЕРЕНОСА ИЗЛУЧЕНИЯ"	102
SESSION 3. "RADIATION TRANSFER THEORY"	102
СЕКЦИЯ 4. "ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ РАДИАЦИИ с ОБЛАКАМИ и АЭРОЗОЛЕМ"	129
SESSION 4. "RADIATION-CLOUD AND RADIATION-AEROSOL INTERACTIONS"	129
СЕКЦИЯ 5. "РАДИАЦИОННАЯ КЛИМАТОЛОГИЯ и РАДИАЦИОННЫЕ АЛГОРИТМЫ в МОДЕЛЯХ ПРОГНОЗА ПОГОДЫ и КЛИМАТА"	180
SESSION 5. "RADIATIVE CLIMATOLOGY AND ALGORITHMS IN MODELS FOR WEATHER AND CLIMATE FORECASTING"	180
СЕКЦИЯ 6. "НАТУРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РАДИАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК АТМОСФЕРЫ и ПОВЕРХНОСТИ"	218
SESSION 6. "FIELD STUDIES OF RADIATIVE CHARACTERISTICS OF ATMOSPHERE AND SURFACE"	218
СЕКЦИЯ 7. "ХАРАКТЕРИСТИКИ ВОЛН, МАКРОЦИРКУЛЯЦИЯ и ДИНАМИЧЕСКИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ в АТМОСФЕРАХ ЗЕМЛИ и ДРУГИХ ПЛАНЕТ"	238
SESSION 7. "WAVE CHARACTERISTICS, MACROCIRCULATION AND DYNAMICS INTERACTIONS IN ATMOSPHERES OF THE EARTH AND OTHER PLANETS"	238
СЕКЦИЯ 8. "СТРУКТУРА и СОСТАВ СРЕДНЕЙ и ВЕРХНЕЙ АТМОСФЕРЫ ЗЕМЛИ и ДРУГИХ ПЛАНЕТ"	282
SESSION 8. "STRUCTURE OF MIDDLE AND UPPER ATMOSPHERE OF THE EARTH AND OTHER PLANETS"	282
СЕКЦИЯ 9. "ФОТОХИМИЯ и КИНЕТИКА ВОЗБУЖДЕННЫХ СОСТОЯНИЙ АТОМОВ и МОЛЕКУЛ и НЕРАВНОВЕСНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ в АТМОСФЕРЕ ЗЕМЛИ и ДРУГИХ ПЛАНЕТ"	309
SESSION 9. "PHOTOCHEMISTRY AND KINETICS OF EXCITED STATES OF ATOMS AND MOLECULES AND NON-LTE RADIATION IN THE ATMOSPHERE OF THE EARTH AND OTHER PLANETS"	309
СЕКЦИЯ 10. "РАДИАЦИЯ и ДИНАМИКА АТМОСФЕРЫ в ПОЛЯРНЫХ РАЙОНАХ"	315
SESSION 10. " RADIATION AND DYNAMICS OF POLAR ATMOSPHERE"	315

Законы Колмогорова 1934 года и их проявления в разнообразных природных процессах

Голицын Г.С. (gsg@ifaran.ru)

Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Пыжевский пер. 3, Москва, Россия

В двухстраничной заметке А.Н. Колмогоров предъявил фундаментальное решение уравнения Фоккера-Планка-Колмогорова для функции вероятности процесса с марковским (или δ -коррелированным) случайным возбуждением.

Из этого решения следуют результаты теории турбулентности 1941 года, частотный спектр морского ветрового волнения, правило Каулы для спектра рельефа поверхностей небесных тел и флуктуаций их гравитационных полей и ряд других долгое время необъясненных закономерностей. Всё это можно найти в статье автора в журнале «Метеорология и гидрология», 2018, № 3, с. 5–15.

1. Monin A.S., A.M. Obukhov. A Note on General Classification of Motions in a Baroclinic Atmosphere // Tellus. 1959. V. 11, No 2. P. 159-162, DOI: 10.3402/tellusa.v11i2.9303.

Kolmogorov 1934 laws and their manifestations in various processes of nature

G.S. Golitsyn (gsg@ifaran.ru)

A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics RAS, 3 Pyzhevsky per., 119017 Moscow, Russia

In a two-page note A.N. Kolmogorov has exhibited the fundamental solution of the Fokker-Planck-Kolmogorov equation for the probability distribution function of a process with the Markov (or δ -correlated) stochastic excitation.

From this solution the turbulence results follow (A.M. Obukhov, 1959) as well as the wind waves frequency spectrum, Kaula rule for the spectrum of the surfaces relief of celestial bodies and their gravity fields fluctuations and a number of other long-term unexplained regularities. All these can be found in the author's paper at "Russian Meteorology and Hydrology", 2018, № 3, p. 135–142.

1. Monin A.S., A.M. Obukhov. A Note on General Classification of Motions in a Baroclinic Atmosphere // Tellus. 1959. V. 11, No 2. P. 159-162, DOI: 10.3402/tellusa.v11i2.9303.

Гиперспектральный инфракрасный атмосферный зондировщик ИКФС-2 – четыре года на орбите

Успенский А.Б.¹ (uspensky@planet.iitp.ru), Тимофеев Ю.М.², Завелевич Ф.С.³, Поляков А.В.², Виролайнен Я.А.², Рублев А.Н.¹, Кухарский А.В.¹, Киселева Ю.В.¹, Козлов Д.А.³, Козлов И.А.³, Никулин А.Г.³, Пяткин В.П.⁴, Русин Е.В.⁴

¹НИЦ космической гидрометеорологии «Планета», Б. Предтеченский пер. 7, 123242 Москва, Россия

²Санкт-Петербургский государственный университет, Университетская наб. 7/9, 199034 Санкт-Петербург, Россия

³Исследовательский центр им. М.В. Келдыша, Онежская 8, 125438 Москва, Россия

⁴Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, пр. Ак. Лаврентьева 6, 630090 Новосибирск, Россия

Первый российский гиперспектральный инфракрасный (ИК) атмосферный зондировщик ИКФС-2 был запущен в июле 2014 на полярно-орбитальном метеорологическом спутнике «Метеор-М» № 2. Планируется, что этот прибор и аналоги будут действовать до 2025 г. на борту текущего и последующих спутников серии «Метеор-М». Фурье-спектрометр ИКФС-2, измеряющий уходящее ИК излучение системы

«атмосфера-поверхность» в спектральной области 5–15 мкм, предназначен для дистанционного определения термодинамических параметров и состава атмосферы, включая вертикальные профили температуры и влажности, содержания озона и других газов.

В докладе проанализированы характеристики IKFS-2 на спутнике «Метеор-М» № 2, включая оценку качества измерений спектров уходящего излучения и их информационное содержание. Характеристики IKFS-2 (пороговое значение случайных шумов, неопределенность бортовой радиометрической и спектральной калибровок, спектральное разрешение) остаются стабильными с момента запуска по настоящее время и соответствуют запланированным. Установлено хорошее соответствие между измерениями IKFS-2 и измерениями калиброванной спутниковой аппаратуры (SEVIRI, IASI). В докладе приведен обзор методик и алгоритмов моделирования и интерпретации (решения обратной задачи) спутниковых измерений. Даны примеры восстановления различных атмосферных параметров (вертикальных профилей температуры и влажности, общего содержания озона) и оценки их качества на основе использования независимых измерений. Приведены примеры исследований озонных мини-дыр, наблюдавшихся над Россией зимой и весной 2016 года.

Hyperspectral Infrared Atmospheric Sounder IKFS-2 on "Meteor-M" No. 2 – four years in orbit

A.B. Uspensky¹, Y.M. Timofeev², F.S. Zavelevich³, A.V. Polyakov², Y.A. Virolainen²,
A.N. Rublev¹, A.V. Kukharsky¹, J.V. Kiseleva¹, D.A. Kozlov³, I.A. Kozlov³, A.G. Nikulin³,
V.P. Pyatkin⁴, E.V. Rusin⁴

¹State Research Center of Space Hydrometeorology "Planeta", 7 B. Predtechensky per., 123242 Moscow, Russia

²Saint-Petersburg State University, 7/9 Universitetskaya nab., 199034 Saint-Petersburg, Russia

³Keldysh Research Center, 8 Onezhskaya, 125438 Moscow, Russia

⁴Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS, 6 Lavrentyeva pr., 630090
Novosibirsk, Russia

The first Russian advanced infrared (IR) atmospheric sounder IKFS-2 was launched in July 2014 on the "Meteor-M" No. 2 meteorological satellite. It is planned that this instrument and similar devices will continue to operate until 2025 aboard the current and subsequent satellites of "Meteor-M" series. IKFS-2 is a Fourier transform spectrometer, its measurements cover the 5–15 μm spectral domain. Being hyperspectral IR sounder, IKFS-2 measures the outgoing IR radiance spectra and provides information on the thermodynamic parameters and the composition of the atmosphere such as vertical temperature and humidity profiles, estimates of the ozone and other trace gases total column amounts.

The report examines the IKFS-2 operation on board "Meteor-M" No. 2, including the assessment of the measurements' quality (the errors of radiometric and spectral calibration) and their information content. Since the launch, the instrument performance characteristics have been remained stable, and the actual IKFS-2 characteristics (threshold value of NESR, uncertainty of onboard radiometric and spectral calibrations, spectral resolution) meet the planned requirements. There is a good agreement between IKFS-2 measurements and IR measurements of independent satellite instruments (SEVIRI, IASI). The report also provides an overview of the developed scientific basis for simulation with FRTM and interpretation ("inversion") of satellite measurements. The examples of output IKFS-2 level 2 products (vertical profiles of temperature and humidity, total ozone column) are given together with the error analysis. The performance of atmospheric (temperature and humidity) profile retrievals and the feasibility of total ozone content estimates are evaluated by comparison with independent ground-based or satellite measurements. The examples of the ozone "mini-holes" observed by IKFS-2 over Russia in the winter and in the spring of 2016 are given.

Энергобалансовые оценки температуры поверхности суши в устойчивых погодных условиях

Гинзбург А.С. (gin@ifaran.ru)

Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Пыжевский пер. 3, Москва, Россия

Московский технологический институт, Москва, Россия

В докладе представлены некоторые результаты, полученные в последнее десятилетие автором совместно с сотрудниками Института физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН в области исследования климатических и метеорологических процессов в московском регионе с учетом антропогенного воздействия. Для описания температурного режима в условиях устойчивых антициклонов предложена простая оценка температурных максимумов. Показано, что если устойчивая метеорологическая ситуация сохраняется в течение достаточно продолжительного времени, то ее можно рассматривать как равновесную. Такие ситуации возникали в случаях жаркого лета 2010 года в центральной части Европейской территории России, в Сибири в 2012 году, в Западной Европе в 2015 году и во многих других случаях. В таких ситуациях для оценки равновесных температур можно использовать уравнения баланса энергии в атмосфере и на поверхности Земли. Простые энергобалансовые оценки показывают, что зафиксированные максимальные дневные температуры воздуха летом 2010 г. в центральной части ЕТР близки к теоретически максимально возможным значениям. В устойчивых погодных условиях особенно значимым становится воздействие на мезомасштабные атмосферные процессы антропогенных потоков тепла (АПТ), обусловленных всеми видами источников тепловой энергии на урбанизированных территориях – от промышленности до метаболизма жителей. Для количественной оценки антропогенных потоков тепла на урбанизированных территориях может быть использован эмпирический метод, основанный на использовании наиболее достоверных данных о населении и энергопотреблении городского хозяйства. В свою очередь на энергопотребление городов существенно влияют наблюдаемые в последние десятилетия изменения погодных характеристик отопительного сезона. Анализ данных о изменении погодных характеристик отопительного сезона в ряде мегаполисов России и затрат энергии в эти сезоны с середины XX века по настоящее время показывает не только уменьшение энергозатрат в последние десятилетия, но и изменения внутрисезонного распределения потребности в теплоснабжении.

Для описания мезомасштабных особенностей динамики климата и оценки энергетических потребностей крупных городов необходимо учитывать наличие обратных связей между температурным режимом и энергопотреблением урбанизированных территорий. Эти обратные связи могут быть как отрицательными, так и положительными, а их значимость существенно зависит от климата и рельефа региона, системы тепло- и электроснабжения города и других факторов. Эти обратные связи принципиально отличаются в холодный и теплый периоды года при отоплении и кондиционировании помещений: при отоплении помещений они отрицательные, а при кондиционировании воздуха – положительные. Расчет влияния урбанизированных территорий на мезомасштабные атмосферные процессы, осуществлённый с помощью модели COSMO-CLM, показывает, что из всех составляющих баланса энергии на урбанизированных территориях именно антропогенные потоки тепла определяют процессы формирования и трансформации городского острова тепла, особенно в холодный период года. Антропогенные потоки тепла также оказывают заметное влияние на ветровой режим мегаполиса. В случае московской агломерации средняя скорость ветра увеличивается более чем на 1 м/с, при этом преобладающее направление ветра меняется незначительно.

Работа выполнена при поддержке РНФ (Проект № 16-17-00114 «Анализ влияния региональных изменений климата на энергопотребление городского хозяйства мегаполисов России»).

Energy balance estimates of land surface temperature in stable weather conditions

A.S. Ginzburg (gin@ifaran.ru)

*A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics RAS, 3 Pyzhevsky per., 119017 Moscow, Russia
Moscow Technological Institute, Moscow, Russia*

The plenary report presents some of the main results obtained during the last decade in the field of natural and anthropogenic climatic and meteorological processes in the Moscow region. To describe the temperature regime within the stable (blocking) anticyclones, a simple estimate of the temperature maxima is proposed. It is shown that if a stable meteorological situation persists for a sufficiently long time, it can be considered as an equilibrium one. Such situations arose in cases of a hot summer of 2010 in the central part of the European territory of Russia, in Siberia in 2012, in Western Europe in 2015, and in other cases. In such situations, equations of energy balance in the atmosphere and on the underlying surface can be used to estimate equilibrium temperatures. Such estimates show that the recorded maximum daily air temperatures in the summer of 2010 in the ETR central part are close to the theoretically maximum possible values. In stable weather conditions, the impact on the mesoscale atmospheric processes of anthropogenic heat fluxes (AHF), caused by all types of sources of energy in urban areas – from industry to the human metabolism, – becomes especially significant. For a quantitative AHF assessment in urban areas, an empirical method can be used, based on using the most reliable data on the population and energy consumption. In turn, the energy consumption is significantly affected by changes in the weather characteristics of the heating seasons observed in recent decades. Analysis of data on changes in weather characteristics of the heating season in Russian megacities and energy using in these seasons shows not only a decrease in energy use in recent decades, but also changes in the seasonal distribution of heat supply needs.

To describe the climate dynamics and assess the energy needs of large cities, it is necessary to consider the presence of feedbacks between the temperature regime and the energy consumption of urbanized territories. These feedbacks can be both negative and positive, and their significance substantially depends on the climate and relief of the region, the heat and power supply systems of the city and other factors. These feedbacks are fundamentally different in the cold and warm periods of the year: they are negative during heating periods, and positive during air conditioning period. The calculation of the influence of urbanized territories on mesoscale atmospheric processes, carried out using the COSMO-CLM model, shows that, from all components of the energy balance in urbanized territories, it is anthropogenic heat fluxes that determine the formation and transformation of urban heat island, especially in the cold season. Anthropogenic heat fluxes also have a noticeable effect on the wind regime of the megalopolis. In the case of the Moscow agglomeration, the average wind speed increases by more than 1 m/s, while the prevailing wind direction changes slightly.

The investigation is supported by the Russian Science Foundation (project No. 16-17-00114).

Применение спутниковых измерений для исследования источников и атмосферного старения дымового аэрозоля

Коновалов И.Б. (kopov@ipfran.ru)

Институт прикладной физики РАН, ул. Ульянова 46, 603950 Нижний Новгород, Россия

Дымовой аэрозоль, выделяемый в атмосферу в результате растительных пожаров, вносит важный вклад в радиационные климатообразующие процессы. Ввиду этого, степень достоверности расчетов радиационного баланса атмосферы, осуществляемых химико-транспортными и климатическими моделями, существенным образом зависит от адекватности модельных представлений источников, состава и атмосферных трансформаций (“старения”) дымового аэрозоля. Однако, несмотря на активные натурные, лабораторные и

теоретические исследования дымового аэрозоля, осуществляемые в мире, указанные модельные представления в настоящее время все еще характеризуются огромными неопределенностями. Одним из эффективных путей снижения этих неопределенностей является анализ данных спутникового зондирования атмосферы и подстилающей поверхности совместно с данными модельных расчетов.

В докладе представлен обзор оригинальных методов [1–3], нацеленных на получение достоверных оценок интенсивности источников дымового аэрозоля и его углеродных составляющих – органического углерода и черного углерода, а также на выявление закономерностей атмосферной эволюции органического углерода. Приведены как ранее опубликованные, так и новые результаты применения этих методов для изучения источников и эволюции дымового аэрозоля от пожаров в Сибири. Наряду с данными спутниковых измерений – а именно, измерений полной и абсорбционной аэрозольной оптической толщин (АОТ) инструментами MODIS и OMI, а также измерений мощности теплового излучения от пожаров, – в исследовании использовались данные измерений *in situ*, выполненных в международной обсерватории ZOTTO и в рамках самолетной кампании YAK-AEROSIB. Кроме того, использовались данные расчетов, выполненных на основе химико-транспортной модели CHIMERE и микрофизической динамической модели органического аэрозоля.

Полученные оценки свидетельствуют о том, что широко используемая в климатических исследованиях база данных GFED4 существенно (в разы) занижает эмиссии органического и черного углерода в составе дымового аэрозоля от сибирских лесных пожаров. Установлено, что в дымовых шлейфах в процессе их мезомасштабного переноса происходят значительные изменения АОТ (на длине волны 550 нм) относительно содержания инертного аэрозольного трассера, а именно – сильное приращение и последующее постепенное уменьшение, которые могут быть объяснены окислительными процессами с участием полуволетучих органических соединений. В тоже время, выявлена тенденция относительного уменьшения абсорбционной АОТ (на длине волны 388 нм), свидетельствующая об ограниченном времени жизни поглощающей органической компоненты дымового аэрозоля – коричневого углерода.

Анализ данных спутниковых измерений выполнен при поддержке РФФИ (проект № 18-05-00911). Валидация полученных оценок пирогенных эмиссий дымового аэрозоля выполнена при поддержке РНФ (проект № 18-17-00076).

1. Konovalov I.B., Beekmann M., Berezin E.V. et al. The role of semi-volatile organic compounds in the mesoscale evolution of biomass burning aerosol: a modeling case study of the 2010 mega-fire event in Russia // *Atmos. Chem. Phys.* 2015. V. 15. P. 13269–13297.
2. Konovalov I.B., Beekmann M., Berezin E.V. et al. Probing into the aging dynamics of biomass burning aerosol by using satellite measurements of aerosol optical depth and carbon monoxide // *Atmos. Chem. Phys.* 2017. V. 17. P. 4513–4537.
3. Konovalov I.B., Lvova D.A., Beekmann M. et al. Estimation of black carbon emissions from Siberian fires using satellite observations of absorption and extinction optical depths // *Atmos. Chem. Phys.* 2018. V. 18. P. 14889–14924.

Application of satellite observations for studying sources and atmospheric aging of biomass burning aerosol

I.B. Konovalov (konov@ipfran.ru)

Institute of Applied Physics RAS, 46 Ulyanova str., 603950 Nizhny Novgorod, Russia

Biomass burning (BB) aerosol provides an important contribution to climate-forming radiative processes. Therefore, the degree of reliability of assessments of the atmospheric radiative balance with chemistry transport and climate models depends significantly on the adequacy of model representations of the sources, composition, and atmospheric transformations (“aging”) of BB aerosol. However, despite numerous BB aerosol field, laboratory, and theoretical studies carried out in the world, these model representations are currently still characterized by huge uncertainties. One of the effective ways to reduce these uncertainties involves the analysis of data from satellite observations of the atmosphere and underlying surface in combination with data of model simulations.

This presentation provides an overview of the original methods [1–3] aimed at obtaining reliable estimates of the BB aerosol emissions and, specifically, emissions of its major carbon components, such as organic carbon and black carbon, as well as to identify regularities of atmospheric evolution of organic fraction of BB aerosol. Both previously published and new results of applications of these methods for studying the sources and evolution of BB aerosol from fires in Siberia are presented. Along with satellite measurements – namely, measurements of extinction and absorption aerosol optical thickness (AOT) with the MODIS and OMI instruments, as well as the MODIS measurements of the fire radiative power – the study involved in situ measurements from the ZOTTO international observatory and from a YAK-AEROSIB aircraft campaign. In addition, data from simulations with the CHIMERE chemistry transport model and with a microphysical dynamic model of organic aerosol were used.

The estimates obtained indicate that the GFED4 database, which is widely used in climate studies, strongly underestimates emissions of particulate organic and black carbon from Siberian vegetation fires. It has been also found that the enhancement ratio for AOT (at a 550 nm wavelength) manifests a strong increment and a subsequent gradual decrease during the mesoscale transport of BB plumes: these changes can be explained by oxidation processes involving semi-volatile organic compounds. At the same time, there is a tendency of a relative decrease in the absorption AOT (at a 388 nm wavelength), indicating a limited lifetime of the absorbing organic component of BB aerosol (so called brown carbon).

The analysis of the satellite data performed in this study was supported by the Russian Foundation for Basic Research (grant no. 18-05-00911). The validation of the BB aerosol emissions was performed with support from the Russian Science Foundation (project no. 18-17-00076).

1. Konovalov I.B., Beekmann M., Berezin E.V. et al. The role of semi-volatile organic compounds in the mesoscale evolution of biomass burning aerosol: a modeling case study of the 2010 mega-fire event in Russia // *Atmos. Chem. Phys.* 2015. V. 15. P. 13269–13297.
2. Konovalov I.B., Beekmann M., Berezin E.V. et al. Probing into the aging dynamics of biomass burning aerosol by using satellite measurements of aerosol optical depth and carbon monoxide // *Atmos. Chem. Phys.* 2017. V. 17. P. 4513–4537.
3. Konovalov I.B., Lvova D.A., Beekmann M. et al. Estimation of black carbon emissions from Siberian fires using satellite observations of absorption and extinction optical depths // *Atmos. Chem. Phys.* 2018. V. 18. P. 14889–14924.

Global ozone trends in the lower stratosphere

W.T. Ball (william.ball@maasmedia.co.uk)

Institute for Atmospheric and Climate, Science (IAC), ETH Zürich, PMOD/WRC, Davos, Switzerland

Stratospheric ozone protects life from harmful ultraviolet radiation. The Montreal Protocol, enacted to prevent ozone depletion from human activity, halted declines in column-integrated ozone in the 1990s; the upper stratosphere is recovering, but recent evidence suggests that ozone in the lower stratosphere has continued to decrease.

The lower stratosphere is particularly hard to diagnose due to large natural variability, and because accurate estimation of decadal trends in stratospheric ozone requires combining observations from multiple instruments. However, trends extracted from available ozone composites disagree due to data-artefacts that remain after merging data together. To address these issues, we developed a new methodology to account for the artefacts and, furthermore, we use dynamical linear modelling (DLM), a Bayesian multiple linear regression, to estimate robust trends.

We find clear evidence that lower stratospheric ozone continues to decline, preventing total ozone recovery. This contradicts expectations and an understanding of why this trend has emerged is only beginning to become clear. I discuss current trends and recent developments in understanding of the drivers. As such, the problem of ozone depletion is not yet fully resolved: the decline may have an impact future estimates of ozone layer recovery and future surface levels of ultraviolet radiation.

Численное моделирование световых полей в атмосфере: современное состояние, проблемы, перспективы развития

Будак В.П.¹ (BudakVP@gmail.com), Ефременко Д.С.², Катаев М.Ю.³

¹Национальный исследовательский университет «МЭИ», Красноказарменная ул. 14, 111250 Москва, Россия

²Институт технологий дистанционного зондирования (IMF), Немецкий аэрокосмический центр (DLR), Оберпфенхофен, Германия

³Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР)

Анализируется современное состояние развития численных методов решения уравнения переноса излучения (УПИ), исключая метод Монте-Карло. Метод Монте-Карло отличается выраженной специфика. Область его эффективного применения – моделирование стохастических процессов. Наиболее жесткие требования выдвигают задачи определения малых газовых компонент: точность решения УПИ не хуже 1% при скорости вычисления не более 1 секунды для одной длины волны.

Плоский слой является основной геометрией краевых задач переноса излучения в атмосфере. Такая геометрия не соответствует физике в случаях сумеречного освещения земли. Особую область образуют задачи со сосредоточенными источниками: лидары, маяки, аэродромные огни. С учетом требования по точности решения УПИ важным фактором является учет профиля земной поверхности. В большинстве задач принимается горизонтальная однородность атмосферы. Горизонтальная неоднородность атмосферы приводит к трехмерной геометрии. Принятый способ приближения – приближение независимого пикселя (IPA). Горизонтальная неоднородность подстилающей поверхности приводит на основе декомпозиции краевых задач к иерархической системе краевых задач УПИ для плоского слоя.

Центральным моментом численного решения УПИ для любой геометрии является приближенная замена интеграла рассеяния конечной суммой. Это можно выполнить двумя основными методами: дискретных ординат (МДО) или сферических гармоник. Оба метода эквивалентны друг другу, но МДО позволяет проще формулировать граничные условия с произвольным законом отражения. Лучевое приближение, лежащее в основе теории переноса, неизбежно порождает особенности решения. Для замены интеграла рассеяния конечной суммой требуется их выделить пусть приближенно, но обязательно аналитически.

Краевая задач УПИ для плоской геометрии после замены интеграла рассеяния суммой сводится к матричной системе обыкновенных дифференциальных уравнений, которая допускает аналитическое решение в форме матричной экспоненты. Учет поляризации излучения на основе формализма параметров Стокса приводит к эквивалентной системе уравнений, но в 4 раза большей. Симметрия плоской геометрии с учетом краевых условия приводит к решению в форме рассеивателей.

Учет вертикальной неоднородности, характерной для однородной атмосферы, выполняется заменой неоднородности системой однородных слоев. Два смежных слоя можно заменить одним на основе матрично-операторного метода (МОМ). МОМ обладает инвариантностью, что для полубесконечного слоя приводит к формулировке решения в виде инвариантного погружения в дискретной форме. Можно говорить в целом о дискретной форме теории переноса. Учет границы раздела двух сред (атмосфера-океан) и отражение дном также сводится к МОМ.

Высокие требования по скорости и точности решения определяют необходимость ускорения решения. Наиболее эффективным методом ускорения является метод синтетических итераций (СИ). Сущность СИ сводится к двум этапам: на первом находится решение краевой задачи УПИ с высокой сходимостью по энергетике (метрика в среднем), на втором – выполняется простая итерация полученного решения, существенно улучшающая сходимость в равномерной метрике распределения яркости по углу.

Учет случайного распределения оптических параметров среды и формулировка уравнения для их средних значений приводит к зацепляющейся иерархической системе интегральных уравнений. Разделение и решение системы уравнений возможно только после введения некоторых дополнительных предположений о характере флуктуаций среды.

В настоящее время важнейшее прикладное значение имеет решение обратных задач теории переноса. Построение обратного оператора от решения УПИ в дискретной форме требует вычисления производных матрицы переноса (пропагатора) по изменению соответствующего параметра.

Numerical modeling of the radiance fields in the atmosphere: the current status, challenges and perspectives

V.P. Budak¹ (BudakVP@gmail.com), D.S. Efremenko², M.Yu. Kataev³

¹National research University "Moscow Power Engineering Institute", 14 Krasnokazarmennaya str., 111250 Moscow, Russia

²Remote Sensing Technology Institute (IMF), German Aerospace Center (DLR), Oberpfaffenhofen, Germany

³Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics (TUSUR), Tomsk, Russia

In our talk we do not consider the Monte-Carlo technique, but rather focus our attention mainly on deterministic methods for solving the radiative transfer equation. Given extreme accuracy requirements of remote sensing measurements, the error of the forward models as well as the trace gas retrieval algorithms should not exceed 1%. Despite of this, most operational algorithms is based on a rather simplistic independent pixel approximation, in which each column is treated within one-dimensional radiative transfer model, thereby completely ignoring the radiation transport between atmospheric columns. Several solution techniques for horizontally inhomogeneous media have been developed. Nevertheless, there is still a lack of systematic studies of the effects caused by sub-pixel cloud inhomogeneities on the radiances at the top of the atmosphere.

The numerical solution of the 1D radiative transfer equation (RTE) is well known and follows the following steps: (1) the analytical extraction of the angular singularities from the radiance field, (2) the representation of the integral term in the discrete space by applying the discrete ordinate method and/or the spherical harmonics method, (3) vertical discretization of the atmosphere into several homogeneous layers. These steps lead to the system of ordinary differential equations. The system equipped with boundary conditions can be solved as it is or through the matrix-operator method. In the latter case the atmospheric layers are united into one layer with the effective parameters iteratively. The same scheme is valid for the polarized model formulated for the Stokes vector.

The performance of the RTE solvers is very important issue for practical applications. In our recent studies, the numerical efficiency of the monochromatic solvers was improved by using the synthetic iteration technique. In the first step, an approximate solution is found by using the small-angle approximation for the singular part and the two-stream solution for the regular part. In the second step, the solution is refined for a given direction allowing to accurately compute rainbows. Since then, no breakthroughs in the monochromatic solvers have been reported. Further performance enhancements have been achieved in the framework of hyper-spectral computations, in which the k-distribution approach and the dimensionality reduction are exploited. But in this field, there has been also a saturation: only minor improvements as compared to previous results have been proposed.

In this regard, the question arises: in which areas of radiative transfer should we expect breakthrough ideas? Is there a place left for the scientific development in radiative transfer? In our opinion, two possible candidates can be identified, namely, the stochastic radiative transfer and retrieval problems. These topics attract a lot of attention in the context of new high resolution atmospheric composition sensors. The stochastic treatment of horizontal inhomogeneities provides unbiased estimate of the measured radiance, and so, on the retrieval results, in a computationally efficient way.

In our talk, we summarize recent studies in these fields and outline possible perspectives of future research.

Воздействие волн от стартов ракет с космодрома Восточный на ионосферу Земли

Перевалова Н.П.¹ (pereval@iszf.irk.ru), Жеребцов Г.А.¹, Серов М.А.², Жижерин В.С.²

¹*Институт солнечно-земной физики СО РАН, ул. Лермонтова 126-а, 664033 Иркутск, Россия*

²*Институт геологии и природопользования ДВО РАН, Релочный пер. 1, 657000 Благовещенск, Россия*

В 2016–2018 гг. с нового российского космодрома Восточный выполнено четыре запуска космических аппаратов. На основе анализа сигналов глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС), таких как GPS и ГЛОГНАСС, проведено исследование воздействия на ионосферу Земли атмосферных волн, сгенерированных во время этих запусков. Для исследования использовались данные измерений ГНСС-приемников ИГиП ДВО РАН и Международной сети IGS (<http://sopac.ucsd.edu>), действующих в районе Восточного. В отличие от предыдущих исследований, ГНСС-приемники ИГиП ДВО РАН, расположенные в непосредственной близости от космодрома, позволили зарегистрировать и изучить ионосферные возмущения на малых расстояниях от места старта.

Возмущения в ионосфере анализировались на основе вариаций полного электронного содержания (ПЭС), рассчитанных по двухчастотным фазовым измерениям приемников ГНСС. Во время всех запусков в вариациях ПЭС обнаружены возмущения, имевшие характерную форму, соответствующую форме ударной акустической волны (УАВ), которая образуется при сверхзвуковом полете ракеты-носителя (РН) в атмосфере. Амплитуда возмущений ПЭС варьировалась в пределах 0.02–0.94 TECU со средним значением 0.13 TECU. Периоды возмущений менялись в пределах от 1.5 до 12 мин со средним значением 5 мин. Возмущения ПЭС наблюдались преимущественно вдоль траектории полета РН. Это позволило оценить направление движения РН. Пространственно-временная динамика зарегистрированных возмущений ПЭС свидетельствует о распространении волны возмущения в направлении от траектории РН. Выполнен сравнительный анализ параметров ионосферных возмущений для различных запусков.

Авторы выражают глубокую благодарность Scripps Orbit and Permanent Array Center (SOPAC, <http://sopac.ucsd.edu>) за предоставление данных международной сети приемников ГНСС. Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта Российского Научного Фонда (проект № 18-17-00042). Данные измерений ГНСС-приемников ИГиП ДВО РАН получены при поддержке комплексной программы фундаментальных научных исследований ДВО РАН "Дальний Восток" (№18-5-024).

Impacts on the Earth's ionosphere of the waves formed by rocket launches from Vostochny Space Center

N.P. Perevalova¹ (pereval@iszf.irk.ru), G.A. Zherebtsov¹, M.A. Serov², V.S. Zhizherin²

¹*Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS, 126a Lermontov str., 664033 Irkutsk, Russia*

²*Institute of Geology and Nature Management FEB RAS, 1 Relochii str, 657000 Blagoveshchensk, Russia*

Four spacecraft launches were performed from the new Russian Space Center Vostochny in 2016–2018. Based on the analysis of signals of Global Navigation Satellite Systems (GNSS), such as GPS and GLOGNASS, we examined the effects of the atmospheric waves generated during these launches on the Earth's ionosphere. We used data from GNSS receivers of the IGNM FEB RAS and the IGS International Network (<http://sopac.ucsd.edu>), which operate in the Vostochny area. In contrast to previous studies, GNSS receivers of the IGNM FEB RAS located in proximity to the Space Center allowed us to register and analyze the ionospheric disturbances at small distances from the launch site.

Ionospheric disturbances were studied using variations in total electron content (TEC) calculated from dual-frequency phase measurements with GNSS receivers. During all launches, disturbances with typical shape corresponding to the shape of a shock acoustic wave (SAW) were detected in TEC variations. A SAW is formed by a launch vehicle (LV) supersonic flight in the atmosphere. Amplitude of TEC disturbances varied from 0.02 to 0.94 TECU with the mean of 0.13 TECU. Periods of TEC disturbances changed in the 1.5–12 min range with the average of 5 min. TEC disturbances were observed mainly along the LV trajectory. This allowed us to determine the direction of LV movement. The spatio-temporal dynamics of the recorded TEC disturbances indicates that the disturbance wave propagates away from the LV trajectory. A comparative analysis of the ionospheric disturbance parameters for different launches was performed.

We are deeply indebted to Scripps Orbit and Permanent Array Center (SOPAC, <http://sopac.ucsd.edu>) for providing data from the international network of GNSS receivers. This study was supported by the Grant of the Russian Science Foundation (Project No 18-17-00042). The data of GNSS receivers operated by IGNM FEB RAS were obtained with the support of the FEB RAS comprehensive program for basic scientific research "Far East" (№18-5-024).

Локальные и глобальные факторы, определившие изменения аэрозольной оптической толщины атмосферы в Москве с 1955 по 2019 год

Горбаренко Е.В. (catgor@mail.ru)

*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Ленинские горы 1, 119992 Москва,
Россия*

Анализируются результаты мониторинга аэрозольной мутности атмосферы, проводимого в метеорологической обсерватории МГУ (МО МГУ) с 1955 года. В качестве характеристики мутности атмосферы используется аэрозольная оптическая толщины атмосферы (АОТ) для эффективной длины волны солнечного спектра 550 нм, рассчитанная по данным измерений интегральной прямой солнечной радиации стандартным актинометром. Проведены оценки на изменчивость АОТ значимых вулканических извержений, лесных пожаров в Подмосковье в 1972, 2002, 2010 годах и влияние продуктов горения лесов Сибири в июле 2016 года. Показано существенное повышение прозрачности атмосферы и изменение режима АОТ в последние десятилетия. Средние годовые значения на протяжении всего 21 века на 20–60% ниже исторической и текущих норм, уменьшилась годовая амплитуда АОТ. Средние годовые значения в 2017 и 2018 годах (0.08) стали абсолютными минимумами за весь период наблюдений. Такие изменения могут быть связаны с изменениями общей циркуляции атмосферы Северного полушария.

Особенности годовой и межгодовой изменчивости в различные периоды рассмотрены во взаимосвязи с межгодовой изменчивостью индексов, характеризующих изменчивость атмосферы в Северном полушарии – STANDARDIZED NORTHERN HEMISPHERE TELECONNECTION: Североатлантический (NAO), Полярно-Евразийский (Polar-Eurasia – POL), Скандинавский (Scandinavian – SCA), Восточно-Атлантический (East Atlantic – EA), Восточно-Атлантический–Западно-Российский (East Atlantic – West Russia–EAWR). Отмечено увеличение взаимозависимости между АОТ и общей циркуляцией атмосферы в поствулканический период во все месяцы года. Наиболее значительно проявилось влияние Североатлантического, Скандинавского и Полярно-Евразийского индексов.

Local and global factors that determined the changes in the aerosol optical thickness of the atmosphere in Moscow from 1955 to 2019

E.V. Gorbarenko (catgor@mail.ru)

M.V. Lomonosov Moscow State University, 1 Leninsky gory, 119992 Moscow, Russia

The results of monitoring the atmospheric aerosol turbidity conducted in the Meteorological Observatory of Moscow State University (MO MSU) since 1955 are analyzed. As a characteristic of the turbidity of the atmosphere, an aerosol optical thickness of the atmosphere (AOT) for the effective wavelength of the solar spectrum of 550 nm, calculated from measurements of the integral direct solar radiation with a standard actinometer is used. Estimations of the AOT volatility due to significant volcanic eruptions, forest fires in the Moscow region in 1972, 2002, 2010 and the influence of the products of burning forests of Siberia in July 2016 were carried out. A significant increase in atmospheric transparency and a change in the AOT regime in recent decades has been shown. The average annual values throughout the 21st century are 20–60% lower than the historical and current norms, the AOT annual amplitude has decreased. The average annual values in 2017 and 2018 (0.08) were absolute minimums for the entire observation period. Such changes may be associated with changes in the general circulation of the atmosphere of the Northern Hemisphere.

The peculiarities of the annual and inter-annual variability in different periods are considered in conjunction with the inter-annual variability of indices characterizing atmospheric variations in the Northern Hemisphere – STANDARDIZED NORTHERN HEMISPHERE TELECONNECTION: North Atlantic (NAO), Polar-Eurasia (POL), Scandinavian (SCA), East Atlantic (EA), East Atlantic-West Russian (EAWR). An increase in the interdependence between AOT and the general circulation of the atmosphere in the post-volcanic period in all months of the year is noted. The influence of the North Atlantic, Scandinavian and Polar-Eurasian indices was most pronounced.

СЕКЦИЯ 1. "СПУТНИКОВОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ АТМОСФЕРЫ и ПОВЕРХНОСТИ"

Председатель: д.ф.-м.н. **А.Б. Успенский** (НИЦ "Планета", Москва, Россия)

Сопредседатели: д.ф.-м.н. **А.Ф. Нерушев** (НПО "Тайфун", Москва, Россия),
Dr. **A. Kokhanovsky** (VITROCISSET Belgium SPRL, Germany),
Prof. **Georg Heygster** (University of Bremen, Germany)

SESSION 1. "SATELLITE SOUNDING of ATMOSPHERE and SURFACE"

Chairman: Prof. **A.B. Uspensky** (SRC "Planeta", Moscow, Russia)

Co-Chairmen: Prof. **A.F. Nerushev** (SPA "Typhoon", Obninsk, Russia), Dr. **A. Kokhanovsky** (VITROCISSET Belgium SPRL, Germany), Prof. **G. Heygster** (University of Bremen, Germany)

Vegetation Earth System Data Record from DSCOVER EPIC Observations

Yuri Knyazikhin¹ (jknjazi@bu.edu), Wanjuan Song^{1,2}, Bin Yang^{1,3}, Matti Möttöus⁴,
Miina Rautiainen⁵, Jan Pisek⁶ and Pauline Stenberg⁷

¹Department of Earth and Environment, Boston University, 685 Commonwealth Avenue, Boston, MA 02215, USA

²Beijing Normal University, China

³Hunan University, China

⁴VTT Technical Research Centre of Finland, Finland

⁵Aalto University, Finland

⁶University of Tartu, Estonia

⁷University of Helsinki, Finland

The NASA's Earth Polychromatic Imaging Camera (EPIC) onboard NOAA's Deep Space Climate Observatory (DSCOVER) mission was launched on February 11, 2015 to the Sun-Earth Lagrangian L1 point where it began to collect radiance data of the entire sunlit Earth every 65 to 110 min in June 2015. It provides imageries in near backscattering directions at ten ultraviolet to near infrared narrow spectral bands. The DSCOVER EPIC science product suite includes vegetation Earth system data record (VESDR) that provides leaf area index (LAI) and diurnal courses of normalized difference vegetation index (NDVI), sunlit LAI (SLAI), fraction of incident photosynthetically active radiation (FPAR) absorbed by the vegetation and Directional Area Scattering Function (DASF). The parameters at 10-km sinusoidal grid and 65-110 min temporal frequency are generated from the upstream EPIC MAIAC surface reflectance product. The DSCOVER EPIC science team also provides two ancillary science data products derived from 500m MODIS land cover type 3 product: 10 km Land Cover Type and Distribution of Land Cover Types within 10 km EPIC pixel. All products were released on June-7-2018 and publicly available from the NASA Langley Atmospheric Science Data Center (https://eosweb.larc.nasa.gov/project/dscovr/dscovr_epic_l2_vesdr_01).

This presentation provides an overview of the EPIC VESDR research, which includes descriptions of the algorithm and product, initial assessment of its quality and obtaining new information on vegetation properties from the VESDR product.

Оценки антропогенных эмиссий CO₂ для мегаполиса Санкт-Петербурга по спутниковым измерениям ОСО-2

Тимофеев Ю.М. (y.timofeev@spbu.ru), Березин И.А., Поберовский А.В.,
Макарова М.В., Виролайнен Я.А., Поляков А.В., Фока С.Ч.

Санкт-Петербургский государственный университет, Университетская наб. 7/9, 199034 Санкт-Петербург, Россия

На основе измерений содержания CO₂ с помощью аппаратуры спутника ОСО-2 в районе Санкт-Петербурга определены с помощью простой боксовой модели атмосферы антропогенные эмиссии углекислого газа 01.03.2016 г. и 12.05.18 г. Эмиссии в эти дни заметно отличаются и находятся в диапазоне 44–180 тонн/км² сутки, что превышает более

ранние оценки эмиссий в районе Петергофа в ночное время. Большая изменчивость эмиссий в районе Санкт-Петербурга обусловлена погрешностями оценок эмиссий (40–60%), а также их временной изменчивостью.

Estimates of anthropogenic CO₂ emissions for the St. Petersburg megacity from OCO-2 satellite measurements

Yu.M. Timofeev (y.timofeev@spbu.ru), I.A. Berezin, A.V. Poberovsky, M.V. Makarova,
Ya.A. Virolainen, A.V. Polyakov, S.Ch. Foka
Saint-Petersburg State University, 7/9 Universitetskaya nab., 199034 Saint-Petersburg, Russia

On the basis of CO₂ content measurements by the equipment of the OCO-2 satellite in the area of St. Petersburg, anthropogenic carbon dioxide emissions for 01.03.2016 and 12.05.18 were determined using a simple box model of the atmosphere. Emissions in these days are markedly different and are in the range of 44–180 t/km² per day, which exceeds earlier estimates of emissions in the area of Peterhof at night. Large variability of emissions in the area of St. Petersburg is due to errors in emission estimates (40–60%), as well as their temporal variability.

Характеристики поля ветра верхней тропосферы по данным многолетних измерений европейских геостационарных метеорологических спутников

Нерушев А.Ф. (nerushev@rpatyphoon.ru), Вишератин К.Н., Ивангородский Р.В.
НПО «Тайфун», ул. Победы 4; 249038 Обнинск, Россия

Сведения о характеристиках поля ветра в тропосфере чрезвычайно важны для решения многих фундаментальных и прикладных задач физики атмосферы, анализа последствий климатических изменений, прогноза погоды и многих других областей человеческой деятельности. Важнейшее значение для их получения как в глобальном, так и в региональном масштабе с хорошим пространственно-временным разрешением принадлежит спутниковым методам. В докладе на основе единого подхода рассмотрены характеристики струйных течений (СТ) и турбулентности как существенных элементов динамики верхней тропосферы. Исходной спутниковой информацией служили данные измерений радиометра SEVIRI европейских геостационарных метеорологических спутников второго поколения. На временном интервале 2007–2018 годы изучена пространственно-временная изменчивость характеристик СТ и турбулентности в пределах зоны обзора спутников. Рассмотрена их связь с существенными параметрами земной климатической системы – температурой тропосферы, площадью морского льда и крупномасштабными атмосферными процессами.

Выявлены общие закономерности и существенные различия межгодовой изменчивости основных характеристик СТ в Северном и Южном полушариях. Оценена тенденция изменений кинетической энергии СТ в Северном полушарии. Найдено уменьшение кинетической энергии СТ на временном интервале 2007–2018 гг. на 9% при значимом линейном тренде. На основе применения корреляционного и кросс-вейвлетного анализов показано, что наибольшая связь температуры на уровнях от 200 гПа до 500 гПа прослеживается с площадью СТ и широтным положением его центра. При этом межгодовые вариации температуры верхней тропосферы и площади СТ происходят в обоих полушариях в противофазе, а температуры и широты центра СТ – в фазе. Вариации годового колебания площади морского льда и площади СТ происходят в обоих полушариях преимущественно в фазе, а колебания площади морского льда и широты центра СТ близки к противофазе. Выявлена особенность годовых вариаций рядов площади морского льда и площади СТ в Северном полушарии, состоящая в том, что вариации площади СТ опережают вариации площади морского льда на 1.5–2.5 мес. Выявлен сложный, изменяющийся со временем

характер связей характеристик СТ с Северо-Атлантическим колебанием (NAO) и квазидвухлетней цикличностью зонально усредненного над экватором ветра (QBO).

Приводятся результаты расчетов среднемесячных площадей зон турбулентности с различными значениями коэффициента горизонтальной мезомасштабной турбулентной диффузии. Показано, что на протяжении последних 12 лет происходило существенное увеличение площади областей, занятых сравнительно слабой и умеренной турбулентностью и некоторое уменьшение площадей с сильной и очень сильной турбулентностью. Выявлена тесная связь межгодовой изменчивости среднемесячных значений площадей зон турбулентности с соответствующей изменчивостью характеристик СТ.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 18-05-00831а.

Characteristics of the upper troposphere wind field according to the long-term measurements of European geostationary meteorological satellites

A.F. Nerushev (nerushev@rpatyphoon.ru), K.N. Visheratin, R.V. Ivangorodsky
Research and Production Association «Typhoon», 4 Pobedy str., 249038 Obninsk, Russia

Information about the characteristics of the wind field in the troposphere is extremely important for solving many fundamental and applied problems of atmospheric physics, analyzing the effects of climate change, weather forecasting and many other areas of human activity. The most important for obtaining them on a global and regional scale with a good spatial-temporal resolution belongs to satellite methods. The report based on a unified approach and considers the characteristics of jet streams (JS) and turbulence as essential elements of the dynamics of the upper troposphere. The initial satellite information was SEVIRI measurement data from second-generation European geostationary meteorological satellites. The spatial-temporal variability of the characteristics of JS and turbulence within the satellite survey area has been studied for 2007–2018. Their connection with the essential parameters of the Earth's climate system – the temperature of the troposphere, the area of sea ice and large-scale atmospheric processes – is considered.

General patterns and significant differences in the interannual variability of the main characteristics of the JS in the northern and southern hemispheres are revealed. The trend of the kinetic energy of JS in the Northern Hemisphere has been estimated. The decrease in the kinetic energy of JS for 2007–2018 amounted to 9% with a significant linear trend. Using correlation and cross-wavelet analyzes, it has been shown that the greatest correlation of temperature at levels from 200 hPa to 500 hPa is observed with the area of JS and the latitudinal position of its center. At the same time, the interannual variations in the temperature of the upper troposphere and the area of the JS occur in out-of-phase in both hemispheres, while the temperatures and latitudes of the center of the JS are in phase. The annual variations in the area of sea ice and the area of JS occur in both hemispheres mainly in phase, while the variations in the area of sea ice and latitude of the center of JS are close to antiphase. It is shown that in Northern Hemisphere variations in the area of JS are ahead of the variations in the area of sea ice by 1.5–2.5 months. A comparison of the characteristics of the JS with the North Atlantic Oscillation (NAO) and the quasi-two-year cyclicity of the zonal-averaged wind over the equator (QBO) showed the complex, changing over time nature of the connections.

The results of calculations of the monthly average areas of the turbulence zones with different values of the horizontal mesoscale turbulent diffusion coefficient are presented. It is shown that over the past 12 years a significant increase in the area of areas occupied by relatively weak and moderate turbulence and a slight decrease in areas with strong and very strong turbulence are observed. A close relationship was revealed between the interannual variability of the monthly area means of turbulence zones and the corresponding variability of the characteristics of JS.

This work was supported by the RFBR grant 18-05-00831а.

Statistically based calibration/validation control of space-borne lidars

A.G. Feofilov¹ (artem.feofilov@lmd.polytechnique.fr), H. Chepfer¹, V. Noel², M. Chiriaco³

¹LMD/IPSL/Sorbonne, Paris, France

²Laboratoire d'Aerologie, Toulouse, France

³LATMOS / OVSQ, Guyancourt, France

Clouds and aerosols play an important role in the Earth's energy budget through a complex interaction with solar, atmospheric, and terrestrial radiation, and air humidity. Optically thick clouds efficiently reflect the incoming solar radiation and, globally, clouds are responsible for about two thirds of the planetary albedo. Thin cirrus trap the outgoing longwave radiation and keep the planet warm. Aerosols scatter or absorb sunlight depending on their size and shape and interact with clouds in various ways. Due to the importance of clouds and aerosols for the Earth's energy budget, global satellite observations of their properties are essential for climate studies, for constraining climate models, and for evaluating cloud parameterizations. Active sounding from space by lidars and radars is advantageous since it provides the vertically resolved information. This has been proven by CALIOP lidar which has been observing the Earth's atmosphere since 2006. Another instrument of this kind, CATS lidar on-board ISS provided measurements for over 33 months starting from the beginning of 2015. The ALADIN lidar on-board ADM/Aeolus has been measuring horizontal winds and aerosols/clouds since August 2018. More lidars are planned – in 2021, the ATLID/EarthCare lidar will be launched and the MESCAL lidar is currently in the development phase.

Needless to say that the quality of the retrieved data strongly depends on the quality of the calibration of the lidar system and its components. Besides “classical” calibration methods (laboratory calibration, calibration in space using on-board sources and/or known external sources and calibration through collocation, which involves comparisons with ground-based station-, balloon-, and aircraft measurements), one can also make use of a vicarious calibration, where the sites with known properties are used. In this work, we suggest to go one step further and use the whole atmosphere for quality control of the space-borne lidar system, which includes the laser, the sending optics, the receiver with its telescope, and the detection system which may include several detectors.

We propose a quality control approach based on a set of several indicators, which would characterize the behavior of the lidar system on a day-to-day basis using the L1 data as an input. With the help of this set one can trace:

- (a) the stability of the detection chain for the lidar channels (Rayleigh, Mie);
- (b) the drift of crosstalk coefficients;
- (c) the stability of day- and nighttime stratospheric noise;
- (d) the stability of the radiation detection for all atmospheric scenarios and over the whole globe using a clustering algorithm applied to the scattering ratio (SR) histograms.

We demonstrate the feasibility of the approach using 8 years of CALIOP L1 data for polarized and cross-polarized attenuated backscatter components and using one month of LMDZ General Circulation Model run coupled with the COSP2 ATLID lidar simulator for the Rayleigh- and Mie- channels of the ATLID high spectral resolution lidar.

Бортовой инфракрасный фурье-спектрометр ИКФС-2: опыт эксплуатации и развитие работ

Козлов Д.А. (dima_kozlov@mail.ru), Завелевич Ф.С., Головин Ю.М., Никулин А.Г.,
Монахов Д.О., Козлов И.А., Черкашин И.С.

Исследовательский центр им. М.В. Келдыша, Онежская 8, 125438 Москва, Россия

Бортовой инфракрасный фурье-спектрометр температурного и влажностного зондирования ИКФС-2 предназначен для измерения спектров уходящего излучения

атмосферы Земли и решения на их основе оперативных задач гидрометеорологического обеспечения. Аппаратура ИКФС-2 в составе КА «Метеор-М» № 2 обеспечивает получение спектров атмосферы Земли в диапазоне спектра от 5 до 15 мкм (от 660 до 2000 см⁻¹) со спектральным разрешением 0.4 см⁻¹ в полосе обзора до 2500 км с пространственным разрешением в надире 30 км. Запуск космического аппарата «Метеор-М» № 2 с фурье-спектрометром ИКФС-2 состоялся 8 июля 2014 г. Спектры уходящего излучения, измеренные с помощью аппаратуры ИКФС-2, позволяют восстанавливать вертикальные профили температуры с погрешностями, близкими к 1 К в большей части высотной области 0–30 км, за исключением нижней тропосферы и высот более 30 км, где эти погрешности близки к 2–3 К. Также в настоящее время данные ИКФС-2 используются для верификации полей численного прогноза погоды, полученных с использованием данных радиозондирования, и учитываются при составлении синоптического прогноза в Дальневосточном регионе.

Запуски КА «Метеор-М» № 2-2, № 2-3, № 2-4 запланированы на 2019 г., 2020 г. и 2021 г. Для аппаратуры ИКФС-2 для КА «Метеор-М» № 2-5, № 2-6 предлагается выполнить модернизацию. Целью модернизации является введение второго измерительного канала и расширение рабочего спектрального диапазона до (3.5–15) мкм при сохранении требований по массе, энергопотреблению, габаритам прибора и потоку информации, что позволит расширить номенклатуру и повысить качество спутниковой информационной продукции, а именно:

1) регистрация спектров излучения в полосе поглощения CO₂ вблизи 4.3 мкм позволит повысить вертикальное разрешение профилей температуры атмосферы, восстанавливаемых по спутниковым данным;

2) регистрация излучения в диапазоне (5.5–6.3) мкм отдельным фотоприемником позволит существенно уменьшить спектральную пороговую яркость, что серьезно улучшит информационный потенциал прибора в части восстановления вертикальных профилей относительной и удельной влажности;

3) регистрация спектров излучения в полосе поглощения CO вблизи 4.6 мкм позволит оценить содержание угарного газа в атмосфере;

4) наличие в составе измерений спектральных каналов – «микроокон прозрачности» в диапазоне (3.7–4.2) мкм позволит усовершенствовать процедуру детектирования облачности в поле зрения прибора и, тем самым, повысит достоверность результатов температурно-влажностного зондирования атмосферы и дистанционного определения температуры поверхности (воды и суши).

Spaceborne Infrared Fourier-Transform Spectrometer IKFS-2: operating experience and further development

D. Kozlov (dima_kozlov@mail.ru), F. Zavelevich, Yu. Golovin, A. Nikulin, D. Monakhov,
I. Kozlov, I. Cherkashin

Keldysh Research Center, 8 Onezhskaya, 125438 Moscow, Russia

The spaceborne infrared Fourier-transform spectrometer IKFS-2 is dedicated to temperature and humidity sounding of the atmosphere for hydrometeorological needs. The instrument provides measurements of the atmosphere spectra in the spectral range of 5–15 μm (660–2000 cm⁻¹) with spectral resolution of 0.4 cm⁻¹ (unapodized), swath width of 1000–2500 km and instantaneous FOV of 30 km (for nadir). The IKFS-2 instrument is operated onboard the Meteor-M No. 2 spacecraft, which was launched on July 8, 2014. Spectra of outgoing thermal radiation of the atmosphere measured by the IKFS-2 instrument allow to retrieving vertical temperature profiles with errors close to 1 K at most of the altitude range of 0–30 km, with the exception of the lower troposphere and heights of more than 30 km, where these errors are close to 2–3 K. Also at present, the IKFS-2

data are used to verify the fields of numerical weather prediction obtained using radiosonde data and are taken into account in synoptic forecast in the Far East region.

The Meteor-M No. 2-2, No. 2-3, No. 2-4 launches are scheduled for 2019, 2020 and 2021. The IKFS-2 for Meteor-M No. 2-5, No. 2-6 are planned to be modified. The purpose of the modernization is to introduce the second infrared channel and to extend spectral range to (3.5–15.0) μm while maintaining the requirements for mass, energy consumption, dimensions and data flow of the instrument. It will improve the quality of satellite information products, namely:

1) measurement of radiation in the CO_2 absorption band near 4.3 μm will improve the vertical resolution of the atmospheric temperature profiles retrieved from satellite data;

2) measurement of radiation in the range of (5.5–6.3) μm by a separate photodetector will significantly reduce the noise equivalent spectral radiance in the water vapor spectral band and improve the quality of vertical relative humidity profiles;

3) measurement of radiation in the CO absorption band near 4.6 μm will allow to estimating the carbon monoxide content in the atmosphere;

4) measurement of radiation in the range (3.7–4.2) μm will improve cloud detection and thus increase the reliability of the results of temperature and humidity sounding of the atmosphere and remote determination of surface (water and land) temperature.

High-Resolution Temperature Profiles (H RTP) retrieved from bi-chromatic stellar scintillation measurements by GOMOS/Envisat

V.F. Sofieva¹ (viktor.sofieva@fmi.fi), F. Dalaudier², Alain Hauchecorne², and V. Kan³

¹*Finnish Meteorological Institute, P.O. BOX 503, FI-00101 Helsinki, Finland*

²*Université; Versailles St-Quentin, Sorbonne Université, CNRS/INSU, LATMOS-IPSL, Guyancourt, France*

³*A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics RAS, 3 Pyzhevsky per., 119017 Moscow, Russia*

In this presentation, we describe the inversion algorithm for retrievals of high vertical resolution temperature profiles using bi-chromatic stellar scintillation measurements in the occultation geometry. This retrieval algorithm has been improved with respect to nominal ESA processing and applied to the measurements by Global Ozone Monitoring by Occultation of Stars (GOMOS) operated on board Envisat in 2002–2012. The retrieval method exploits the chromatic refraction in the Earth's atmosphere. The bi-chromatic scintillations allow the determination of the refractive angle, which is proportional to the time delay between the photometer signals.

The paper discusses the basic principle and detailed inversion algorithm for reconstruction of high resolution density, pressure and temperature profiles (H RTP) in the stratosphere from scintillation measurements. The H RTP profiles are retrieved with very good vertical resolution of ~ 200 m and high accuracy of $\sim 1\text{--}3$ K for altitudes of 15–32 km and with a global coverage. The best accuracy is achieved in in-orbital-plane occultations, and the accuracy weakly depends on star brightness. The whole GOMOS dataset has been processed with the improved H RTP inversion algorithm using the FMI's Scientific Processor; and the dataset (H RTP FSP v1) is in open access.

The validation of small-scale fluctuations in the retrieved H RTP profiles is performed via comparison of vertical wavenumber spectra of temperature fluctuations in H RTP and in collocated radiosonde data. We have found that the spectral features of temperature fluctuations are very similar in H RTP and collocated radiosonde temperature profiles. H RTP can be assimilated into atmospheric models, used in studies of stratospheric clouds and in analysis of internal gravity waves activity. As an example of geophysical applications, gravity wave potential energy has been estimated using the H RTP dataset. The obtained spatio-temporal distributions of gravity wave energy are in good agreement with the previous analyses using other measurements.

Satellite observations of increasing sea surface temperature trends over the steadily shrinking Dead Sea

Pavel Kishcha (pavel@cyclone.tau.ac.il)

Department of Geophysics, Tel Aviv University, 69978 Tel Aviv, Israel

The Dead Sea has been drying up over the last four decades: the water level has dropped at the rate of approximately 1 m per year. The Dead Sea drying up is due to the lack of water inflow from the Jordan River and increasing evaporation. A positive feedback loop between the steady shrinking of the Dead Sea and positive sea surface temperature (SST) trends takes place in the Dead Sea [1]. This positive feedback loop together with atmospheric warming causes the following three processes: increasing evaporation; an accelerating decrease in Dead Sea water levels; and increasing warming of steadily shrinking Dead Sea surface water.

Using observations from Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS), positive trends were detected in both daytime and nighttime Dead Sea surface temperature (SST) over the period of 2000–2016. These positive SST trends were observed in the absence of positive trends in surface solar radiation, measured by the Dead Sea buoy pyranometer. We also show that long-term changes in water mixing in the uppermost layer of the Dead Sea under strong winds could not explain the observed SST trends. Satellite-based SST measurements showed that maximal SST trends of over 0.8 degrees per decade were observed over the north-west and southern sides of the Dead Sea, where shrinking of the Dead Sea water area was pronounced. No noticeable SST trends were observed over the eastern side of the lake, where shrinking of the Dead Sea water area was insignificant. This finding demonstrates correspondence between the positive SST trends and the shrinking of the Dead Sea, indicating a causal link between them. There are two opposite processes taking place in the Dead Sea: sea surface warming and cooling. On the one hand, the positive feedback loop (between the steady shrinking of the Dead Sea and SST trends) and atmospheric warming lead to sea surface warming every year accompanied by a long-term increase in SST. On the other hand, the measured acceleration of the Dead Sea water-level drop suggests a long-term increase in Dead Sea evaporation accompanied by a long-term decrease in SST.

During the period under investigation, the total result of these two opposite processes is the statistically significant positive sea surface temperature trends in both daytime (0.6 degrees per decade) and nighttime (0.4 degrees per decade), observed by the MODIS instrument. Our findings of the existence of a positive feedback loop between the positive SST trends and the shrinking of the Dead Sea imply the following significant point: any meteorological, hydrological or geophysical process causing the steady shrinking of the Dead Sea will contribute to positive trends in SST. Our results shed light on continuing hazards to the Dead Sea.

1. Kishcha P., Pinker R., Gertman I., Starobinets B., Alpert P. (2018). Observations of positive sea surface temperature trends in the steadily shrinking Dead Sea // *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 2018. V. 18. P. 3007–3018, <https://doi.org/10.5194/nhess-18-3007-2018>.

Использование данных дистанционного зондирования о характеристиках подстилающей поверхности и метеорологических характеристиках при оценке составляющих водообмена для засушливых территорий

Старцева З.П.¹ (starzoya@yandex.ru), Музылёв Е.Л.¹ (muzylev@iwp.ru),
Волкова Е.В.² (quantocosa@bk.ru), Василенко Е.В.²

¹*Институт водных проблем РАН, ул. Губкина 3, 119333 Москва, Россия*

²*Научно-исследовательский центр "Планета", Б. Предтеченский пер. 7, 123242 Москва, Россия*

Востребованность надежных оценок водообеспеченности засушливых территорий сельскохозяйственного назначения достаточно велика, поскольку при малом количестве выпадающих осадков и отсутствии полива земледелие на таких территориях непродуктивно, если вообще возможно. Одним из наиболее эффективных в настоящее время способов

получения таких оценок является проведение расчетов влагозапасов почвы W , суммарного испарения E_v и других характеристик водного режима этих территорий с помощью физико-математических моделей их влаго- и теплообмена с атмосферой LSM (Land Surface Model), адаптированных к данным дистанционного зондирования со спутников, которые содержат информацию о состоянии подстилающей поверхности (ПП) и метеорологических условиях.

В рамках подобного подхода в работе описаны возможности использования в LSM оценок вегетационного индекса NDVI, листового индекса LAI, проективного покрытия растительностью B , осадков, температуры поверхности почвы T_{sg} и воздуха у поверхности растительного покрова T_a (принимаемой за ее температуру), эффективной ТПП $T_{s,eff}$ (взвешенной суммы T_{sg} и T_a), полученных при тематической обработке данных измерений сканирующих радиометров AVHRR/NOAA, МСУ-МР/Метеор-М №2 и SEVIRI/Meteosat-10, -11, -8 для расчетов названных характеристик водного режима. В качестве исследуемой была выбрана находящаяся в зоне сухой степи территория Саратовского и Волгоградского Заволжья (левобережной части Саратовской и Волгоградской областей) площадью около 66600 км². Исследования проводились на примере сезонов вегетации 2016–2017 гг. Оценки суточных, декадных и месячных сумм осадков производились с помощью комплексной пороговой методики (КПМ) детектирования облачности и идентификации ее типов, а также выделения зон осадков и определения их максимальной в пределах пиксела интенсивности [1–5]. Данная методика была адаптирована к исследуемому засушливому району. Основу методики составляет переход от оценки интенсивности осадков к оценке их суточных сумм. Эти суммы рассчитываются по уравнениям регрессии, где в качестве предикторов используются данные измерений в 5-и каналах AVHRR, 11-и каналах SEVIRI и 3 каналах МСУ-МР, а также их разности. Проверка достоверности оценки осадков по данным всех сенсоров производилась при сравнении их вычисленных суточных, декадных и месячных сумм между собой и с аналогичными суммами, определенными по данным наблюдений на агрометеорологических станциях. Совпадение зон осадков, детектированных по спутниковым данным и определенных по данным наземных наблюдений, наблюдалось для каждого радиометра примерно в 80 % случаев.

Оценки T_{sg} , T_a и $T_{s,eff}$ по данным AVHRR, МСУ-МР и SEVIRI были получены при использовании вычислительного алгоритма, разработанного на основе КПМ [6] и отлаженного на данных этих сенсоров для Центрально-Черноземного региона (ЦЧР). Значения T_{sg} и T_a для безоблачных пикселей восстанавливались методом GSW (Generalized Split-Window) [7] с помощью уравнений регрессии по измеренной со спутника радиационной температуре в каналах 11 и 12 мкм (T_{11} , T_{12}). Корректность построенных спутниковых оценок ТПП для сезонов вегетации 2016–2017 гг. была подтверждена путем сравнения их значений между собой, с данными измерений температуры воздуха на агрометеорологических станциях района исследований и, косвенно, с привлечением результатов расчетов W и E_v с помощью LSM при использовании наземных и спутниковых данных о температурах. Для подавляющего числа оценок ТПП по спутниковым данным и результатов расчетов по модели их разности не превышали погрешностей оценки T_{sg} , T_a и $T_{s,eff}$ по данным AVHRR для ЦЧР, принимавшихся за эталонные.

Значения NDVI рассчитывались с помощью стандартных формул, оценки B и LAI были построены с использованием эмпирических зависимостей от NDVI для нескольких типов землепользования, характерных для исследуемого района. Все представленные спутниковые оценки, а также модельные расчеты W , E_v и других характеристик водного и теплового режимов производились в узлах регулярной вычислительной сетки с шагом 3x3 пиксела радиометра AVHRR (при размере пиксела в 1' по широте и 1.5' по долготе). Ассимиляция в модели спутниковых оценок осадков, ТПП, LAI и B осуществлялась путем их ввода в модель на каждом временном шаге во всех узлах вычислительной сетки вместо значений, определенных по данным наземных наблюдений [8, 9]. Работоспособность процедур таких замен подтверждалась результатами сравнения рассчитанных по модели и измеренных значений W и E_v в течение сезона вегетации, расхождения между которыми находились в

допустимых пределах. Данное заключение подкреплено результатами анализа вертикальных профилей температур и влажности почвы, выявившего ряд особенностей динамики запасов почвенной влаги в течение сезона вегетации, характерных для исследуемого засушливого района. Рассчитанные по модели для каждого суток влагозапасы W , суммарное испарение E_v и другие характеристики водного режима, являющиеся конечными продуктами моделирования, представляются в виде полей их значений для всей исследуемой территории, что может быть использовано для оценки ее водообеспеченности.

В работе также показана возможность использования при моделировании оценок влажности поверхности почвы (ВПП), получаемых по данным измерений скаттерометра ASCAT/MetOp-B в СВЧ диапазоне независимо от погодных условий. Проверка корректности таких оценок для исследуемой территории за сезоны вегетации 2016–2017 гг. производилась путем их сравнения с результатами моделирования ВПП при использовании данных наземных наблюдений, при задании начального профиля влажности почвы с привлечением данных ASCAT, при расчетах испарения с поверхности почвы с использованием данных ASCAT на каждом временном шаге. Отметим, что полученные оценки испарения могут использоваться для формирования верхнего граничного условия для уравнения вертикального влагопереноса в почве. Сравнение полей ВПП, построенных по данным ASCAT и по результатам расчетов по модели при разных начальных условиях, показало, что для большей части территории различия спутниковых и модельных оценок ВПП находились в допустимых пределах. Сравнение полей влагозапасов W для этой территории, построенных по результатам модельных расчетов, также продемонстрировало, что использование данных ASCAT для задания начального профиля влажности почвы при таких расчетах повышает точность оценки величин W . Анализ временных ходов за сезон вегетации величин W , рассчитанных при разных начальных условиях с использованием оценок ВПП по данным ASCAT, позволил выявить ряд особенностей формирования влагозапасов в исследуемом засушливом районе.

1. Волкова Е.В., Успенский А.Б. Оценки параметров облачного покрова по данным геостационарного МИСЗ Meteosat-9 круглосуточно в автоматическом режиме // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2010. Т. 7, № 3. С. 16–22.
2. Волкова Е.В. Оценки параметров облачного покрова, осадков и опасных явлений погоды по данным радиометра AVHRR с МИСЗ серии NOAA круглосуточно в автоматическом режиме // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2013. Т. 10, № 3. С. 66–74.
3. Волкова Е.В. Определение сумм осадков по данным радиометров SEVIRI/Meteosat-9, -10 и AVHRR/NOAA для Европейской территории России // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2014. Т. 11, № 4. С. 163–177.
4. Волкова Е.В., Успенский А.Б., Кухарский А.В. Специализированный программный комплекс получения и валидации спутниковых оценок параметров облачности и осадков // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12, № 3. С. 7–26.
5. Волкова Е.В. Оценки параметров облачного покрова и осадков по данным радиометра МСУ-МР с полярно-орбитального метеоспутника “Метеор-М” №2 для Европейской территории России // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14, № 5. С. 300–320.
6. Волкова Е.В., Успенский С.А. Дистанционное определение температуры подстилающей поверхности, приземной температуры воздуха и эффективной температуры по спутниковым данным для юга ЕТР // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13, № 5. С. 291–303.
7. LSA SAF. Product User Manual. Land Surface Temperature (LST). SAF/LAND/IM/PUM_LST/2.5, Issue 2.5, 24/09/2010, 49 p.
8. Музылев Е.Л., Старцева З.П., Успенский А.Б. и др. Использование данных дистанционного зондирования при моделировании водного и теплового режимов сельских территорий // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14, № 6. С. 108–136.
9. Muzylev E.L., Startseva Z.P., Uspensky A.B., Volkova E.V. Modeling Water and Heat Balance Components for Large Agricultural Region Utilizing Information from Meteorological Satellites // Water Resources. 2018. Vol. 45, No 5. P. 672–684.

Utilization of remote sensing data on land surface and meteorological characteristics to assess water exchange components in arid areas

Z.P. Startseva¹ (starzoya@yandex.ru), E.L. Muzylev¹ (muzylev@iwp.ru),
E.V. Volkova² (quantocosa@bk.ru), E.V. Vasilenko²

¹Water Problem Institute RAS, 3 Gubkina str., 119333 Moscow, Russia

²State Research Center of Space Hydrometeorology "Planeta", 7 B. Predtechensky, 123242 Moscow, Russia

The demand for reliable estimates of the water availability of arid agricultural areas is quite high, since with a small amount of rainfall and no irrigation the farming in such areas is unproductive, if it is possible at all. At present one of the most effective methods for obtaining such estimates is to carry out calculations of soil water content W , evapotranspiration E_v , and other characteristics of the water regime of these territories using physical-mathematical models of their water and heat exchange with the atmosphere LSM (Land Surface Model) adapted to remote sensing data from satellites that contain information on land surface and meteorological conditions.

In frame of such approach, the paper describes the possibility of using estimates of vegetation index NDVI, leaf area index LAI, vegetation cover fraction B , precipitation, land skin temperature T_{sg} , air temperature near the vegetation cover T_a (taken as its temperature), effective land surface temperature (LST) $T_{s,eff}$ (weighted sum of T_{sg} and T_a) retrieved by thematic processing the measurement data of scanning radiometers AVHRR/NOAA, MSU-MR/Meteor-M No. 2 and SEVIRI/Meteosat-10, -11, -8 in the LSM to calculate the water regime of characteristics mentioned above. The case study has been carried out for the left-bank part of the Saratov and Volgograd regions of about 66600 km² located in the dry steppe zone for vegetation seasons of 2016–2017.

Estimates of daily, decade, and monthly precipitation have been produced using Multi Threshold Method (MTM) intended for detecting cloudiness and identifying its types, as well as allocating precipitation zones and determining their maximum intensity within pixel [1–5]. This technique has been adapted to the arid area under study. The basis of the method is the transition from estimating the intensity of precipitation to estimating their daily amounts. These sums are calculated using regression equations, where the predictors are measurement data from 5 AVHRR channels, 11 SEVIRI channels and 3 MSU-MR channels, as well as their differences. Reliability of precipitation estimates from all sensor data has been confirmed through comparing their calculated daily, decade and monthly amounts between themselves and with similar amounts determined from observations at agricultural meteorological stations. The coincidence of precipitation zones detected from satellite data and determined from ground-based observations occurred for each radiometer in approximately 80% of cases.

AVHRR-, MSU-MR- and SEVIRI-derived estimates of T_{sg} , T_a and $T_{s,eff}$ have been built using computational algorithm developed on the basis of MTM [6] and debugged on the data of these sensors for the Central Black Earth Region (CBER). The values of T_{sg} and T_a for cloudless pixels have been retrieved using the Generalized Split-Window method [7] basing on regression equations from satellite-measured radiation temperature in channels 11 and 12 μm (T11, T12). The correctness of the obtained satellite estimates of LST for the vegetation seasons 2016–2017 has been confirmed by comparing their values with each other, with the air temperatures measured at the agricultural meteorological stations of the area under study and, indirectly, attracting the results of W and E_v model calculations using ground-based and satellite temperature data. For the overwhelming majority of satellite-derived and modeled LST estimates their differences did not exceed the RMS error of AVHRR-derived T_{sg} , T_a and $T_{s,eff}$ estimates for CBER, taken as reference.

The NDVI values have been calculated using standard formulas, the B and LAI estimates have been built using empirical dependencies on NDVI for several types of land use inherent to the study area. All presented satellite-based estimates, as well as model calculations of W , E_v and other characteristics of the water and thermal regimes, have been produced at the nodes of the regular computational grid in increments 3x3 pixel of the AVHRR radiometer (with a pixel size of 1' in latitude and 1.5' in longitude). Assimilation of satellite-derived estimates of precipitation, LST, LAI and B into the model has been carried out by entering them into the model at each time step in all

nodes of the computational grid instead of the values determined from ground-based observations [8, 9]. The efficiency of such replacement procedures has been confirmed by comparing the calculated and measured values of W and E_v , the differences between which during vegetation season have been within acceptable limits. This conclusion is supported by the results of the analysis of soil moisture and temperature distributions in depth which revealed a number of features of soil water content dynamics during vegetation season, characteristic for the arid area under study. The modeled daily soil water content W , evapotranspiration E_v and other water regime characteristics being the final products of the simulation, are presented as fields of their values for the entire study area. It can be used to estimate water availability of this territory.

In the paper it is also shown the possibility to use estimates of soil surface moisture (SSM), obtained from measurements of the scatterometer ASCAT/MetOp-B in the microwave range when modeling, regardless of weather conditions. Correctness of such estimates over vegetation seasons 2016–2017 for the study area has been verified through comparing with the SSM simulated using ground-based observations, presetting the initial soil moisture profile using ASCAT data, when calculating soil surface evaporation using ASCAT data at each time step. Note that obtained estimates of evaporation can be used to form the upper boundary condition for the vertical soil water transfer equation. Comparison of the SSM fields ASCAT-derived and resulted from model calculations under different initial conditions showed that for most of the territory the differences between satellite and model SSM estimates were within acceptable limits. Comparing the fields of soil water content W for this area built from the results of model calculations has also demonstrated that using ASCAT data to preset the initial soil moisture profile improves the accuracy of estimating W . The analysis of time behavior of W values during vegetation season calculated under different initial conditions using ASCAT-derived SSM estimates allowed to reveal a number of features of forming soil water content in the arid area under study.

1. Volkova E.V., Uspenskii A.B. Estimation of cloud cover parameters from METEOSAT-9 geostationary meteorological satellite data for day and night time. // Modern problems of remote sensing of the Earth from space. 2010. Vol. 7, No. 3. P. 6–22.
2. Volkova E.V. Automatic estimation of cloud cover and precipitation parameters obtained by AVHRR NOAA for day and night conditions. // Modern problems of remote sensing of the Earth from space. 2013. Vol. 10, No. 3. P. 66–74.
3. Volkova E.V. Estimation of precipitation amount using SEVIRI/Meteosat-9,-10 and AVHRR/NOAA data for the European territory of Russia // Modern problems of remote sensing of the Earth from space. 2014. Vol. 11, No. 4. P. 163–177.
4. Volkova E.V., Uspensky A.B., Kukharsky A.V. Specialized complex of programs for retrieving and validating satellite estimates of cloud and precipitation // Modern problems of remote sensing of the Earth from space. 2015. Vol. 12, No. 3. P. 7–26.
5. Volkova E.V. Detection and assessment of cloud cover and precipitation parameters using data from MSU-MR radiometer of the polar-orbiting Meteor-M No. 2 for the European territory of Russia // Modern problems of remote sensing of the Earth from space. 2017. Vol. 14, No. 5. P. 300–320.
6. Volkova E.V., Uspenskii S.A. Land surface, land air and effective temperature estimation for territories of Southern European Russia based on satellite data. // Modern problems of remote sensing of the Earth from space. 2016. Vol. 13, No. 5. P. 291–303.
7. LSA SAF. Product User Manual. Land Surface Temperature (LST). SAF/LAND/IM/PUM_LST/2.5, Issue 2.5, 24/09/2010, 49 p.
8. Muzylev E.L., Startseva Z.P., Uspenskij A.B. et al. Using remote sensing data to model water and heat regimes of rural territories // Modern problems of remote sensing of the Earth from space. 2017. Vol. 14, No. 6. P. 108–136.
9. Muzylev E.L., Startseva Z.P., Uspensky A.B., Volkova E.V. Modeling Water and Heat Balance Components for Large Agricultural Region Utilizing Information from Meteorological Satellites // Water Resources. 2018. Vol. 45. No 5. P. 672–684.

Радиационное поле Земли и сопряженные задачи экологии, климата, эволюции, глобального мониторинга и дистанционного зондирования Земли, гиперспектральный подход и нанодиагностика природных сред

Сушкевич Т.А.¹ (tamaras@keldysh.ru), Стрелков С.А.¹, Максакова С.В.¹, Фомин Б.А.², Белов В.В.^{3,4}, Козодеров В.В.⁵, Пригарин С.М.⁶, Кузьмичев А.С.², Николенко А.А.², Страхов П.В.², Шурыгин Б.М.², Фалалеева В.А.⁷, Краснокутская Л.Д.⁷, Зимовая А.В.³, Колокутин Г.Э.⁸

¹Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, Миусская пл. 4, 125047 Москва, Россия

²Московский физико-технический институт, Институтский пер. 9, 141701 Моск. обл. Долгопрудный, Россия

³Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, пл. Ак. Зуева 1, 634055 Томск, Россия

⁴Национальный исследовательский Томский государственный университет, пр. Ленина 36, 634050 Томск, Россия

⁵Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, ГСП-2 Ленинские горы, 119992 Москва, Россия

⁶Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, пр. Ак. Лаврентьева 6, 630090 Новосибирск, Россия

⁷Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Пыжевский пер. 3, 119017 Москва, Россия

⁸Центральная Аэрологическая Обсерватория, ул. Первомайская 3, 141700 Долгопрудный Моск. обл., Россия

Глобальный вызов "Повестки XXI-го века" – это не имеющая аналогов по масштабам в истории цивилизации всемирная научная ПРОГРАММА "Будущее Земли" (Future Earth) [1], созданная в 2015 году для координации международных исследований по устойчивому развитию окружающей среды и общества по совместной инициативе Международного совета по науке (ICSU) и Международного научного совета по общественным наукам (ISSC) при поддержке ЮНЕСКО, Программы Объединенных Наций по окружающей среде (ЮНЕП), Международного университета ООН и Международной метеорологической организации (WMO). В 2018 году к ПРОГРАММЕ присоединилась Россия в лице Российской академии наук [2].

Фундаментальные основы для реализации ПРОГРАММЫ заложены в XX-м веке благодаря изобретению компьютера и выхода человека в космос, которые связаны с именем математика-легенды М.В. Келдыша (10.02.1911–24.06.1968). 65 лет назад 14.02.1954 в кабинете М.В. Келдыша состоялось совещание [3, 4], на котором ВПЕРВЫЕ обсуждался вопрос о возможности создания и запуска в космическое пространство ПЕРВОГО искусственного спутника Земли. В совещании участвовали ученики М.В. Келдыша Т.М. Энеев и Д.Е. Охоцимский, а также С.П. Королев, П.Л. Капица, И.А. Кибель, М.К. Тихонравов, А.Ю. Ишлинский, С.Н. Вернов и другие – те ученые, конструкторы и инженеры, кто был непосредственно связан с созданием космической техники, и те, кто мог высказать предложения по научным исследованиям, которые нужно было бы проводить со спутников. О программе космических исследований заговорили в 1955 году. Для убеждения руководителей СССР Главный Теоретик Космонавтики М.В.Келдыш выделил **две главные задачи: разведка и наблюдения Земли**, вокруг которых сформировались многие научно-исследовательские проекты, определилась новая (космическая) отрасль человеческой деятельности и появилось новое научное направление REMOTE SENSING.

В 2019 году исполняется 130 лет уравниению переноса излучения, ВПЕРВЫЕ сформулированного профессором О.Д. Хвольсоном [5], 60 лет стажа работы Т.А. Сушкевич в области теории переноса излучения, начавшейся в 1959 году на кафедре математики (зав. кафедрой академик А.Н. Тихонов) на физическом факультете МГУ под руководством Е.С. Кузнецова с изучения монографии Чандрасекара [6], 55 лет выхода первой статьи по теории переноса излучения [7], а в монографии [8] содержится список около 400 научных публикаций.

С позиции опыта речь идет о «радиационных» задачах ПРОГРАММЫ. Сложнейшие проблемы эволюции, климата, экологии, глобального мониторинга и дистанционного зондирования Земли с гиперспектральными подходами [9, 10] предлагается рассматривать как сопряженные. Радиационное поле Земли – единое физическое поле (электромагнитное излучение) и объединяющий фактор динамической системы Земля.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проектов 18-01-00609, 17-01-00220).

1. Future Earth. Global Research Projects. <http://futureearth.org>.
2. Постановление Президиума РАН № 103 от 29.05.2018 О создании Комитета РАН по международной программе "Будущее Земли".
3. Прикладная небесная механика и управление движением // Труды ИПМ им. М.В. Келдыша РАН. М.: ИПМ им. М.В. Келдыша, 2010. 368 с.
4. Сушкевич Т.А., Стрелков С.А., Максакова С.В. 60 лет от первого совещания по ИСЗ до современных систем дистанционного зондирования и мониторинга Земли из космоса: информационно-математический аспект (история и перспективы) // Оптика атмосферы и океана. 2014. Т. 27, №7. С. 21–27.
5. Иванов В.В. Столетие интегрального уравнения переноса излучения // Труды астрономической обсерватории. Т. XLIV. Ученые записки Санкт-Петербургского Университета № 428. Серия математических наук. Вып. 66. СПб.: Изд-во СПбГУ, 1994. 254 с.
6. Сушкевич Т.А. Нобелевский лауреат С. Чандрасекар: к 65-летию первой монографии по переносу лучистой энергии // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. 2018. № 228. 32 с.
7. Масленников М.В., Сушкевич Т.А. Асимптотические свойства решения характеристического уравнения теории переноса излучения в сильно поглощающих средах // ЖВМ и МФ. 1964. Т. 4, № 1. С. 23–34.
8. Сушкевич Т.А. Математические модели переноса излучения. Москва: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2005. 661 с.
9. Gordon I.E., Rothman L.S., Hill C. et al. The HITRAN-2016 molecular spectroscopic database // J. Quant. Spectr. Rad. Transfer. 2017. V. 203. P. 3–69.
10. Фомин Б.А., Колокутин Г.Э. Новая спектроскопическая база HITRAN-2016 в полинейных моделях, применяемых в дистанционном зондировании Земли методами инфракрасной спектроскопии // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16, № 1. С. 17–24.

Earth radiation field and conjugated problems of ecology, climate, evolution, global monitoring and remote sensing of the Earth, hyperspectral approach and nanodiagnostics of natural environments

T.A. Sushkevich¹ (tamaras@keldysh.ru), S.A. Strelkov¹, S.V. Maksakova¹, B.A. Fomin², V.V. Belov^{3,4}, V.V. Kozoderov⁵, S.M. Prigarin⁶, A.S. Kuzmichev², A.A. Nikolenko², P.V. Strakhov², B.M. Shurygin², V.A. Falaleeva⁷, L.D. Krasnokutskaya⁷, A.V. Zimovaya³, G.E. Kolokutin⁸

¹M.V. Keldysh Institute of Applied Mathematics RAS, 4 Miusskaya sq., 125047 Moscow, Russia

²Moscow Institute of Physics and Technology (State University), 1 Klimentovskiy per., 115184 Moscow, Russia

³V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics SB RAS, 1 Ac. Zuev sq., 634055 Tomsk, Russia

⁴Tomsk State University, 36 Lenin ave., 634050 Tomsk, Russia

⁵M.V. Lomonosov Moscow State University, Physical Faculty, 1 Leninsky gory, 119992 Moscow, Russia

⁶Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS, 6 Lavrentyeva pr., 630090 Novosibirsk, Russia

⁷A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics RAS, 3 Pyzhevsky pr., 119017 Moscow, Russia

⁸Central Aerological Observatory, 3 Pervomayskaya str., 141700 Dolgoprudny Moscow reg., Russia

Global Challenge «Agenda of the 21st Century» is unparalleled in scale in the history of civilization the world-wide scientific PROGRAM «Future Earth» [1] created in 2015 to coordinate international research on the sustainable development of the environment and society on the joint initiative of the International Council of Science (ICSU) and the International Scientific Council for Social Sciences (ISSC) with the support of UNESCO, the United Nations Environment Program (UNEP), the International University of the United Nations and the International Meteorological Organization (WMO). In 2018, Russia, represented by the Russian Academy of Sciences, joined the PROGRAM [2].

The fundamental basis for the implementation of the PROGRAM was laid in the XX-th century thanks to the invention of a computer and a man's exit into space, which are associated with the name of the mathematician-legend M.V.Keldysh (10.02.1911–24.06.1968). 65 years ago, on February 14, 1954, a meeting was held in the office of M.V.Keldysh [3, 4], where the FIRST artificial SPUTNIK of the Earth was discussed for the first time. The meeting was attended by T.M. Eneev and D.E. Ohotsymsky – students of M.V.Keldysh, as well as S.P. Korolev, P.L. Kapitsa, I.A. Kibel, M.K. Tikhonravov, A.Yu. Ishlinsky, S.N. Vernov and others – those scientists, designers and engineers who were directly involved in the creation of space technology, and those who could make research proposals that would have to be carried out from satellites. The space research program began in 1955. To convince the leaders of the USSR, the Chief Theorist of Cosmonautics, M.V. Keldysh, identified two main tasks: intelligence and Earth observation, around which many research projects were formed, identified a new (space) branch of human activity and the new scientific direction REMOTE SENSING appeared.

2019th year marks the 130th anniversary of the radiation transfer equation, FOR THE FIRST TIME formulated by Professor O.D. Chwolson [5], 60 years of T.A. Sushkevich experience in radiation transfer theory, which began in 1959 at the department of mathematics (head of the department is Academician A.N. Tikhonov) at the Faculty of Physics of Moscow State University under the guidance of E.S. Kuznetsov from studying the monograph by Chandrasekhar [6], 55 years of the first article on radiation transfer theory [7], and monograph [8] contains a list of about 400 scientific publications.

From the perspective of experience, we are talking about the “radiation” problems of the PROGRAM. The most complex problems of evolution, climate, ecology, global monitoring and remote sensing of the Earth with hyperspectral approaches [9, 10] are proposed to be considered as conjugate. The Earth radiation field is a single physical field (electromagnetic radiation) and the unifying factor of the Earth dynamic system.

The reported study was funded partially by RFBR according to the research projects 18-01-00609, 17-01-00220.

1. Future Earth. Global Research Projects. <http://futureearth.org>.
2. Resolution of the Presidium of the Russian Academy of Sciences No. 103 dated 05.29.2018 On the creation of the RAS Committee on the international program «Future Earth».
3. Applied celestial mechanics and motion control // Proceedings of KIAM RAS. M.: Keldysh Institute of Applied Mathematics, 2010. 368 p.
4. Sushkevich T.A., Strelkov S.A., Maksakova S.V. 60 years from the first meeting on the satellite to modern systems of remote sensing and monitoring of the Earth from space: information and mathematical aspect (history and prospects) // Atmospheric and Oceanic Optics. 2014. T. 27, No. 7. P. 21–27.
5. Ivanov V.V. A Century of the Integral Radiation Transfer Equation // Proceedings of the Astronomical Observatory. V. XLIV. Scientific notes of St. Petersburg University No. 428. Series of Mathematical Sciences. Issue 66. SPb.: Publ. house of SPbSU, 1994. 254 p.
6. Sushkevich T.A. Nobel laureate S. Chandrasekhar: to the 65th anniversary of the first monograph on the transfer of radiant energy // Preprint KIAM RAS. 2018. N 2288. 32 p.
7. Maslennikov M.V., Sushkevich T.A. Asymptotic properties of the solution of the characteristic equation of the radiation transfer theory in strongly absorbing media // J. Comp. Math. Math. Physics. 1964. V. 4, N 1. P. 23–34.
8. Sushkevich T.A. Mathematical models of radiation transfer. M.: BINOM. Laboratory of Knowledge. 2005. 661 p.
9. Gordon I.E., Rothman L.S., Hill C. et al. The HITRAN-2016 molecular spectroscopic database // J. Quant. Spect. Rad. Transfer. 2017. V. 203. P. 3–69.
10. Fomin B.A., Kolokutin G.E. A new spectroscopic base HITRAN-2016 in linear models used in remote sensing of the Earth by infrared spectrometry // Modern problems of remote sensing of the Earth from space. 2019. V. 16. N 1. P. 17–24.

Двухпараметрическая статистическая модель текстуры изображений и физических параметров различных типов облачности по данным дистанционного зондирования

Астафуров В.Г.^{1,2} (astafurov@iao.ru), Курьянович К.В.^{1,2}, Скороходов А.В.¹

¹Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, пл. Ак. Зуева 1, 634055 Томск, Россия

²Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, пр. Ленина 40, 634050 Томск, Россия

Данные дистанционного зондирования Земли из космоса используются в качестве основного источника информации о глобальном состоянии атмосферы и подстилающей поверхности в реальном масштабе времени для решения задач в области метеорологии и климатологии, одной из которых является исследование облачного покрова. При этом структура глобального поля облачности является неоднородной. Согласно метеорологическому стандарту облака классифицируются на 27 разновидностей, включая основные формы облачности, их подтипы и некоторые сочетания, на основе их морфологического описания, приведенного в Атласе облаков [1].

В докладе рассматривается статистическая модель текстуры изображений и физических параметров различных типов облачности. В работе используются спутниковые снимки MODIS с пространственным разрешением 250 м, полученные в видимой области спектра (0.62–0.67 мкм) в дневное время при отсутствии снежного покрова, и тематические продукты MOD06_I2 и MYD06_I2 с пространственным разрешением 1000 м, содержащие значения восстановленных физических параметров облачности, а также файлы с географической привязкой. Для описания текстуры изображений облачности применяются статистические методы Gray-Level Co-occurrence Matrix (GLCM), Gray-Level Difference Vector (GLDV), Sum And Difference Histogram (SADH) и One-Dimensional Signal Histogram (ODSH) [2], основанные на анализе пространственной взаимозависимости яркостей соседних пикселей.

Обсуждается методика формирования наборов эталонных изображений различных типов однослойной облачности путем сопоставления данных MODIS и наземных метеостанций. Текстурные признаки для каждого типа облачности рассчитывались по наборам из 200 фрагментов спутниковых снимков размером 21 x 215; 21 пиксель для каждой разновидности облаков. Для каждого признака формируется гистограмма его значений, находится эмпирическая функция распределения, для которой с помощью критерия согласия Колмогорова-Смирнова подбираются распределения вероятностей и оценки значений их параметров. Обосновано использование двухпараметрических распределений, таких как Вейбулла, гамма, Коши, логнормальное, нормальное, Гумбеля и ряд других.

Построенные статистические модели текстуры изображений различных типов облачности используются в качестве функций принадлежности в нейро-нечетком классификаторе [3], что позволяет существенно упростить процедуру обучения нейронных сетей.

1. Беспалов Д.П., Девяткин А.М., Довгалюк Ю.А. и др. Атлас облаков. СПб.: Д'АРТ. 2011. 248 с.
2. Астафуров В.Г., Курьянович К.В., Скороходов А.В. Статистическая модель текстуры изображений облачного покрова по спутниковым данным // Метеорология и гидрология, 2017. № 4. С. 53–66.
3. Астафуров В.Г., Курьянович К.В., Скороходов А.В. Методы автоматической классификации облачности по спутниковым снимкам MODIS // Исследование Земли из космоса. 2016. № 3. С. 1–11.

Two-parameter statistical model of image texture and physical parameters of different cloud types according to remote sensing data

V.G. Astafurov^{1,2} (astafurov@iao.ru), K.V. Kuriyanovich^{1,2}, A.V. Skorokhodov¹

¹V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics SB RAS, 1 Ac. Zuev sq., 634055 Tomsk, Russia

²Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, 40 Lenina pr., 634050 Tomsk, Russia

Data of remote sensing of Earth from space are used as the main source of information on the global state of the atmosphere and underlying surface on a real timescale for solving problems in

the field of meteorology and climatology, one of which is the cloud cover study. It is noteworthy that the structure of the global cloud field is inhomogeneous. Based on the meteorological standard, clouds are classified into 27 varieties, including the main forms of clouds, their subtypes, and certain combinations, on the basis of their morphologic description, presented in cloud Atlas [1].

In this report, we consider a statistical model of texture features and physical parameters of different cloud types. In this work we use the MODIS satellite images with the spatial resolution of 250 m, obtained in the visible wavelength range (0.62–0.67 μm) at daytime in the absence of snow cover, and MOD06_I2 and MYD06_I2 thematic products with the spatial resolution of 1000 m, containing the retrieved physical parameters of clouds, as well as the files with the geographic referencing. The texture of cloud images is described using the statistical methods Gray-Level Co-occurrence Matrix (GLCM), Gray-Level Difference Vector (GLDV), Sum And Difference Histogram (SADH), and One-Dimensional Signal Histogram (ODSH) [2], which are based on analysis of the spatial interrelation between the brightnesses of neighboring pixels.

We discuss a method of how the sets of reference images of different one-layer cloud types can be formed by comparing the data from MODIS and ground-based meteorological stations. The texture features for each cloud type were calculated using created sets of 200 fragments of satellite images 21 x 215; 21 pixels in size. For each feature, we created a histogram of its values, determined an empirical distribution function, for which probability distributions and estimates of their parameters are selected using Kolmogorov-Smirnov goodness criterion. The use of two-parameter distributions, such as Weibull, gamma, Cauchy, lognormal, normal, Gumbel, and some other distributions is substantiated.

The constructed statistical models of image texture of different cloud types are used as the membership functions in neuro-fuzzy classifier [3], making it possible to eliminate the learning procedure in neural network.

1. Bepalov D.P., Devyatkin A.M., Dovganyuk Yu.A. et al. Cloud atlas. Saint Petersburg, D'ART. 2011. 248 pp.
2. Astafurov V.G., Kuriyanovich K.V., Skorokhodov A.V. A statistical model for describing the texture of cloud cover images from satellite data // Rus. Met. Hydr. 2017. No. 4. P. 248–257.
3. Astafurov V.G., Kuriyanovich K.V., Skorokhodov A.V. Methods for automatic cloud classification from MODIS satellite images// Issled. Zemli iz Kosmosa. 2016. No. 3. P. 1–11 (in Russian).

Проявление тонкой структуры распределения двуокиси азота антропогенного происхождения в нижней тропосфере в высокодетальной съемке космического аппарата Ресурс П

Постыляков О.В.¹ (oleg.postylyakov@gmail.com), Боровский А.Н.¹, Еланский Н.Ф.¹,
Давыдова М.А.², Захарова С.А.², Мухартова Ю.В.², Макаренков А.А.³

¹Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Пыжевский пер. 3, 119017 Москва, Россия

²Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Ленинские горы 1, 119234 Москва, Россия

³Рязанский государственный радиотехнический университет, ул. Гагарина 59/1, 390005 Рязань, Россия

Серия российских спутников "Ресурс-П" работает на солнечно-синхронной орбите Земли с 2013 года. В 2019–2021 гг. ожидается запуск еще двух спутников "Ресурс-П". На борту спутников серии устанавливается гиперспектральная аппаратура ГСА, которая проводит измерения в 230 спектральных каналах от 400 нм до 1000 нм. ГСА выполняет съемку маршрута шириной 30 км и длиной несколько сотен км с пространственным разрешением от 30 до 120 м. Основная цель аппаратуры – исследование природных ресурсов Земли.

Исследовательской группой авторов доклада разработан алгоритм, использующий данные ГСА/"Ресурс-П" для определения содержания NO_2 в нижней тропосфере на сетке с шагом 120 м. Поскольку спектральное разрешение ГСА/"Ресурс-П" хуже, чем разрешение инструментов, изначально разработанных для измерения содержания NO_2 (OMI, TROPOMI), ошибки восстановления содержания NO_2 по индивидуальному измерению ГСА/"Ресурс-П"

(с разрешением 120 м) больше, чем у этой специализированной аппаратуры. Но погрешность определения интегрального содержания NO_2 становится сравнимой с погрешностью, полученной другими спутниковыми приборами, когда разрешение ГСА/"Ресурс-П" составляет около 2x2 км, в то время как самый современный прибор для измерения NO_2 , TROPOMI, имеет разрешение 3.5x7 км (в настоящее время 7x7 км). Получение данных по NO_2 на сетке с шагом 120 м предоставляет дополнительные возможности для обнаружения локальных выбросов NO_2 и оценки их мощности.

Впервые высокое пространственное разрешение нового метода позволяет выявить локальные источники загрязнения и их шлейфы. Из-за отсутствия каких-либо экспериментальных данных, сопоставимых по высокой разрешающей способности с нашими полями NO_2 , для проверки высокодетальных структур, обнаруженных в полях NO_2 ГСА/"Ресурс-П", мы разрабатываем методы, основанные на сопоставлениях с данными химически-транспортного моделирования. Решение задачи достигается на основе разработки и использования методов асимптотического анализа многомерных сингулярно возмущенных задач для нелинейного уравнения тепломассопереноса, а также использования эффективных численных методов решения задач для нелинейного уравнения тепломассопереноса. В статье представлены первые результаты сравнения измерений, выполненных в 2016 году над провинцией Хэбэй Китая, которая является одним из наиболее загрязненных NO_2 регионов в мире.

Исследование проводилось при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований в рамках исследовательских проектов 18-29-10080 и 18-35-00682.

Manifestation of fine structure of the distribution of nitrogen dioxide of anthropogenic origin in the lower troposphere in the highly-detailed survey of Resurs-P satellite

O.V. Postylyakov¹ (oleg.postylyakov@gmail.com), A.N. Borovski¹, N.F. Elansky¹,

M.A. Davydova², Iu.V. Mukhartova², S.A. Zakharova², A.A. Makarenkov³

¹A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics RAS, 3 Pyzhevsky per., 119017 Moscow, Russia

²M.V. Lomonosov Moscow State University, 1 Leninsky gory, 119234 Moscow, Russia

³Ryazan State Radio Engineering University, 59/1 Gagarina str, 390005 Ryazan, Russia

A series of Russian satellite Resurs-P operate since 2013 in sun-synchronous orbit. Two more Resurs-P satellites are expected to launch in 2019–2021. A hyperspectral imager GSA is mounted on its board, which resolves more than 230 spectral bands from 400 nm to 1000 nm. It takes image of area of 30-km width and of several hundred km length with spatial resolution from 30 to 120 m. The main goal of the instrument is natural resource investigation.

We developed an algorithm which use GSA/Resurs-P data for determining the content of NO_2 in the lower troposphere on a grid with a step of 120 m. Because the spectral resolution of GSA/Resurs-P is worse than the resolution of instruments developed for measurement NO_2 content (OMI, TROPOMI), the NO_2 retrieval error of GSA/Resurs-P measurement is bigger. But NO_2 retrieval error become comparable to ones obtained by other satellite instruments, when resolution of GSA/Resurs-P is about 2 km, while the most modern instrument for NO_2 measurement, TROPOMI, has a resolution of 3.5x7 km (currently 7x7 km). NO_2 on the grid with the 120 m step provide additional opportunities for detection of NO_2 local emissions and estimation their power.

For the first time, the high spatial resolution of the new method makes it possible to identify local sources of pollution and their plumes. Because of the absence of any experimental data comparable in resolution with our NO_2 fields, for the validation of highly detailed structures detected in the NO_2 fields of GSA/Resurs-P, we develop methods based on comparisons with chemical transport simulation data. The solution of the problem is achieved on the basis of the development and use of the methods of asymptotic analysis of multidimensional singularly perturbed problems for the nonlinear heat and mass transfer equation, as well as the use of effective numerical methods for solving problems for the nonlinear heat and mass transfer equation. The

paper presents the first results of the comparison for measurements performed in 2016 over Hebei province of China which is one of the most NO₂ polluted regions in the world.

The study was carried out with the financial support of the Russian Foundation for Basic Research in the framework of research projects 18-29-10080 and 18-35-00682.

Климатология мезомасштабных конвективных систем, полученная по спутниковым данным с применением сверточных нейронных сетей: первые результаты

Чернокульский А.В.¹ (a.chernokulsky@ifaran.ru), Криницкий М.А.¹, Спрыгин А.А.¹,
Ерошкина Н.А.¹, Курганский М.В.¹, Шихов А.Н.²

¹Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Пыжевский пер. 3, 119017 Москва, Россия

²Пермский государственный университет, ул. Букирева 15, 614990 Пермь, Россия

С мезомасштабными конвективными системами (МКС) связаны такие опасные погодные явления, как сильные ливни, смерч, шквалы, град. В России за последние 10 лет МКС и сопутствующие им опасные погодные явления конвективного характера привели к экономическим потерям в несколько десятков миллиардов рублей и гибели более 200 человек. В то же время, климатология МКС в российских регионах недостаточно изучена.

В данной работе представлены первые результаты проекта, направленного на получение знаний о пространственно-временной структуре МКС в России с применением методов машинного обучения на спутниковых данных. На первом этапе мы сконцентрировались на осесимметричных МКС, в первую очередь, на мезомасштабных конвективных комплексах (МКК) и суперячейках (СЯ) на европейской территории России, на юге Урала и Западной Сибири. Собрана информация о нескольких десятках известных случаев МКК и СЯ за 2012–2018 годы, проведена её валидация на основе данных радиолокационного зондирования. На основе 15-минутных спутниковых данных Meteosat создана выборка спутниковых изображений в различных спектральных каналах, содержащих различные характерные сигнатуры облачного поля МКС (например, пробои тропопаузы, холодные U/V и кольцевые сигнатуры).

Для дальнейшей автоматизации инвентаризации случаев МКК и СЯ с целью получения климатологических оценок, была подготовлена модель сверточной нейронной сети, которая была обучена на основе собранного набора данных. Ранее данная модель была апробирована при обработке полярных мезоциклонов в Южном океане. Первые результаты полученной климатологии осесимметричных МКК с использованием спутниковых данных в модели со сверточной нейронной сетью представлены в данной работе.

Работа выполнена при поддержке гранта РФ (18-77-10076).

Climatology of mesoscale convective systems in Russia obtained with convolutional neural networks using satellite data: first results

A.V. Chernokulsky¹ (a.chernokulsky@ifaran.ru), M.A. Krinitsky¹, A.A. Sprygin¹,
N.A. Eroshkina¹, M.V. Kurgansky¹, A.N. Shikhov²

¹A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics RAS, 3 Pyzhevsky per, 119017 Moscow, Russia

²Perm State University, 15 Bukireva str., 614990 Perm, Russia

Mesoscale convective systems (MCS) yield hazardous convective weather events such as heavy showers, tornadoes, squalls, hailstorms. In Russia over the past 10 years, passages of MCSs and formation of hazardous convective weather events have led to an economic loss of several tens of billions of rubles and the death of more than 200 people. At the same time, there is a lack of comprehensive climatology of MCSs in Russia.

We present the first results of the project that aimed to obtain the spatiotemporal structure of MCSs in Russia by utilizing satellite data in a model of machine learning. On the first stage, we concentrated on axisymmetrical MCS, primarily on mesoscale convective complexes (MCC) and

supercells (SC) over the European part of Russia, Ural, and West Siberia. We collected several dozens of well-known cases of MCCs and SCs for 2012–2018 years and verified them with radar data. Further, using 15-minutes data from Meteosat, we constructed a dataset with satellite images in various spectral channels for all the cases containing various characteristic signatures of MCS (e.g., overshooting tops, cold-U/V and cold ring signatures).

For automating the data acquisition for MCC and SC climatology, a convolutional neural network (CNN) was trained using this dataset. Previously, CNN showed its skills in obtaining climatology of polar mesocyclones in the Southern Ocean. First results of the obtained climatology of axisymmetrical MCS using convolutional neural networks will be presented in this report.

This study is supported by the Russian Science Foundation (project no. 18-77-10076).

Сопоставление спутниковых и наземных лидарных наблюдений зеркально отражающих слоев перистых облаков

Скороходов А.В. (vazime@yandex.ru), Насонов С.В., Курьянович К.В.

Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, пл. Ак. Зюева 1, 634050 Томск, Россия

Перистые облака являются одной из наиболее часто встречающихся форм облачности. При этом они являются важным климатообразующим фактором. С одной стороны, перистые облака задерживают исходящее длинноволновое излучение, что способствует усилению парникового эффекта. С другой стороны, они рассеивают и ослабляют приходящую солнечную радиацию. Рассматриваемый тип облачности формируется на высотах 8–12 км в средних широтах, а горизонтальная протяженность его полей может достигать нескольких тысяч километров. Перистые облака состоят преимущественно из кристаллических частиц различных размеров и форм. При этом от пространственной ориентации этих кристаллов зависит степень пропускания и рассеяния в атмосфере приходящего из космоса излучения. Дистанционное определение ориентации частиц в облаках возможно с помощью метода лазерного поляризационного зондирования. Кроме этого, в настоящее время интенсивно разрабатывается теория рассеяния света на пространственно-ориентированных кристаллах для интерпретации результатов лидарных измерений. Основным недостатком данного подхода является локальность получаемой информации в пределах местоположения сканирующей аппаратуры. Поэтому в настоящее время предпринимаются попытки по сопоставлению наземных наблюдений с результатами спутниковой съемки с целью выявления ориентации кристаллических частиц в облаках.

В докладе представлены результаты сопоставления наземных лидарных наблюдений перистых облаков над Томском со спутниковой съемкой в период с 2015 по 2018 год. При этом использовались данные стационарного многоволнового поляризационного лидара «ЛОЗА-С», установленного в Институте оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН. Кроме этого, привлекались результаты дистанционного зондирования Земли из космоса сенсором MODIS, сканирующего ее поверхность в 36 спектральных диапазонах. Данный прибор установлен на борту спутников Terra и Aqua, что позволяет покрывать территорию Томской области 2–4 снимками в сутки в дневное время. Рассматриваются две группы перистой облачности, когда преимущественно ориентированные кристаллические частицы расположены в верхней части облака и в нижней. Обсуждаются результаты сопоставления лидарных данных с текстурными признаками облачности и ее физическими характеристиками, восстановленными по спутниковым данным. Выдвигаются предположения относительно использования рассматриваемых параметров облаков в качестве информативных сигнатур для определения пространственной ориентации кристаллов льда в них.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФ (грант № 18-77-10035).

Comparison of satellite and ground-based lidar observations of mirror-reflecting layers of cirrus clouds

A.V. Skorokhodov (vazime@yandex.ru), S.V. Nasonov, K.V. Kuryanovich
V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics SB RAS, 1 Ac. Zuev sq., 634055 Tomsk, Russia

Cirrus clouds are one of the most common forms of cloudiness. On the one hand, cirrus clouds block outgoing long-wave radiation which contributes to the enhancement of the greenhouse effect. On the other hand, they dissipate and attenuate the incoming solar radiation. The considered type of clouds is formed at altitudes of 8–12 km in mid-latitudes, and the horizontal extent of its fields can reach several thousand kilometers. Cirrus clouds consist mainly of crystalline particles of various sizes and shapes. In this case, the degree of transmission and scattering in the atmosphere of radiation coming from space depends on the spatial orientation of these crystals. Remote determination of the particles orientation in clouds is possible using the method of laser polarization sensing. In addition, a theory of light scattering on spatially oriented crystals is being intensively developed to interpret the results of lidar measurements. The main disadvantage of this approach is a locality of the received information within the location of the scanning equipment. Therefore, attempts are now being made to compare ground-based observations with satellite imagery results in order to identify the orientation of crystalline particles in the clouds.

The report presents the results of a comparison of ground-based lidar observations of cirrus clouds over Tomsk with satellite imagery from 2015 to 2018. The data from the stationary multiwave polarization lidar "LOZA-S" installed at the V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics SB RAS were used. In addition, the results of remote sensing of the Earth from space by the MODIS sensor scanning its surface in 36 spectral ranges were used. This sensor is installed onboard the Terra and Aqua satellites which allows covering the territory of the Tomsk region with 2–4 images per day during the daytime. Two groups of cirrus clouds are considered, when predominantly oriented crystalline particles are located in the upper part of clouds and in the lower part. The results of comparing lidar data with the textural signs of cloudiness and its physical characteristics derived from satellite data are discussed. Assumptions are made regarding the use of the considered cloud parameters as informative signatures to determine the spatial orientation of ice crystals in them.

This work was supported by the Russian Science Foundation (grant No. 18-77-10035).

Изменчивость температуры поверхности и характеристик влажности атмосферы в пустыне Такла Макан и в районе обсерватории ZOTTO по данным спутниковых и наземных измерений

Митник Л.М. (mitnik@poi.dvo.ru), Кулешов В.П., Митник М.Л.
Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН, ул. Балтийская 43, 690041
Владивосток, Россия

Температура и состояние земной поверхности (влажность, замерзание/таяние) и характеристики атмосферы (интегральное содержание водяного пара V , температура и влажность воздуха у поверхности, в тропосфере и стратосфере) являются существенными климатическими переменными, связанными со многими гидрологическими, атмосферными и экологическими процессами. Проведение постоянного мониторинга геофизических переменных, особенно в удаленных районах с неблагоприятным климатом, подчеркивает важность и необходимость разработки дистанционных методов оценки параметров из космоса. К таким районам относятся пустыни, занимающие примерно 20% площади Земли, бореальные леса и тундры к северу от 60° с.ш., горы.

В работе рассмотрены результаты восстановления параметров поверхности и атмосферы в двух контрастных зонах: в пустыне Такла Макан и в бореальных лесах вблизи высотной обсерватории ZOTTO на севере Западной Сибири. Исследования выполнены на

основе анализа временных рядов яркостных температур $T_y(f)$ по данным радиометра AMSR2 со спутника GCOM-W1, температуры и влажности воздуха и радиозондирования атмосферы на метеорологических и аэрологических станциях в 2014–2017 гг. $T_y(f)$ были получены на частотах $f = 6.9, 7.3, 18.7, 23.8, 36.5$ и 89.0 ГГц на вертикальной и горизонтальной поляризациях. Дополнительная информация включала измерения микроволновых радиометров GMI со спутника GPM и МТВЗА-ГЯ со спутника "Метеор-М № 2", видимые и ИК изображения со спутников Aqua, Landsat-8 и SNPP, а также изображения РСА со спутников Sentinel-1A/-1B на частоте 5.405 ГГц и ALOS-1/-2 на частоте 1.27 ГГц. Временные ряды, полученные на восходящих и нисходящих витках при положительных и отрицательных температурах и в периоды замерзания и таяния, анализировались отдельно, что позволило учесть суточную и сезонную изменчивость температуры поверхности и температуры воздуха у поверхности. Измеренные значения $T_y(f)$ сравнивались с результатами моделирования яркостных температур для летних и зимних условий при ясном небе и облачности для нескольких значений коэффициентов излучения земной поверхности. В качестве входной информации были использованы профили метеорологических параметров, полученные из радиозондов. Для выбранных районов получены регрессионные соотношения между температурой поверхности и температурой воздуха у поверхности и $T_y(f)$ для ночных и дневных измерений. Особое внимание уделено анализу ситуаций в периоды замерзания/таяния, пылевых бурь и при жидких и твердых осадках. Результаты данного исследования могут быть использованы при оперативной обработке спутниковых микроволновых данных, разработке алгоритмов восстановления геофизических параметров и при внешней калибровке спутниковых микроволновых радиометров.

Работа частично поддержана грантом ДВО РАН 18-I-010.

Variability of land surface temperature and atmospheric humidity characteristics in the Takla Makan desert and in the ZOTTO observatory area from satellite and ground measurements

L.M. Mitnik (mitnik@poi.dvo.ru), V.P. Kuleshov, M.L. Mitnik

V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute FEB RAS, 43 Baltiyskaya str., 690041 Vladivostok, Russia

The temperature and state of the land surface (humidity, freezing/thawing) and atmospheric characteristics (total column-water vapor, air temperature and humidity at the surface, in the troposphere and stratosphere) are significant climatic variables associated with many hydrological, atmospheric and ecological processes. Continuous monitoring of geophysical variables, especially in remote areas with unfavorable climate, emphasizes the importance and the need to develop remote methods for estimating parameters from space. Such areas include deserts, occupying approximately 20% of the land area, boreal forests and tundra to the north of 60° N, and mountains.

The paper discusses the results of the retrieval of the land surface and atmosphere parameters in two contrast zones: in the Takla Makan desert and in the boreal forests near ZOTTO observatory in the north of Western Siberia. The studies were carried out by the analysis of time series of brightness temperatures $T_b(f)$ from the GCOM-W1 AMSR2 radiometer, and time series of air temperature and humidity from meteorological stations and the total column-water vapor from radiosonde stations in the considered areas in 2014–2017. $T_b(f)$ data were acquired at frequencies $f = 6.9, 7.3, 18.7, 23.8, 36.5$ and 89.0 GHz with the vertical and horizontal polarizations. Additional information included measurements of microwave radiometers GMI from GPM satellite and МТВЗ-ГЯ from Meteor-M No. 2 satellite, visible and infrared images from Aqua, Landsat-8 and SNPP satellites, as well as SAR images from Sentinel-1A/-1B at a frequency of 5.405 GHz and ALOS-1/-2 at a frequency of 1.27 GHz. The time series obtained on the ascending and descending orbits at positive and negative temperatures and during the periods of freezing and thawing were analyzed separately, which made it possible to take into account the diurnal and seasonal variability of the land temperature and the surface air temperature. The measured $T_b(f)$ were compared with the results of the brightness temperature simulation for summer and winter conditions under clear sky

and cloudiness for several values of land surface emissivity. Radiosonde-derived profiles of meteorological parameters were used as input information. For the selected areas, regression equations between land surface and air surface temperatures and $T_b(f)$ for night and daytime measurements were obtained. Particular attention was paid to the analysis of situations in periods of freezing /thawing, dust storms and during liquid and solid precipitation. The results of this study can be used in the satellite microwave data processing, the development of algorithms for the geophysical parameter retrieval and the external calibration of satellite microwave radiometers.

This work was partially supported by the grant of the Far East Branch of the Russian Academy of Sciences 18-I-010.

Атмосферная коррекция изображений дистанционного зондирования Земли по измеренным спектральным данным

Мартинов А.О. (antonmartenov@gmail.com), Катковский Л.В., Силюк О.О.

Институт прикладных физических проблем им. А.Н. Севченко БГУ, ул. Курчатова 7, 220108 Минск, Республика Беларусь

Фотоспектральная система «ФСС» и видеоспектральная система «ВСС» оборудованы спектральным модулем (МС) и модулем регистрации изображения (МРИ). Данные МС представляют собой спектры высокого разрешения, а данные МРИ – RGB изображения. Поле зрения МС жестко фиксировано относительно изображения, получаемого МРИ. Для повышения надежности и точности обнаружения и классификации объектов, в том числе с использованием эталонных спектров, необходимо выполнять атмосферную коррекцию как для данных МС (спектров), так и для данных МРИ (изображений).

В методике атмосферной коррекции данных МРИ «ФСС» («ВСС») можно выделить два основных этапа: определение атмосферных параметров путем решения обратной задачи атмосферной оптики для спектра МС и расчет альбедо каждого пикселя изображений МРИ с учетом найденных параметров. Методика представляет собой переработанный и модифицированный метод атмосферной коррекции SHARC (Sattelite Hypercube Atmosheric Rapid Correction), также разработанный авторами и успешно работающий с гиперспектральными данными. Для корректной работы алгоритма атмосферной коррекции изображение сначала проходит этап устранения виньетирования с помощью корректировочных матриц, полученных при фотосъемке МРИ фотометрической сферы. Также разработана модификация методики, позволяющая корректно выполнять атмосферную коррекцию даже в случае несколько ошибочных данных, получаемых со спектрометра. Таким образом, разработана методика, позволяющая определить альбедо (для трех спектральных каналов) каждого пикселя изображения, имея сопутствующие измерения только одного спектрометра с намного меньшим полем зрения, чем у фотоаппаратуры. Как показало исследование, изображения после атмосферной коррекции с помощью предложенной методики дают лучший результат классификации по сравнению с исходными.

Atmospheric correction of Earth remote sensing images using measured spectral data

A.O. Martinov (antonmartenov@gmail.com), L.V. Katkovsky, V.A. Siliuk

A.N. Sevchenko Institute of Applied Physical Problems of Belarusian State University, 7 Kurchatov str., 220108 Minsk, Belarus

The FSS photo-spectral system and the VSS video-spectral system are equipped with a spectral module (MS) and an image recording module (MRI). The MS data are high-resolution spectra, and the MRI data are RGB images. The field of vision of the MS is rigidly fixed relative to the image obtained by the MRI. To improve the reliability and accuracy of detection and classification of objects, including using reference spectra, it is necessary to perform atmospheric correction for both the MS data (spectra) and the MRI data (images).

In the method of atmospheric correction of MRI FSS (VSS) data, there are two main stages: determining atmospheric parameters by solving the inverse problem of atmospheric optics for the MS spectrum and calculating the albedo of each pixel of MRI images taking into account the parameters found. The technique is a revised and modified the SHARC (Sattelite Hypercube Atmospheric Rapid Correction) atmospheric correction method, also developed by the authors and successfully working with hyperspectral data. For the atmospheric correction algorithm to work correctly, the image first goes through the stage of eliminating vignetting using correction matrices obtained when photographing the MRI of the photometric sphere. A modification of the technique has also been developed, which allows for correct atmospheric correction even in the case of somewhat erroneous data obtained from the spectrometer. As a result a method has been developed, which allows determining the albedo (for three spectral channels) of each pixel of the image, having concomitant measurements of only one spectrometer with a much smaller field of view than that of photographic equipment. The study showed that the images after atmospheric correction using the proposed method gave the best classification result compared to the original.

Результаты сопоставления данных спутниковых и наземных измерений и оценок трендов общего содержания CO, CH₄ и AOT

Ракитин В.С.¹ (vadim@ifaran.ru), Скороход А.И.¹, Макарова М.В.², Штабкин Ю.А.¹,
Ракитина А.В.¹, Панкратова Н.В.¹, Джола А.В.¹

¹Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Пыжевский пер. 3, 119017 Москва, Россия

²Санкт-Петербургский государственный университет, Университетская наб. 7/9, 199034 Санкт-Петербург, Россия

Представлены результаты сопоставления спутниковых измерений (L2 и L3, второй и третий уровень орбитальных приборов AIRS V6 и MODIS/Terra) с наземными данными (пункты ИФА РАН, СПбГУ, ИФА КАН, NDACC и AERONET) спектроскопических измерений общего содержания CO, CH₄ и AOT для фоновых, слабозагрязненных и загрязненных районов. Проанализированы результаты 15-ти наземных пунктов спектроскопических измерений CO и CH₄, и 14-ти станций AERONET, расположенных в Европе и Азии на территории нескольких стран за весь период одновременных измерений для каждого спутникового сенсора и наземного измерительного пункта. Приведены параметры (в т.ч. и статистические) переходных соотношений для среднесуточных значений. Выполнено сопоставление трендов упомянутых примесей в синхронные дни измерений – для каждого орбитального прибора и наземного пункта.

В качестве основных результатов отметим:

- хорошее соответствие (коэффициент линии линейной регрессии $K \approx 1$ при $R^2 \geq 0.6$ дневных данных AIRS V6 L3, разрешение $1^\circ \times 1^\circ$) с наземными спектроскопическими данными ОС CO во всех пунктах, расположенных в фоновых или слабозагрязненных районах;
- систематическое занижение AIRS V6 данных ОС CO ($K = 1.5\text{--}3$) в эпизодах высокого загрязнения (природные пожары, район Пекина) с относительно низкой корреляцией ($R^2 = 0.3\text{--}0.5$);
- удовлетворительную корреляцию среднесуточных ОС CH₄ ($R^2 \sim 0.5$, при $K \sim 0.7\text{--}0.8$) с данными наземных измерений в большинстве пунктов сопоставления;
- хорошую корреляцию данных AOT MODIS/Terra/Aqua с данными наземных пунктов AERONET в большинстве пунктов сопоставления ($R^2 = 0.6\text{--}0.9$ при $K = 0.8\text{--}1.1$);
- хорошее согласие локальных оценок трендов ОС CO (и по направленности, и по величине), полученных по данным синхронных спутниковых и наземных спектроскопических измерений – для всех пунктов сопоставления;
- систематическое занижение (на 20–30%) локальных оценок трендов ОС CH₄ AIRS v6 по сравнению с наземными оценками;

– хорошее соответствие оценок трендов АОТ, полученных с помощью наземных (AERONET) и орбитальных (MODIS/Terra) данных для большинства пунктов сопоставления.

Полученные переходные соотношения между спутниковыми и наземными данными позволяют уточнять оценки эмиссий CO, CH₄ и аэрозолей, а также исследовать пространственное распределение трендов упомянутых примесей.

Представлены первые результаты сопоставления данных ОС CO орбитального спектрометра высокого разрешения TROPOMI для пунктов Москва (ИФА) и Звенигород (ЗНС).

Авторы благодарят научные коллективы станций NDACC Кируна, Харестуа, Най Алесунд, Зуль, Бремен, Юнгфрау, Цугшпитце, а также станций AERONET за возможность использования данных их измерений. Работа выполнена при частичной поддержке проекта РФФ №16-17-10275 (результаты сопоставления спутниковых и наземных данных CO и АОТ для Московского мегаполиса), и поддержке проекта РФФИ №18-55-53062 (сопоставление и анализ данных измерений ОС CO в Пекине, а также данных АОТ станций китайской сети AERONET).

Data comparison results of satellite and ground-based measurements and trend evaluation of CO and CH₄ total content and AOD

V.S. Rakitin¹ (vadim@ifaran.ru), A.I. Skorokhod¹, M.V. Makarova², Yu.A. Shtabkin¹,
A.V. Rakitina¹, N.V. Pankratova¹, A.V. Dzhola¹

¹A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics RAS, 3 Pyzhevsky per., 119017 Moscow, Russia

²Saint-Petersburg State University, 7/9 Universitetskaya nab., 199034 Saint-Petersburg, Russia

Results of satellite measurements of CO, CH₄ total contents (TC) and aerosol optical depth (AOD) (L2 and L3, the second and the third level of orbital instruments AIRS V6 and MODIS/Terra) are presented in comparison with ground-based spectroscopic data (OIAP, SPbSU, IAP CAS, NDACC and AERONET stations) for background, low-polluted and heavy polluted regions. Data of 15 ground-based spectrometers measured CO and CH₄ and 14 AERONET sites located in Europe and Asia on territory of several countries during simultaneous measurement period for every satellite sensor and ground-based station were analyzed. Parameters (including statistical) of transitional relations for diurnal values were given. Trend comparisons of mentioned admixtures in synchronous measurement days for every orbital instrument and ground-based station were implemented.

As the main results, we note:

- good agreement (linear regression line coefficient $K \approx 1$ with $R^2 \geq 0.6$ of diurnal data of AIRS V6 L3, resolution $1^\circ \times 1^\circ$) with the CO TC ground-based spectroscopic data in all stations located in background or low-polluted regions;
- systematic understatement of CO TC data by AIRS V6 ($K = 1.5\text{--}3$) in high-polluted episodes (wild fires, Beijing region) with relatively low correlation ($R^2 = 0.3\text{--}0.5$);
- enough high ($R^2 \sim 0.5$, with $K \sim 0.7\text{--}0.8$) correlation of diurnal CH₄ TC with ground-based measurement data at the majority of comparison stations;
- good AOT MODIS/Terra/Aqua data correlation with AERONET ground-based station data at the majority of comparison stations;
- good agreement of local CO TC estimates (both by sign and values), derived from synchronous satellite and ground-based spectroscopic measurements – for all comparison stations;
- systematic underestimation (by 20–30%) of local CH₄ TC trend estimates by AIRS v6 compared with ground-based estimates;
- good agreement between the AOT trend estimates derived from ground-based (AERONET) and orbital (MODIS/Terra) data for most of the comparison stations.

Obtained transient relations between satellite and ground-based data allow us to refine estimates of CO, CH₄ and aerosols emissions as well to investigate of spatial distribution trends of mentioned admixtures.

The first results of comparing the CO TC data obtained from TROPOMI orbital high resolution spectrometer for Moscow and Zvenigorod stations are presented.

The authors thank the scientific teams of NDACC stations of Kiruna, Harestua, Ny Alesund, Zhule, Bremen, Jungfraujoch, Zugspitze, and AERONET stations for the possibility of using their measurement data. This study was partially supported by the Russian Science Foundation under grant №16-17-10275 (comparison results of CO and AOD satellite and ground-based data for Moscow mega polis) and by the Russian Foundation for Basic Research under grant № 18-55-53062 (comparison and data analysis of CO TC measurements in Beijing as well of station AOD data of AERONET Chinese network).

Детектирование гарей на территории Восточной Сибири по данным AVHRR/NOAA (1984–2016) с использованием комбинированного подхода

Томшин О.А. (tomshinoa@gmail.com), Соловьев В.С.

*Институт космических исследований и аэронавтики им. Ю.Г. Шафера СО РАН, пр. Ленина 31,
677027 Якутск, Россия*

В работе представлены результаты детектирования гарей в лесах Восточной Сибири по данным проекта LTDR (1984–2016 гг.) с использованием комбинированного подхода, включающего на этапе валидации экспертную оценку достоверности выделенных пороговым алгоритмом гарей. Сравнение результатов детектирования с данными MODIS (продукт MCD64A1 C6, 2001–2016 гг.) и данными проекта GFED-4 (1995–2016 гг.) показало хорошее согласие с коэффициентами корреляции ~ 0.95 , ~ 0.87 и средними относительными ошибками 16.5% и 40.6%, соответственно. Анализ пространственного распределения гарей показал, что на территории к западу от оз. Байкал качество детектирования гарей несколько ухудшается. Это снижение обусловлено тем, что в этой части Восточной Сибири гари чаще имеют небольшие размеры и, с учетом более низкого разрешения данных LTDR в сравнении с данными MODIS, вероятность их обнаружения оказывается ниже. Комбинированный подход показал, что в некоторых регионах, имеющих сложный ландшафт подстилающей поверхности, данные MODIS часто предоставляют недостоверные гари.

По результатам детектирования построены годовые карты гарей на территории Восточной Сибири за 1984–2016 гг. Сделан вывод, что применение комбинированного подхода на основе экспертной оценки с использованием дополнительных условий, подтверждающих гари, обеспечивает более высокий (по сравнению с полностью автоматизированными алгоритмами) уровень достоверности детектирования гарей, особенно для участков с горным рельефом, сложной текстурой земной поверхности, типом растительного покрова и/или расположенных на высоких широтах, где возникновение гарей крайне маловероятно.

Combined approach for burned area mapping in Eastern Siberia using AVHRR/NOAA data (1984–2016)

O.A. Tomshin (tomshinoa@gmail.com), V.S. Solovyev

*Yu.G. Shafer Institute of Cosmophysical Research and Aeronomy SB RAS, 31 Lenin's ave., 677027 Yakutsk,
Russia*

The results of burned area (BA) mapping in Eastern Siberian forests using LTDR project data are discussed. Combined approach that includes an expert assessment of burned areas detected by threshold algorithm is proposed. Comparison with MODIS (MCD64A1 C6, 2001–2016) and GFED-4 (1995–2016) data showed good agreement with correlation coefficients of ~ 0.95 , ~ 0.87 and average relative errors of 16.5% and 40.6%, respectively. Analysis of the spatial distribution of BA has shown that in the territory west of the Baikal the quality of BA detection is somewhat degraded. This decrease is due to generally smaller size of the BA in this region and, given the lower resolution of the LTDR data as compared to the MODIS data, the probability of their detection is lower. The combined approach has shown that in some regions, that have a complex landscape, MODIS data often provide unreliable results.

Annual maps of BA in Eastern Siberia were constructed for 1984–2016. It is concluded that the use of a combined approach based on expert assessment with additional conditions provides a higher (compared to fully automated algorithms) level of confidence in BA detection, especially over areas with mountainous terrain, complex ground surface texture, vegetation type and/or over areas located at high latitudes, where the occurrence of wildfires is extremely unlikely.

Полетные калибровки спутниковых съемочных систем

Катковский Л.В. (katkovskyl@bsu.by), Беляев Б.И., Мартинов А.О., Силук О.О.

НИИ прикладных физических проблем им. А.Н. Севченко БГУ, ул. Курчатова 7, 220045 Минск, Беларусь

В работе представлена методика полетных калибровок спутниковых съемочных систем и результаты ее применения для ряда космических сенсоров, таких как Фотоспектральная система (ФСС), работающая на борту МКС, сенсор Landsat 8, Sentinel-2B. Для спектрального модуля и модуля регистрации изображений ФСС также разработаны методика и представлены результаты кросс-калибровки данных ФСС с измерениями гиперспектрометра Hyperion и широкополосного сенсора Landsat 8. Полученные результаты верификации данных космических съемок основаны на использовании в качестве эталонных результатов наземных и авиационных измерений спектров отражения ряда природных и искусственных объектов на территории Беларуси. Для верификации экспериментальных спектров отражения (наземных и авиационных) широко использованы численные расчеты спектров спектральной плотности энергетической яркости (СПЭЯ) с помощью кода по расчету переноса излучения в атмосфере LibRadTran.

Самолетные измерения проводились с борта летательного аппарата Авиатика МАИ-890У фотоспектрорадиометром (ФСР) в спектральном диапазоне 400–900 нм. Наземные измерения коэффициентов спектральных яркостей (КСЯ) различных типов подстилающей поверхности проводились при помощи малогабаритного солнечного спектрополяриметра ССП-600Н в спектральном диапазоне 400–900 нм (оба прибора – разработки НИИПФП им. А.Н. Севченко БГУ). С помощью ССП-600Н проводились также измерения оптических характеристик атмосферного аэрозоля в спектральном диапазоне 400–500 нм для расчета аэрозольной оптической толщины как одного из входных параметров моделирования LibRadtran. Получено очень хорошее соответствие измеренных авиационных спектров с рассчитанными численно с использованием входных данных, полученных в наземных измерениях (КСЯ и оптических толщин атмосферы). Имеющие место незначительные расхождения спектров для отдельных случаев измерений объясняются неоднородностью соответствующих поверхностей и неучетом помехи бокового подсвета в теоретическом расчете. Таким образом, подтверждена правильность разработанных методик калибровки бортовых сенсоров по наземным измерениям (в основе которых лежит расчет спектра излучения для высоты расположения сенсора по наземным измерениям КСЯ поверхности и оптических толщин атмосферы), а также подтверждена пригодность использованных спектрорадиометров ФСР и ССП-600 для проведения полетных калибровок (спектры, регистрируемые этими приборами, хорошо коррелируют с численно моделируемыми спектрами).

Выполнена верификация наземных спектральных измерений с результатами квазисинхронных съемок из космоса мультиспектральных и гиперспектральных спутниковых систем, таких как Sentinel-2B, Hyperion, LANDSAT 8. Здесь также получено хорошее совпадение результатов, подтверждающее надежность и высокую точность разработанных методик полетной калибровки и методики атмосферной коррекции спутниковых данных.

Flight calibration of satellite imaging systems

L.V. Katkovsky (katkovskyl@bsu.by), B.I. Belyaev, A.O. Martinov, O.O. Siliuk
*A.N. Sevchenko Research Institute of Applied Physical Problems of Belarus State University, 7 Kurchatov str.,
220045 Minsk, Belarus*

The work presents the method of flight calibration of satellite imaging systems and the results of its application for a number of space sensors, such as the Photospectral System (PSS), working onboard the ISS, Landsat 8 sensor, Sentinel-2B. A method of cross-calibration was also developed for the spectral module and the PSS image registration module, and the results of cross-calibration of the PSS data with measurements of the Hyperion hyperspectrometer and Landsat 8 broadband sensor were presented. The obtained results of verification of satellite imagery data are based on the use of ground and airborne measurements of the reflection spectra of a number of natural and artificial objects in Belarus as reference ones. For verification of experimental reflection spectra (ground and airborne), numerical calculations of radiance spectra are widely used with the help of the LibRadTran calculation code for radiation transfer in the atmosphere.

The aircraft measurements were carried out from the board of the Aviation MAI-890U aircraft by an Photo Spectroradiometer (PSR) in the spectral range of 400–900 nm. Ground-based measurements of the spectral brightness coefficients (SBC) of various types of the underlying surface were carried out using the SSP-600N compact solar spectropolarimeter in the spectral range 400–900 nm (both instruments are developed by the Scientific Research Institute of Applied Physical Problems of the Belarus State University). With the help of SSP-600N, optical parameters of atmospheric aerosol were measured in the spectral range of 400–500 nm to calculate the aerosol optical thickness as one of the input parameters of the LibRadtran simulation. A very good agreement was obtained between the measured airborne spectra and those calculated numerically using the input data obtained from ground-based measurements (SBC and atmospheric optical thicknesses). The insignificant discrepancies in the spectra for individual cases of measurements are explained by the inhomogeneity of the corresponding surfaces and the neglect of adjacency effect in theoretical calculations. Thus, the correctness of the developed methods of calibration of on-board sensors from ground-based measurements (based on the calculation of the outgoing radiance spectrum for the height of the sensor from ground-based measurements of the surface SBC and optical thickness of the atmosphere) was confirmed, and the suitability of the used FSR and SSP-600 spectroradiometers for flight calibrations (the spectra recorded by these instruments correlate well with the numerically simulated spectra).

Verification of ground-based spectral measurements with the results of quasi-synchronous space surveys of multispectral and hyperspectral satellite systems, such as Sentinel-2B, Hyperion, LANDSAT 8 was performed. Here, a good agreement was also obtained, confirming the reliability and high accuracy of the developed flight calibration techniques and the atmospheric correction method of satellite data.

Пространственно-временные вариации содержания CO₂ вблизи городов РФ по спутниковым данным ОСО-2

Тимофеев Ю.М. (y.timofeev@spbu.ru), Березин И.А., Виролайн Я.А., Никитенко А.А.
Санкт-Петербургский государственный университет, Университетская наб. 7/9, 199034 Санкт-Петербург, Россия

Представлены результаты исследований пространственно-временных вариаций содержания CO₂ в районе Санкт-Петербурга, Москвы, Норильска и других крупных городов и промышленных центров РФ на основе спутниковых измерений (спутник ОСО-2) за период 2014–2018 гг. Приведены по спутниковым данным полные амплитуды пространственно-временных вариаций для среднего отношения смеси CO₂ (XCO₂), максимальные и минимальные значения XCO₂ в течение всего периода наблюдений, а также, в течение

отдельных дней наблюдений, значения средне-квадратических вариаций, амплитуды сезонного хода и другие характеристики пространственно-временных вариаций CO₂.

Spatial-temporal CO₂ variations in vicinities of Russian cities according to OCO-2 satellite measurements

Yu.M. Timofeev (y.timofeev@spbu.ru), I.A. Berezin, Ya.A. Virolainen, A.A. Nikitenko
Saint-Petersburg State University, 7/9 Universitetskaya nab., 199034 Saint-Petersburg, Russia

Results of studying spatial-temporal CO₂ variations near St. Petersburg, Moscow, Norilsk and other big cities and industrial centers of Russian Federation during 2014–2018 period based on OCO-2 satellite measurements are discussed. According to satellite data we investigated the full amplitude of the spatial-temporal variations for the average CO₂ mixing ratio (XCO₂), the maximal and minimal XCO₂ data, spatial variations during one day of observations and all period of measurements, root mean square variations, seasonal behavior and etc.

Определение температуры подстилающей поверхности и характеристик растительного покрова для территории Европейской части России по спутниковым данным

Волкова Е.В.¹ (quantocosa@bk.ru), Успенский А.Б.¹, Музылев Е.Л.² (muzylev@iwr.ru),
Старцева З.П.²

¹НИЦ космической гидрометеорологии "Планета" Росгидромета, Б. Предтеченский пер. 7, 123242
Москва, Россия

²Институт водных проблем РАН, ул. Губкина 3, 119333 Москва, Россия

Разработаны методы и специализированный программный комплекс (СПК) “ETR-tatets” обработки данных радиометров AVHRR/NOAA, МСУ-МР/Метеор-М № 2, SEVIRI/Meteosat для получения оценок температуры поверхности почвы (T_s) и характеристик растительности, а также температуры воздуха у поверхности растительного покрова (T_a). Для территории с координатами 46–63° с.ш. и 20–50° в.д. (в Европейской части России (ЕТР) и ряде сопредельных стран) в круглосуточном режиме строятся оценки T_s , T_a и эффективной температуры подстилающей поверхности (T_e), а для светлого времени суток – оценки характеристик растительного покрова: вегетационного индекса (NDVI, Normalized Difference Vegetation Index), листового индекса (LAI, Leaf Area Index) и проективного покрытия растительностью (B). Все перечисленные оценки рассчитываются только при отсутствии облачности в поле зрения прибора и затем приводятся к регулярной сетке с шагом 1' (0.01667°) по широте и 1.5' (0.025°) по долготе. Детектирование облачности и построение облачной маски по спутниковым данным выполняется с помощью пороговой методики [1–3]. Оценки T_s , T_a и T_e производятся с помощью алгоритма [4] обобщенного метода “расщепленного окна прозрачности” (GSW, Generalized Split-Window), в котором используются спутниковые измерения в каналах 10.5–11.5 мкм и 11.5–12.5 мкм. Регрессионные коэффициенты в алгоритме определяются по выборке совмещенных спутниковых и наземных измерений, при этом используются наборы “динамических” коэффициентов, т.е. меняющихся в зависимости от номера календарного дня с начала года, высоты солнца и срока спутникового измерения. Значения NDVI рассчитываются стандартным образом, значения B и LAI – с использованием эмпирических зависимостей от NDVI. Качество и адекватность оценок T_a , T_e и T_s , полученных по данным AVHRR, SEVIRI и МСУ-МР, проверялись путём сопоставления между собой их временного хода за несколько сезонов вегетации, а также сопоставлением с аналогичными данными, построенными по измерениям на метеостанциях в пределах ЕТР. Адекватность значений LAI, полученных по информации перечисленных спутниковых радиометров, подтверждена результатами

сопоставления временных ходов за сезон вегетации, построенных по спутниковым и наземным данным.

Полученные с помощью разработанных технологий выходные продукты (T_a , T_e , T_s , NDVI, B и LAI) использовались в качестве параметров и входных переменных модели влаго- и теплообмена покрытых растительностью участков суши с атмосферой для вегетационного периода (LSM, Land Surface Model), предназначенной для расчета влагозапасов почвы (W), суммарного испарения (Ev) и других характеристик водного и теплового режимов исследуемой территории [5–7]. Сравнение рассчитанных по модели величин W и Ev для Центрально-Чернозёмного региона с данными наземных наблюдений показало, что их расхождения находятся в пределах стандартных ошибок определения W и Ev [6–8], что может считаться также косвенным подтверждением корректности оценок LST, LAI и других характеристик подстилающей поверхности, использовавшихся при моделировании.

Использование результатов расчётов СПК совместно с данными численного прогноза состояния атмосферы позволяет применять LSM в оперативном режиме для получения текущих значений запасов почвенной влаги, суммарного испарения и других составляющих водообмена, например, с целью получения прогноза водообеспеченности территорий сельскохозяйственного назначения.

1. Волкова Е.В. Оценки параметров облачного покрова, осадков и опасных явлений погоды по данным радиометра AVHRR с МИСЗ серии NOAA круглосуточно в автоматическом режиме // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2013. Т. 10, № 3. С. 66–74.
2. Волкова Е.В. Оценки параметров облачного покрова и осадков по данным радиометра МСУ-МР с полярно-орбитального метеоспутника “Метеор-М” № 2 для Европейской территории России // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14, № 5. С. 300–320.
3. Волкова Е.В., Успенский А.Б. Оценки параметров облачного покрова по данным геостационарного МИСЗ Meteoros-9 круглосуточно в автоматическом режиме // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2010. Т. 7, № 3. С. 16–22.
4. Волкова Е.В., Успенский С.А. Дистанционное определение температуры подстилающей поверхности, приземной температуры воздуха и эффективной температуры по спутниковым данным для юга ЕТР // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13, № 5. С. 291–303.
5. Startseva Z., Muzylev E., Volkova E., Uspensky A., Uspensky S. Water and heat regimes modelling for a vast territory using remote-sensing data // Int. J. Rem. Sens. 2014. V. 35, No 15. P. 5775–5799.
6. Музылев Е.Л., Успенский А.Б., Старцева З.П. и др. Использование данных дистанционного зондирования при моделировании компонент водного и теплового балансов территории Центрально-Черноземных областей России // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12, № 6. С. 17–34.
7. Музылев Е.Л., Старцева З.П., Успенский А.Б. и др. Использование данных дистанционного зондирования при моделировании водного и теплового режимов сельских территорий // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14, № 6. С. 108–136.
8. Muzylev E.L., Startseva Z.P., Uspensky A.B., Volkova E.V. Modeling Water and Heat Balance Components for Large Agricultural Region Utilizing Information from Meteorological Satellites // Water Resources. 2018. V. 45, No 5. P. 672–684.

Satellite based estimation of surface temperature and vegetation characteristics for the territory of the European part of Russia

E.V. Volkova¹ (quantocosa@bk.ru), A.B. Uspensky¹, E.L. Muzylev² (muzylev@iwp.ru),
Z.P. Startseva²

¹State Research Center of Space Hydrometeorology “Planeta”, 7 B. Predtechensky per., 123242 Moscow, Russia

²Water Problems Institute RAS, 3 Gubkina str., 119333 Moscow, Russia

Methods and specialized software package (SP) “ETR-tatets” have been developed for processing satellite data from polar-orbiting (AVHRR/NOAA, MSU-MR/Meteor-M No 2) and geostationary (SEVIRI/Meteoros) multichannel radiometers to obtain estimates of soil temperature (T_s) and vegetation characteristics, as well as near-surface air temperature at the vegetation level (T_a). With their help, the following products are generated for the area with coordinates 46–63° N

and 20–50° E (covering the European territory of Russia (ETR) and several adjacent countries): the estimates of T_s , T_a and the effective surface temperature (T_e) (around the clock); the estimates of the characteristics of the vegetation cover: vegetation index (NDVI, Normalized Difference Vegetation Index), leaf index (LAI, Leaf Area Index) and vegetation cover fraction (B) (light time of day). All of these estimates are built only in the absence of clouds in the field of view of the device and then reduced to a regular grid in increments of 1' (0.01667°) latitude and 1.5' (0.025°) longitude. Cloud detection and cloud mask construction is performed using the threshold technique [1–3]. To obtain the estimates of T_s , T_a and T_e the Generalized Split-Window algorithm is applied [4], which uses satellite measurements in the channels of 10.5–11.5 μm and 11.5–12.5 μm . The regression coefficients in the algorithm are determined from a training sample of combined satellite and ground-based measurements. In this case sets of so-called “dynamic” coefficients are used because their changes depend on the number of the calendar day from the beginning of the year, the height of the sun and the period of satellite measurement. NDVI estimates are calculated in the standard way, B and LAI values are calculated using empirical dependencies on NDVI. The quality and adequacy of T_a , T_e and T_s estimates, obtained from AVHRR, SEVIRI, and MSU-MR data, were verified by comparison between their time series for a few vegetation seasons, as well as by comparison with similar data from meteorological stations within the ETR. The adequacy of the LAI values obtained from these satellite radiometers was confirmed by comparing the time series for the vegetation season, built from satellite and ground-based data.

The output products (T_a , T_e , T_s , NDVI, B and LAI) calculated using the developed technologies were employed as parameters and input variables in the model of the water and heat exchange between vegetation-covered land areas and the atmosphere for the vegetation period (LSM, Land Surface Model). This model is designed to compute soil moisture (W), evapotranspiration (Ev) and other characteristics of water and thermal regimes of the study area [5–7]. Comparison of the modeled values of W and Ev for the Central Black Earth region with the ground-based observations has shown that their differences are within the standard errors of W and Ev specification [6–8]. This can also be considered as indirect confirmation of the correctness of the T_a , T_s , LAI and other surface characteristic estimates used in the model.

The application of the results of the SP “ETR-tatets” calculations together with the NWP (Numerical Weather Prediction) products allows using LSM in the online mode to obtain the current values of soil water content, evapotranspiration and other components of water exchange, for example, to forecast water availability in agricultural areas.

1. Volkova E.V. Automatic estimation of cloud cover and precipitation parameters obtained by AVHRR NOAA for day and night conditions // Modern Problems of Remote Sensing of the Earth from Space. 2013. V. 10, No 3. P. 66–74.
2. Volkova E.V. Detection and assessment of cloud cover and precipitation parameters using data from MSU-MR radiometer of the polar-orbiting Meteor-M No. 2 for the European territory of Russia // Modern Problems of Remote Sensing of the Earth from Space. 2017. V. 14, No 5. P. 300–320.
3. Volkova E.V., Uspenskii A.B. Estimation of cloud cover parameters from METEOSAT-9 geostationary meteorological satellite data for day and night time // Modern Problems of Remote Sensing of the Earth from Space. 2010. V. 7, No 3. P. 6–22.
4. Volkova E.V., Uspenskii S.A. Land surface, land air and effective temperature estimation for territories of Southern European Russia based on satellite data. // Modern Problems of Remote Sensing of the Earth from Space. 2016. V. 13, No 5. P. 291–303.
5. Startseva Z., Muzylev E., Volkova E., Uspensky A., Uspensky S. Water and heat regimes modelling for a vast territory using remote-sensing data // Int. J. Rem. Sens. 2014. V. 35, No 15. P. 5775–5799.
6. Muzylev E.L., Uspenskii A.B., Startseva Z.P. et al. Utilization of remote sensing data for modeling water and heat balance components of the Russian Central Black Earth Region territory // Modern Problems of Remote Sensing of the Earth from Space. 2015. V. 12, No 6. P. 17–34.
7. Muzylev E.L., Startseva Z.P., Uspenskij A.B. et al. Using remote sensing data to model water and heat regimes of rural territories // Modern Problems of Remote Sensing of the Earth from Space. 2017. V. 14, No 6. P. 108–136.
8. Muzylev E.L., Startseva Z.P., Uspensky A.B., Volkova E.V. Modeling Water and Heat Balance Components for Large Agricultural Region Utilizing Information from Meteorological Satellites // Water Resources. 2018. V. 45, No 5. P. 672–684.

Особенности содержания малых газов в атмосфере на территории Казахстана по данным спутникового зондирования и наземных наблюдений

Ахмеджанов А.Х. (model_lab@mail.ru), Караданов Т.К.

Национальный центр космических исследований и технологий, ул. Шевченко 15, Алматы, Республика Казахстан

При решении задач количественной и качественной оценки распространения малых газов, загрязняющих атмосферу, наиболее подходящими являются данные спутникового зондирования. Из космоса может быть определено состояние загрязненности атмосферы, которое зависит от большого количества источников эмиссии в атмосферу малых газов природного и антропогенного происхождения.

По данным информационных бюллетеней о состоянии окружающей среды Казгидромета за 2017 и 2018 годы наиболее загрязненными оксидом углерода являются три города: Атырау, Караганда и Шымкент, где средние значения концентрации превышают 1.4 мг/м^3 . По городу Актобе наблюдается тренд на уменьшение средней концентрации СО с 1.6 мг/м^3 до 0.85 мг/м^3 , а в Атырау – повышение с 1.05 мг/м^3 до 2.2 мг/м^3 . Сезонная изменчивость общего содержания СО по территории Казахстана за период 2007–2017 гг. проанализирован по данным прибора MOPITT (спутник TERRA). Максимумы содержания СО наблюдаются в периоды март–апрель, минимумы – с июля по октябрь месяцы. Анализ средних изменений содержания оксида углерода в атмосфере по территории Казахстана по спутниковым данным за период 1980–2018 гг. показал понижение на 13.6%.

Анализ данных наблюдений на всех пунктах Казгидромета показал, что по средним значениям концентрации диоксида серы выделяется Усть-Каменогорск (0.1 мг/м^3), в городах Алматы, Риддер и Темиртау концентрации примерно одинаковы – 0.05 мг/м^3 , в Талды-Кургане – около 0.035 мг/м^3 . Диапазон изменений приземной концентрации диоксида серы от 0.01 мг/м^3 до 0.09 мг/м^3 соответствует всем рассматриваемым городам, кроме города Усть-Каменогорска, где наблюдается диапазон от 0.058 мг/м^3 до 0.259 мг/м^3 . Анализ данных MERRA-2 содержания SO_2 в атмосферном столбе по Казахстану показал, что среднее значение находится в диапазоне от 3.16 мг/м^2 в 2010 году до 2.46 мг/м^2 в 2015 году. Содержание диоксида серы в атмосферном столбе по спутниковым данным за период с 1980 по 2018 гг. по территории Казахстана уменьшилось на 9.5%.

Наземные наблюдения Казгидромета за содержанием метана в приземном слое атмосферы показали, что наиболее повышенные концентрации метана наблюдаются в городах: Усть-Каменогорск, Риддер, Семей и Караганде. Туркестанская область – регион с минимальным содержанием метана в атмосфере. Анализ сезонных характеристик содержания метана в атмосфере по данным AIRS показал, что области максимального содержания полностью совпали с наземными наблюдениями. Содержание метана в атмосфере осенью – 1911.819 ppbv ; зимой – 1909.775 ppbv ; весной – 1889.85 ppbv ; летом – 1914.088 ppbv . На всех сезонных распределениях наблюдается тенденция к росту содержания метана по территории Казахстана за рассматриваемый период. По спутниковым данным за последние 16 лет наблюдается устойчивый рост (тренд) концентрации метана. В среднем по Казахстану с 09.2002 года по 12.2018 год приземная концентрация метана увеличилась на 7.2%.

Работа выполнена в рамках грантового проекта № AP05135191 МОН РК «Исследовать особенности распределения малых газов, загрязняющих атмосферу, по территории Казахстана на основе данных дистанционного зондирования Земли из космоса».

Features of trace gas contents in Kazakhstan according to the remote sensing and ground-based observations

A.Kh. Akhmedzhanov (model_lab@mail.ru), T.K. Karadanov

National Centre of Space Research and Technology, 15 Shevchenko str., Almaty, Kazakhstan

When solving problems of quantitative and qualitative assessment of the distribution of minor gases polluting the atmosphere, satellite sensing data are most appropriate. The state of atmospheric pollution which depends on a large number of sources of emissions into the atmosphere of small gases of natural and anthropogenic origin can be determined from space.

According to Kazhydromet's information bulletins of 2017 and 2018, three cities (Atyrau, Karaganda and Shymkent), are the most polluted by the carbon monoxide (average concentrations exceed 1.4 mg/m^3). In Aktobe, there is a trend to reducing the average CO concentration from 1.6 mg/m^3 to 0.85 mg/m^3 . In Atyrau, the increase from 1.05 mg/m^3 to 2.2 mg/m^3 is registered. Seasonal variability of total CO content over Kazakhstan territory for the period 2007–2017 was analyzed according to the MOPITT sensor (TERRA satellite). The maximum CO content is observed in the periods of March–April, the minimum – from July to October. Analysis of average changes in the carbon monoxide content in the atmosphere over the territory of Kazakhstan according to satellite data for the period 1980–2018 showed a decrease of 13.6%.

The analysis of data of Kazhydromet's observation points has shown that the average SO_2 concentration of is maximal in Ust-Kamenogorsk (0.1 mg/m^3). These concentrations are the same (0.05 mg/m^3) in Almaty, Ridder and Temirtau, and lower in Taldy-Kurgan (about 0.035 mg/m^3). The range of changes in the SO_2 near-surface concentration is from 0.01 mg/m^3 to 0.09 mg/m^3 corresponds to all considered cities, except the city of Ust-Kamenogorsk, where there is a range from 0.058 mg/m^3 to 0.259 mg/m^3 . The average values of SO_2 total columns according to MERRA-2 data are 3.16 mg/m^2 in 2010 and 2.46 mg/m^2 in 2015. From 1980 to 2018, SO_2 total columns over the territory of Kazakhstan decreased by 9.5%.

Kazhydromet's ground-based observations over the methane content in the near-surface atmospheric layer have shown that the most increased methane concentrations are observed in Ust-Kamenogorsk, Ridder, Semey and Karaganda. Turkestan region is characterized by the minimal methane content. The analysis of seasonal characteristics of the methane content according to AIRS data has shown that areas of the maximum contents completely coincided with ground-based observations. Methane contents in the atmosphere are 1911.819 ppbv in autumn, 1909.775 ppbv in winter, 1889.85 ppbv in spring, and 1914.088 ppbv in summer. On all seasonal distributions the tendency to growth of methane contents across the territory of Kazakhstan for the considered period is observed. According to satellite data for the last 16 years the steady increase (trend) of concentration of methane is also marked. The average near-surface methane concentration for Kazakhstan territory increased by 7.2% from 09.2002 to 12.2018.

The work was made within the framework of the grant № AP05135191 MON RK "Study of the distribution of small gases features, polluting the atmosphere on Kazakhstan territory based on remote sensing data»

Исследование возмущений атмосферы Земли на высотах 60–100 км в периоды солнечной активности по данным COSMIC

Шмаков А.В. (ldr@ifaran.ru), Горбунов М.Е.

Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Пыжевский пер. 3, 119017 Москва, Россия

В работе представлены результаты обработки и анализа двух периодов радиопросвечивания атмосферы Земли, полученных в эксперименте COSMIC. Первый из них это декабрь 2011 года, когда на Солнце произошел целый ряд вспышек, и второй – январь 2012 года, когда произошло сильное солнечно-протонное событие. Проанализировано распределение по широте и по местному суточному времени вариаций электронной

концентрации, пространственных спектров вариаций ионосферной фазовой задержки и амплитуды сигнала.

Показано, что для полярных широт, экваториальной области и средних широт южного полушария для января 2012 года наблюдается рост мелкомасштабных вариаций электронной концентрации в атмосфере. В этот же период в экваториальной области и в южном полушарии в светлое время суток наблюдается рост крупномасштабных вариаций электронной концентрации. Пространственные спектры считались для двух диапазонов высот 60–80 и 80–100 км. Для спектра фазы сигнала в диапазоне высот 80–100 км хорошо наблюдается второй максимум в районе частоты 7–8 рад/км. Виден его суточный и широтный ход, уменьшение к высоким широтам для обоих полушарий. В диапазоне высот 60–80 км этот максимум практически не заметен. Хотя солнечные вспышки могут приводить к существенным локальным изменениям электронной концентрации, заметного отличия в поведении спектральных плотностей амплитуды и фазовой задержки на длинных лимбовых трассах в этих двух диапазонах высот для дней активного и спокойного Солнца не наблюдалось.

Study of the Earth's atmosphere disturbances at altitudes of 60–100 km during periods of solar activity according to COSMIC data

A.V. Shmakov (ldr@ifaran.ru), M.E. Gorbunov

A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics RAS, 3 Pyzhevsky per., 119017 Moscow, Russia

We present the results of processing and analysis of two periods of radio occultation sounding of the Earth's atmosphere observed in the course of the COSMIC experiment. One of them was in December 2011 (when a number of solar flares occurred) and second – in January 2012 (when a strong solar proton event took place). The distribution along latitude and over local time of the variations of electron density, spatial spectra of variations in the ionospheric phase delay and signal amplitude has been analyzed.

It is shown that small-scale variations of electron density increase in polar latitudes, equatorial region, and middle latitudes of the southern hemisphere in January 2012. In the same period, an increase of large-scale variations of electron density is observed during daylight hours in the equatorial region and in the southern hemisphere. The spatial spectra have been calculated for two height ranges, i.e., 60–80 and 80–100 km. In the spectrum of the signal phase within the height range 80–100 km, the second distinct maximum is observed near the frequency of 7–8 rad/km. We demonstrate its diurnal and latitudinal behavior and its decrease towards high latitudes in both hemispheres. In the height range of 60–80 km, this maximum is very weak. Although solar flares can lead to substantial local changes in the electron concentration, no substantial difference in the behavior of the spectral densities of the amplitude and phase delay at long limb paths was detected within these two height ranges on days of active and quiet sun.

Исследование характеристик конвективно-неустойчивого слоя в случаях формирования града на юге Западной Сибири

Аноп Т.А. (anop2013@yandex.ru)

Национальный исследовательский Томский государственный университет, пр. Ленина 36, 634050 Томск, Россия

Конвективно-неустойчивый слой в дни с градом на территории юго-востока Западной Сибири был оценён с помощью термодинамических характеристик по данным аэрологического зондирования в 00 и 12 ч ВСВ (5 точек) и температурно-влажностных характеристик по данным спутникового зондирования. Реестр дней с градом, диаметр которого 5 мм и более, в период с 2015 по 2018 г. составляет 130 дней (182 случая) по данным кода WAREP. Для использования термодинамических характеристик по данным

аэрологического зондирования отобраны случаи выпадения града в точках не далее 150 км от точки зондирования и ± 1.5 часа от времени зондирования. При соблюдении этих условий реестр случаев сократился до 31 случая, для которых статическую устойчивость атмосферы, выраженную индексом Lift, в дни с градом можно описать как неустойчивую (13% случаев) и слабо неустойчивую (50%), в остальные 37% случаев значение Lifted index характеризовал атмосферу как устойчивую. Температурно-влажностное состояние атмосферы в слое 850–700 гПа позволяет оценить K index, который согласуется с Lifted index, и описывает в 38% случаев состояние атмосферы как слабо неустойчивое, в 13% – неустойчивое, в 12% – атмосфера была сильно и крайне неустойчива. В оставшиеся 38% случаев атмосфера была устойчива. Значения CAPE индекса над юго-востоком Западной Сибири практически не достигали значений, соответствующих неустойчивой стратификации по принятой классификации этого индекса. Отчасти это связано с тем, что аэрологическое зондирование не попадает в часы максимально возможного развития конвекции на исследуемой территории. В целом, термодинамические параметры атмосферы в районе аэрологического зондирования могут существенно отличаться от тех, что характерны для атмосферы в районе формирования опасного конвективного явления, удаленного от станции зондирования на расстояние более 150 км.

Для детальной оценки характеристик облачности, потоков влаги и распределения температуры использовались данные измерений комплекса инструментов зондирования атмосферы Advanced TIROS Operational Vertical Sounder (ATOVS) КА серии спутников «NOAA» о вертикальном профиле температуры и удельной влажности, полученные в Сибирском «Научно-исследовательском центре космической гидрометеорологии «Планета». Данные ATOVS имеют пространственное разрешение 0.25° по широте и долготе, для 42 уровней по изобарической высоте от 1050 до 0.1 гПа, из которых для исследования были использованы 20 нижних уровней (1000–100 гПа), примерно соответствующих тропосфере. Средние многолетние значения температуры воздуха на высоте 850 гПа в летний период составляют $7\text{--}8^\circ\text{C}$, как и в дни выпадения града. Области сформировавшегося теплого и влажного воздуха занимают не больше $3\text{--}4^\circ$ долготы (350–450 км). По средним многолетним значениям на высоте 1000 гПа масса водяного пара составляет 7.05 г/кг, в то время как в ситуациях с градом содержание влаги в воздухе увеличивается до 10–11 г/кг. Но с высотой удельная влажность резко уменьшается до 4 г/кг, что значительно меньше среднего многолетнего значения 5–6 г/кг.

По расчетам параметров конвективной неустойчивости благоприятные условия для образования конвекции были реже, чем наблюдались случаи выпадения града. Это говорит о том, что установленные пороговые значения индексов неустойчивости над территорией юго-востока Западной Сибири отличаются от принятой классификации. Поэтому для успешного прогноза следует определить другие пороговые значения. Формирование града было связано в большинстве случаев с прохождением холодных фронтов и фронтов окклюзии, реже с развитием внутримассовых конвективных процессов. Также замечено формирование града в вечернее и ночное время, ранее никогда не отмечавшееся на данной территории.

An analysis of characteristics of the convectively unstable layer for cases of hail formation in the south of Western Siberia

T.A. Anop (anop2013@yandex.ru)

National Research Tomsk State University, 36 Lenina str., 634050 Tomsk, Russia

The convectively unstable layer in days with hail formed in the south-eastern part of Western Siberia has been evaluated using thermodynamic parameters derived from aerological sounding taken by five stations at 0000 and 1200 UTC and satellite-retrieved temperature and humidity characteristics. For the period from 2015 to 2018 the total number of hail days with diameter of 5 mm and more amounted to 130 days (182 cases) on a basis of data from the WAREP (WeAther REPorts). For the application of thermodynamic parameters in accordance with aerological

sounding, we handpicked cases of hail precipitation which not exceeding more than 150 km from the sounding station and ± 1.5 hours since the observation time. Under fulfilling the set limits, the database with hail events diminished to 31 cases. The static atmospheric stability can be expressed in terms of the Lifted-index, the values of which in selected cases with hail showed the following ratio: unstable (13% of all cases) and slightly unstable (50%), and unstable atmosphere (37%). Derived arithmetically K-index used for determining the atmospheric state in 850–700 hPa layer via temperature-humidity parameters. K-index values are consistent with Lifted-index values, and the atmospheric state is classified as slightly unstable in 38% of cases, unstable (13%) and extremely unstable (12%). In the remaining 38% of cases the atmosphere is stable. The values of the CAPE index over the south-east of Western Siberia nearly did not bulk up a threshold corresponding to unstable state pursuant to accepted classification for this index. This is partly due to the fact that aerological sounding is not carried out in the hours when a peak of convection development occurs in the study area. In general, the thermodynamic parameters of the atmosphere around area of aerological sounding can differ significantly from those that are characteristic for the atmosphere in the place of the formation of hazardous convective phenomenon.

Based on NOAA ATOVS's vertical temperature and humidity profiles provided by the Siberian State Research Center "Planeta", a detailed assessment of cloudiness characteristics, moisture fluxes and temperature distribution has been accounted. The ATOVS data has 0.25° latitude $\times$ 0.25° longitude spatial resolution for 42 levels from 0.1 mb down to 1050 mb. We used 20 lower levels of 1000–100 mb, corresponding to the troposphere layer. The mean long-term values of air temperature at 850 mb during summer equal $7\text{--}8^\circ\text{C}$ as well as in days with hail. The zones of formed warm and humid air occupy no more $3\text{--}4^\circ$ of longitude (350–450 km). According to long-term mean values at 1000 mb, the specific humidity is 7.05 g/kg, while for hail events the moisture content in the air increases to 10–11 g/kg. With height, the specific humidity sharply decreases up to 4 g/kg, that is much less than average long-term values (5–6 g/kg).

By calculations of parameters of convective instability, favorable conditions for formation of convection were less than hail cases were observed. This suggests that accepted thresholds for instability indexes are not appropriate for the southeast of Western Siberia. Therefore, for high accuracy forecast, it is required to compute other threshold values. The hail formation associated in most cases with the passage of cold and occluded fronts, in lesser degree – with the development of intramass convective processes. Formation of a hail in evening and night time, earlier never noted in this territory, is also noticed.

Характеристики мезомасштабных кластеров юго-востока Западной Сибири

Жукова В.А. (jukowa.vera2017@yandex.ru), Кошикова Т.С.

Национальный исследовательский Томский государственный университет, пр. Ленина 36, 634050 Томск, Россия

По данным наземных и спутниковых приборов был проведен анализ мезомасштабных конвективных комплексов (МКК), выполнена оценка повторяемости за теплый период (апрель–сентябрь) с 2008 по 2018 гг. За теплый период с 2015 по 2018 годы были определены синоптические ситуации образования МКК и продуцирование опасных явлений, проведена оценка неустойчивости атмосферы с помощью индексов неустойчивости KIND и LIFT. С помощью расчетного метода MatLab были определены значения линейных размеров МКК. Для оценки повторяемости и параметров МКК использовался метод визуального дешифрирования облачности, данные радиометра MODIS на RGB-комposite (0.65; 0.45; 0.35 мкм). Область исследования условно располагалась между 50 и 60° с.ш. и 70 и 90° в.д., в которую входят 5 территориально-административных единиц, расположенных на юго-востоке Западной Сибири: Томская область, Новосибирская область, Кемеровская область, Республика Алтай и Алтайский край. В качестве объекта исследования рассматривались

МКК. В работе за МКК принимался массив кучево-дождевой облачности диаметром 50 км и более, исходя из того, что территория исследования не предрасположена к образованию МКК, и даже такой, небольшой по размерам облачный массив, способен генерировать опасные явления (гроза, град, ливни). Характерной особенностью МКК является большая продолжительность существования (около 10 ч), но его влияние на условия погоды может осуществляться до 24–36 часов. Для характеристики неустойчивости атмосферы в дни наличия МКК использовались результаты аэрологического зондирования в 00 и 12 ч по всемирному скоординированному времени (ВСВ) на 5 станциях (Александровское, Барабинск, Барнаул, Колпашево, Новосибирск) за период с 2015 по 2018 годы. Эти результаты содержат дискретную информацию о значениях температуры и влажности воздуха и характеристиках ветра во всей толще слоя атмосферы, в котором развивается конвекция над Западной Сибирью, а именно до высоты 10–15 км. Для характеристики конвекции использовались индексы, которые широко применяются для прогноза развития грозы, града, шквала и других опасных явлений погоды, а именно, индекс LIFT, описывающий скрытую нестабильность атмосферы, и индекс KIND, в котором, кроме стратификации температуры, присутствуют характеристики влажности.

За период 2008–2018 гг. на исследуемой территории суммарное количество дней с МКК составило 230 дней за весь период. Максимум повторяемости дней с МКК наблюдался в 2016 году и составил 31 день. Это объясняется аномалией 2016 года по многим метеорологическим параметрам. Минимальное количество дней с МКК отмечалось в 2010 году – 12 дней. Оценка неустойчивости атмосферы в дни с МКК показала, что по принятой классификации индекса неустойчивости LIFT в 53% случаев атмосфера слабо неустойчива. Отмечается только наличие ливней по территории. При анализе состояния атмосферы с использованием индекса KIND в 51% случаев состояние оценивалось как неустойчивое. МКК формируется, в основном, при неустойчивости средней и слабой степени и сопровождается наличием ливней и отдельных гроз по территории.

При сопоставлении синоптических ситуаций с формированием МКК выявлено, что доля их образования на холодном фронте составляет не менее 1/3 всех событий, а в периоды развития сильных меридиональных переносов эта доля заметно уменьшается. Совокупная доля вклада в частоту формирования МКК процессов окклюдирования во многом зависит от аномалий и к концу исследуемого периода составляет преобладающую часть процессов, образованных на фронте окклюзии. Процессы, которые формируются в стадии развития облачного вихря «след циклона» или мезомасштабном вихре, вызывают большую опасность, чем процессы, формируемые на фронтальных системах, так как они менее доступны для прогнозирования.

Characteristics of mesoscale convective systems in the south-east of Western Siberia

V.A. Zhukova (jukowa.vera2017@yandex.ru), T.S. Koshikova
National Research Tomsk State University, 36 Lenina str., 634050 Tomsk, Russia

Using ground-based and satellite tools, an analysis of mesoscale convective systems (MCSs) has been carried out. In the course of the study, we assessed the MCS repeatability for the warm season (April to September) for 2008–2018. Within the warm season of 2015–2018, the synoptic situations favorable to formation of MCSs which produced hazardous phenomena has been determined. To estimate of atmospheric stability we applied K-index and Lifted-index. On the basis of MatLab calculation method the linear dimensions of MCSs has been defined. The method used is the visual interpretation of clouds to assess the repeatability and parameters of MCSs in the south-eastern part of Western Siberia based on RGB composite imagery (0.65; 0.45; 0.35 μm) using MODIS data. The study area is limited to 50 and 60° N and 70 and 90° E, which includes five administrative units geographically located in the West Siberia: Tomsk Oblast, Novosibirsk Oblast, Kemerovo Oblast, The Altai Republic and Altai Krai. The object of study is the mesoscale

convective system (MCS), classified as a complex of Cumulonimbus clouds with a diameter of 50 km and more. It is important to note that the study area is not predisposed to the MCS formation, and even such a small cloud cluster is capable to generate the hazardous phenomena such as thunderstorm, hail, severe and prolonged downpours. The MCS specific feature is a long period of existence (about 10 hours), but its effect on weather conditions track up to 24–36 hours. To characterize the atmospheric stability during days with MCSs we used measurements taken by five upper-air stations (Aleksandrovskoe, Barabinsk, Barnaul, Kolpashevo, Novosibirsk) at 0000 and 1200 UTC from 2015 to 2018. The results of aerological sounding accommodate discrete information about the values of air temperature and humidity and wind characteristics within the entire thickness of the atmosphere, in which the convection over Western Siberia can develop, namely up to 10–15 km. As convection parameters, we applied a stability indices that are widely utilized to forecast the thunderstorm/hail/squall development etc. Thus the Lifted-index describes the latent instability of the atmosphere whereas the K-index is based on the vertical temperature lapse rate, and the amount and vertical extent of low-level moisture in the atmosphere.

During warm season the total number of days with MCSs equals 230 days for the entire period 2008–2018. The peak frequency of days with MCSs (31) was observed in 2016. This is due to the 2016 anomaly in many meteorological parameters. The minimum number of days with MCSs (12) was registered in 2010. The evaluation of atmospheric stability in days with MCSs has shown the following: the Lifted-index classifies the state of the atmosphere as slightly unstable (53% of all cases) in accordance with the generally accepted classification and only showers are observed throughout the territory. Using the K-index, in 51% of cases the state was assessed as unstable. The MCSs are mainly formed when the atmosphere is moderate and slightly unstable and their evolution is accompanied by the presence of showers and isolated thunderstorms across the territory.

By comparison of synoptic situations with MCSs formation it has been revealed that the MCSs share formed on the cold front equal a third of all events, and during the periods of development of strong meridional transfers this share considerably decreases. The total share of contribution of occlusion processes to the MCSs frequency largely depends on the anomalies and makes the prevailing part of the processes formed at the front occlusions to the end of the study period. Unlike the frontal cases, the processes formed at the stage of cloud vortex development or mesovortex have been found to be much more dangerous due to less possibility of prediction.

Оценка зон обледенения воздушных судов по данным спутникового зондирования

Болтушкина Е.М. (Boltushkina16@mail.ru), Волкова М.А.

Национальный исследовательский Томский государственный университет, пр. Ленина 36, 634050 Томск, Россия

Одной из основных тенденций развития метеорологического обеспечения авиации является развитие сверхкраткосрочного прогнозирования и наукастинга на основе численного прогноза, дистанционных измерений, данных сетей наземных станций, а также самолетных измерений и передачи метеорологической информации с бортов. Обледенение воздушного судна в полёте может создавать угрозу безопасности полета, а в отдельных случаях даже приводить к летному происшествию, так как обледенение ухудшает аэродинамические и летные характеристики воздушных судов. С начала 1990-х годов геостационарные и полярно-орбитальные метеорологические спутники используются для обнаружения обледенения в полете, а также проводятся научные исследования, посвященные диагнозу и прогнозу обледенения с применением спутниковых данных, особенно активно в США и странах ЕС, а также и на Европейской территории России. Следует отметить, что разработанные продукты на основе информации геостационарных спутников не могут быть однозначно использованы для территории Западной Сибири из-за ее географического положения (отсутствия доступной информации с геостационарных

спутников). В этой связи цель работы заключается в комплексной оценке случаев обледенения и возможности применения доступной информации с полярно-орбитальных спутников для диагноза зон обледенения на юго-востоке Западной Сибири. Для анализа обледенения воздушных судов были рассмотрены данные метеорологических наблюдений из дневников погоды АВ-6 с АМСГ Томск, сообщения бортовой погоды (PIREP) за период с 2011 по 2018 гг. в районе аэродрома Томск и AIREP в зоне ответственности Новосибирского РЦ ЕС ОрВД за 2018 год. Также спутниковая информация (продукты MOD021, MODATML2) со спектрорадиометра MODIS, система зондирования ATOVS полярно-орбитальных космических аппаратов Terra и Aqua [<https://modis-atmos.gsfc.nasa.gov>].

За период с 2011 по 2018 годы наблюдалось 394 случая с обледенением в районе аэродрома Томск, из которых умеренное обледенение наблюдалось в 52% случаев, слабое – в 43%, сильное – в 5% от общего числа случаев. По данным AIREP за 2018 год было зафиксировано 414 случаев с обледенением, из которых умеренное обледенение наблюдалось в 69%, слабое – в 23%, сильное – в 8% случаев. Анализ метеорологических данных при обледенении, показал, что наиболее часто (77%) наблюдались кучево-дождевые облака в комплексе с высокослоистыми и высоко-кучевыми. Обледенение в большинстве случаев сопровождалось различными видами атмосферных осадков (снег, ливневый снег (63%), дождь, ливневый дождь, переохлажденная морось), а также переохлажденным туманом и дымкой.

При оценке зон обледенения с применением спутникового зондирования обычно используется информация о структуре облачности, ее высоте и характеристиках влажности (термодинамическая фаза облака, количество переохлажденной воды, высота и температура верхней границы облаков, интегральное содержание воды, эффективный размер капель). В нашей работе для определения пространственной локализации полей облачности с наблюдавшимися и потенциальными зонами обледенения были использованы следующие характеристики со спутников: содержание воды любого фазового состояния на каналах 1.375 и 8.5 мкм, температура верхней границы облаков, интегральная облачная влага. По данным системы зондирования ATOVS выделялись вертикальные профили температуры и удельной влажности, которые затем можно использовать для сверхкраткосрочного прогноза зон обледенения с использованием различных физико-статистических закономерностей (метод К. Годске и др.). Таким образом, применение спутниковой информации для обнаружения фактических и потенциальных зон обледенения особенно востребовано для территорий, не охваченных сетью аэрологического зондирования, и может стать важнейшей компонентой развития сверхкраткосрочного прогнозирования и наукастинга опасных явлений для территории Западной Сибири.

Работа выполнена в рамках гранта РФФИ № 18-45-700010 p-a.

Evaluation of zones of aircraft icing according to satellite data

Е.М. Boltushkina (Boltushkina16@mail.ru), М.А. Volkova

National Research Tomsk State University, 36 Lenina str., 634050 Tomsk, Russia

One of the main trends in the development of meteorological support for aviation is the development of ultra-short-term forecasting and nowcasting, based on numerical forecast, remote measurements, data from networks of ground stations, as well as aircraft measurements and the transmission of meteorological information from the boards. Aircraft icing in flight can pose a safety risk and in some cases, even lead to a flight accident, as the icing affects the aerodynamic and flight characteristics of aircraft. Since the early 1990s, geostationary and polar-orbiting meteorological satellites have been used to detect airborne icing. And also research is being conducted on the diagnosis and prediction of the icing using satellite data, especially actively in the USA and EU countries, as well as on the European territory of Russia. Developed products based on information of geostationary satellites cannot be used for the territory of Western Siberia due to its geographical location (lack of available information from geostationary satellites). In this regard,

the purpose of the work is to comprehensively assess cases of icing and the possibility of using available information from polar-orbital satellites for the diagnosis of icing zones in the south-east of Western Siberia. For the analysis of the aircraft icing, the data of meteorological observations from weather diaries AV-6 from AMSG Tomsk, aircraft pilot reports (PIREP) for the period from 2011 to 2018 near the Tomsk aerodrome were considered. AIREPs in the area of responsibility of the Novosibirsk RC ATM for 2018, and satellite information (products MOD021, MODATML2) from the MODIS spectroradiometer, the ATOVS sensing system of the Terra and Aqua polar orbiting spacecraft [<https://modis-atmos.gsfc.nasa.gov>] were also studied.

During the period from 2011 to 2018, 394 cases with icing were observed around the Tomsk airfield, from which the moderate icing was noted in 52% of cases, the light icing – in 43%, and the severe icing – in 5%. According to AIREP for 2018, 414 icing cases were observed, from which the moderate icing was observed in 69%, light icing – in 23%, and the severe icing – in 8% of cases. Analysis of meteorological data during icing showed that Cumulonimbus clouds were observed most often (77%) in combination with Altostratus and Altocumulus clouds. In most cases, the icing was accompanied by various types of precipitation (snow, heavy snow (63%), rain, heavy rain, supercooled drizzle), as well as supercooled fog and haze.

When assessing the icing areas using satellite sensing, information on cloud structure, its height and humidity characteristics (thermodynamic phase of the cloud, amount of supercooled water (SLW), height and temperature of the cloud upper boundary, cloud water path (CWP), effective droplet size) is usually used. . In our work, the following satellite characteristics were used to determine the spatial localization of cloud fields with observed and potential icing zones: water content in any phase state (channels of 1.375 and 8.5 μm), cloud-top temperature, integral cloud moisture. Using the ATOVS data, vertical temperature and specific humidity profiles were distinguished. Then these results can be applied for ultra-short-term forecasting of icing zones using various physico-statistical patterns (K. Godske method and others). Thus, the use of satellite information for detecting actual and potential icing zones is especially in demand for areas which are not covered by the upper-air sounding network and can become an essential component of the development of the ultra-short-term forecasting and nowcasting of hazardous phenomena for the territory of Western Siberia.

The work was performed as part of the RFBR grant No. 18-45-700010 r-a.

Возможность применения спутниковых данных для диагноза зон сильных осадков на юго-востоке западной Сибири

Титовская А.А. (nastushecka-titov@mail.ru), Волкова М.А.

Национальный исследовательский Томский государственный университет, пр. Ленина 36, 634050 Томск, Россия

Влияние опасных гидрометеорологических явлений (ОЯ) на развитие экономики России за последнее десятилетия значительно усилилось, что требует их системного исследования для предотвращения потерь в экономическом и социальном развитии государства и отдельных регионов. В условиях редкой наблюдательной сети на рассматриваемой территории использование спутниковой информации для диагноза и сверхкраткосрочного прогнозирования сильных осадков представляет ряд преимуществ, таких как высокое пространственное разрешение, мультиспектральные возможности и широкий пространственный охват. Целью данной работы является пространственно-временной анализ случаев с опасными явлениями и комплексом метеорологических явлений (КМЯ), обусловленных атмосферными осадками на территории юго-востока Западной Сибири, а также оценка возможности применения спутниковой информации для обнаружения фактических и потенциальных зон с сильными осадками. В работе были использованы данные о случаях «очень сильный дождь» и «сильный дождь», выбранные из 8-срочных наблюдений за атмосферными осадками (из ВНИИГМИ-МЦД <http://meteo.ru/data/>) за период с 1961 по 2018 годы на 25 метеорологических станциях

Томской, Кемеровской, Новосибирской областей и Алтайского края. Были привлечены штормовые сообщения WAREP на 127 станциях Западно-Сибирского УГМС за 2015–2018 гг. Для диагноза условий формирования зон с сильными осадками были использованы данные спутникового зондирования со спектрорадиометра MODIS (КА Terra, Aqua) [<https://modis-atmos.gsfc.nasa.gov/>]. На территории юго-востока Западной Сибири к КМЯ «сильный дождь» и ОЯ «очень сильный дождь» относится количество осадков ≥ 35 и ≥ 50 мм за период не более 12 часов, соответственно [<http://www.meteo-nsu.ru/>].

Исследование показало, что случаи сильных осадков для рассматриваемой территории явление достаточно редкое, так по данным из ВНИИГМИ-МЦД за рассматриваемый период (1961–2018 гг.) было 222 случая с КМЯ и 62 случая с ОЯ. По данным WAREP (2015–2018 гг.) зафиксировано 58 случаев с КМЯ и 25 случаев с ОЯ, 7 из которых нанесли экономические потери.

Для анализа условий формирования зон опасных явлений с применением спутникового зондирования были рассмотрены случаи с ОЯ за 2018 год (26–27 июня, 14 и 28 июля, 26 августа). Анализ спутниковой информации позволил выявить тип облачных систем, оптическую толщину, верхнюю границу облачности и общий влагозапас. По данным монтажа RGB композитных снимков (1, 4 и 3 каналов) было получено, что 26 июня над Новосибирской областью наблюдался облачный мезовихрь, в зоне действия которого на станции Баган выпало 96 мм осадков за 12 час. Над рассматриваемой территорией 27 июня и 26 августа проходила облачная система атмосферных фронтов, при этом на станции Новостройка (Кемеровская обл.) и станции Каргасок (Томская обл.), выпало 92 и 64 мм, соответственно. Мезомасштабные конвективные комплексы наблюдались 14 июля над Алтайским краем, где на станции Хабары выпало 72 мм. На станции Тисуль 28 июля зафиксировано 80 мм осадков, обусловленные облачным следом циклона. Использование облачных продуктов ATML2 показало, что при рассмотренных ОЯ оптическая толщина (optical thickness) облачности составила 125–150, что соответствует кучево-дождевой облачности с высокой водностью при этом верхняя граница (top height) облачности варьирует в пределах 9200–12000 м. Общий влагозапас (water Path) лежит в диапазоне от 1090 до 2950 г/м², что также соответствует кучево-дождевой облачности с высоким влагосодержанием. В дальнейшем выявленные и дополненные статистикой характеристики могут использоваться для создания обобщенного продукта для диагноза и сверхкраткосрочного прогноза сильных осадков.

Работа выполнена в рамках гранта РФФИ № 18-45-700010 p-a.

Possibility of application of satellite data for the diagnosis of heavy precipitation zones in the south-east of Western Siberia

A.A. Titovskaya (nastushecka-titov@mail.ru), M.A. Volkova

National Research Tomsk State University, 36 Lenina str., 634050 Tomsk, Russia

The influence of dangerous hydrometeorological phenomena on the development of the Russian economy over the past decade has increased significantly, which requires their systematic research to prevent losses in the economic and social development of the state and individual regions. Under the conditions of a rare observational network in the territory under consideration, the use of satellite information for the diagnosis and ultra-short-term forecasting of heavy precipitation presents a number of advantages, such as high spatial resolution, multispectral capabilities, and wide spatial coverage. The purpose of this work is a spatio-temporal analysis of cases with hazardous phenomena caused by precipitation in the south-east of Western Siberia, as well as an assessment of the possibility of using the satellite information to detect actual and potential areas with heavy precipitation. We used data on cases of “very heavy rain” and “heavy rain” selected from 8-urgent observations of precipitation (from VNIIGMI-MTSD <http://meteo.ru/data/>) for the period from 1961 to 2018 at 25 meteorological stations of Tomsk, Kemerovo, Novosibirsk regions and Altai Territory. WAREP storm reports at 127 stations of the

West Siberian UGMS for 2015–2018 were attracted. For the diagnosis of the conditions of formation of zones with heavy precipitation, satellite sensing data were used from a MODIS spectroradiometer (Terra, Aqua) [<https://modis-atmos.gsfc.nasa.gov/>]. On the territory of the south-east of Western Siberia, “heavy rain” and “very heavy rain” include precipitation ≥ 35 and ≥ 50 mm for a period of not more than 12 hours, respectively [<http://www.meteo-nso.ru/>].

The study has shown that cases of heavy precipitation for the territory under consideration are quite rare, so according to the data from the All-Russian Research Institute of Hydrometeorology and Environmental Information for the period under consideration (1961–2018), 222 cases with “heavy rain” and 62 cases with “very heavy rain” were observed. According to WAREP (2015–2018), 58 cases with “heavy rain” and 25 cases with “very heavy rain” were recorded, 7 of which caused economic losses.

To analyze the conditions for the formation of hazardous areas using satellite sensing, we considered cases with “very heavy rain” for 2018 (June 26–27, July 14 and 28, August 26). Analysis of satellite information revealed the type of cloud systems, the optical thickness, the upper cloud limit and the total moisture content. According to the montage of RGB composites (1, 4, and 3 channels), it was obtained that on June 26, a cloudy mesovortex was observed over the Novosibirsk region. At Bagan station, that is in the mesovortex coverage area, 96 mm of precipitation fell out over 12 hours. The cloudy system of the atmospheric fronts passed over the territory under consideration on June 27 and August 26, and 92 and 64 mm fell at the Novostroyka station (Kemerovo region) and Kargasok station (Tomsk region), respectively. The mesoscale convective complexes were observed on July 14 over the Altai Territory, where 72 mm fell at the Khabary station. On July 28, 80 mm of precipitation due to the cloudy trail of the cyclone was recorded at Tisul station. The use of ATML2 cloud products showed that, under the considered hazardous phenomena, the optical thickness of the cloudiness was 125–150, which corresponds to cumulonimbus clouds with high water content, while the top height of the cloudiness varied between 9200 and 12000 m. Water Path lied in the range from 1090 to 2950 g/m², which also corresponds to cumulonimbus clouds with high moisture content. In the future, the characteristics identified and supplemented by statistics can be used to create a generalized product for diagnosis and ultra-short-term forecast of heavy precipitation.

The work was performed as part of the RFBR grant No. 18-45-700010 r-a.

Изменения оптических характеристик дымового аэрозоля при дальнем переносе в период аномального задымления Европейской территории России летом 2016 года по результатам анализа данных спутниковых измерений

Коновалов И.Б.¹ (kopov@ipfran.ru), Головушкин Н.А.¹, Кузнецова И.Н.²,
Архангельская А.А.²

¹Институт прикладной физики РАН, ул. Ульянова 46, 603950 Нижний Новгород, Россия

²Гидрометеорологический научно-исследовательский центр РФ, Б. Предтеченский пер. 11-13, 123242 Москва, Россия

Недостаточное знание трансформаций оптических и микрофизических характеристик дымового аэрозоля в процессе его атмосферной эволюции является одним из существенных источников неопределенностей, связанных с модельными расчетами радиационного баланса в атмосфере. С целью получения новых данных о таких трансформациях, в настоящей работе выполнен анализ данных спутниковых измерений инструментами MODIS и OMI в период дальнего переноса дымовых шлейфов от мощных лесных пожаров в Сибири, наблюдавшегося летом 2016 г. и приведшего к появлению оптически плотного задымления над Европейской территорией России (ЕТР) [1]. Наряду с данными спутниковых измерений полной и абсорбционной аэрозольных оптических толщин (AOT), в исследовании использовались данные соответствующих модельных расчетов [2], которые, с одной стороны, позволили более точно выделить вклад сибирских пожаров в возмущения полной и

абсорбционной АОТ, наблюдаемые над ЕТР, а с другой стороны, учесть потери аэрозоля вследствие сухого осаждения и вымывания. В результате выполненного анализа установлено, что дальний многочасовой перенос дымовых шлейфов во время рассмотренного эпизода привел к уменьшению как полной, так и абсорбционной АОТ относительно содержания химически инертного аэрозольного трассера. Выявленные изменения находятся в согласии с имеющимися данными самолетных измерений в других регионах мира и могут быть объяснены фотохимическим разрушением органического углерода и его поглощающей компоненты – коричневого углерода.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №19-77-20109).

1. Ситнов С.А., Мохов И.И., Горчаков Г.И. Связь задымления атмосферы европейской территории России летом 2016 года с лесными пожарами в Сибири и аномалиями атмосферной циркуляции // Доклады Академии наук. 2017. Т. 472, № 4. С. 456–461.
2. Konovalov I.B., Lvova D.A., Beekmann M. et al. Estimation of black carbon emissions from Siberian fires using satellite observations of absorption and extinction optical depths // Atmos. Chem. Phys. 2018. V. 18. P. 14889–14924.

Changes in the optical properties of biomass burning aerosol during its long-range transport in the period of abnormal haze in European Russia in summer of 2016: the analysis of satellite observations

I.B. Konovalov¹ (konov@ipfran.ru), N.A. Golovushkin¹, I.N. Kuznetsova²,
A.A. Arkhangelskaya²

¹*Institute of Applied Physics RAS, 46 Ulyanov str., 603950 Nizhniy Novgorod, Russia*

²*Hydrometeorological Research Center of Russia, 11-13 B. Predtechensky per., 123242 Moscow, Russia*

Insufficient knowledge of transformations of the optical and microphysical characteristics of biomass burning (BB) aerosol during its atmospheric evolution is one of the significant sources of uncertainties associated with model simulations of the radiative balance in the atmosphere. In order to obtain new insights into such transformations, we analyzed the data of satellite observations performed with the MODIS and OMI instruments during the episode of the long-range transport of BB smoke plumes from intense forest fires in Siberia; the episode was observed in summer 2016 and resulted in the appearance of optically dense haze over the European territory of Russia (ETR) [1]. Along with the satellite measurements of the extinction and absorption aerosol optical thicknesses (AOTs), the study used the data of the corresponding model simulations [2] which, on the one hand, made it possible to more accurately isolate the contribution of Siberian fires to the perturbations of the extinction and absorption AOTs observed over ETR, and, on the other hand, to take into account BB aerosol losses due to dry and wet deposition. As a result of the analysis performed, it was established that the long-range transport of BB smoke plumes during the considered episode resulted in a decrease in both the extinction and absorption AOTs relative to the column amount of a chemically inert BB aerosol tracer. The revealed changes are in agreement with the available data of aircraft measurements in other regions of the world and can be explained by the photochemical destruction of particulate organic compounds, including the so called brown carbon.

The study was funded by the Russian Science Foundation (project No. 19-77-20109).

1. Sitnov S.A., Mokhov I.I., Gorchakov G.I. The link between smoke blanketing of European Russia in summer 2016, Siberian wildfires and anomalies of large-scale atmospheric circulation // Doklady Earth Sciences. 2017. V. 472, No 2. P. 190–195.
2. Konovalov I.B., Lvova D.A., Beekmann M. et al. Estimation of black carbon emissions from Siberian fires using satellite observations of absorption and extinction optical depths // Atmos. Chem. Phys. 2018. V.18. P. 14889–14924.

Влияние аэрозоля на характеристики подстилающей поверхности, измеряемые Sentinel-2A в регионе Нижнего Поволжья

Фирсов К.М.¹ (fkm@volsu.ru), Чеснокова Т.Ю.², Размолов А.А.¹, Клиточенко И.И.¹

¹Волгоградский государственный университет, Университетский пр. 100, 400062 Волгоград, Россия

²V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics SB RAS, 1 Ac. Zuev sq., 634021 Tomsk, Russia

В настоящее время атмосферная коррекция не всегда обеспечивает высокое качество спутниковых снимков. Ключевой проблемой здесь является замутнение атмосферы обусловленное поглощением водяным паром, озоном, а также аэрозольное и молекулярное рассеяние. В работе приведены оценки погрешности коэффициентов спектральной яркости поверхности для типичных оптико-метеорологических условий региона Нижнего Поволжья. Метеорологическое состояние атмосферы задавалось согласно данным реанализа, а оптические характеристики аэрозоля согласно данным со спутников TERRA и AQUA.

Моделирование проводилось на основе разработанного нами комплекса компьютерных программ, который включает line-by-line расчеты спектров поглощения, параметризация функций пропускания для широкополосных приемников излучения на основе рядов экспонент, используется метод корреляционного k -распределения. Опыт показывает, что 5–10 членов ряда экспонент обеспечивают высокую точность расчета функции пропускания, погрешность не выше 1%. Оптическую толщину в показателе экспоненты можно рассматривать, как обычную оптическую толщину на некоторой специально выбранной частоте. Для того, чтобы корректно учесть молекулярное поглощение в заданном спектральном диапазоне необходимо решить уравнение переноса для этих 5–10 длин волн, а затем провести суммирование этих решений с соответствующими весами. Для того, чтобы обеспечить высокую скорость расчетов первоначально создается база данных эффективных коэффициентов поглощения для заданных значений температур и давлений, реализуемых в атмосфере Земли для каждого канала спутникового сенсора, а при проведении массовых расчетов для реального профиля температур, давлений и концентраций газов, реализуемых в атмосфере Земли нужный профиль коэффициента поглощения получается путем интерполяции. Следует отметить, что разработанный нами подход позволяет рассчитать параметры рядов экспонент непосредственно на основе line-by-line расчетов, а также учесть аппаратную функцию регистрирующей аппаратуры и спектральный ход Солнечной постоянной.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Администрации Волгоградской области в рамках научного проекта № 18-45-340002 p_a»

Aerosol impact on the underlying surface characteristics measured by Sentinel-2A in Lower Volga region

K.M. Firsov¹ (fkm@volsu.ru), T.Yu. Chesnokova², A.A. Razmolov¹, I.I. Klitochenko¹

¹Volgograd State University, 100 Universitetsky pr., 400062 Volgograd, Russia

²V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics SB RAS, 1 Ac. Zuev sq., 634021 Tomsk, Russia

At present, the atmospheric correction not always provides the high quality of satellite images of the surface. The key problem is a haziness of the atmosphere due to water vapor and ozone absorption, and aerosol and molecular scattering. In the work, the error estimations of spectral brightness coefficients of the surface for typical optical-meteorological conditions of Lower Volga region are presented. The meteorological models of the atmosphere are taken from reanalysis data, and optical characteristics of aerosol from the data of TERRA and AQUA satellites.

The simulation is carried out with use of our developed program package which includes line-by-line calculation of absorption spectra, parameterization of the transmission function for broadband radiation detector on basis of exponents series and k -correlation method. The experience shows that 5–10 terms of series provide the transmission function calculation with error less than 1%. The optical depth in the exponent can be considered as usual optical depth at a specially selected wavelength. In order to take correctly the molecular absorption into account in the spectral

interval, it should solve the radiative transfer equation for these 5–10 wavelengths and then summarize these solutions with corresponding weights. To calculate with high speed, the database of effective absorption coefficients was created for values of temperatures and pressures, observed in the Earth atmosphere, for each channel of the satellite sensor. Target profile of the absorption coefficient for real atmospheric profiles of temperatures, pressures and gases concentrations is calculated by interpolation of the effective coefficients in the database. It should be noted that our developed approach allows the calculation of the exponents series parameters directly on basis of line-by-line calculation, and it takes into account the apparatus function of the sensor and the extraterrestrial solar spectrum.

The research was supported by Russian Foundation for Basic Research (№ 18-45-340002 p_a), Administration of Volgograd Region, and Program of Fundamental Scientific Research of Russian Academy of Science, (project IX.138.1.4).

Климатология смерчей в лесной зоне России: изучение по спутниковым данным о ветровальных нарушениях лесного покрова

Чернокульский А.В.¹ (a.chernokulsky@ifaran.ru), Шихов А.Н.²

¹Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Пыжевский пер. 3, 119017 Москва, Россия

²Пермский государственный университет, ул. Букирева 15, 614990 Пермь, Россия

До недавнего времени оценки частоты возникновения и возможной интенсивности смерчей в лесной зоне России имели весьма приблизительный характер в связи с низкой плотностью населения. С появлением в открытом доступе многолетних архивов спутниковых снимков Landsat, а также данных проекта Global Forest Change за период с 2001 г. появилась возможность существенно уточнить климатологию смерчей в лесной зоне. На основе имеющихся спутниковых данных был разработан метод идентификации смерчевых треков в бореальной лесной зоне. Метод позволяет объективно (вне зависимости от плотности населения и наблюдательной сети) оценивать климатологию относительно сильных смерчей (F1 и более по шкале Фуджиты). Метод основан на выявлении узких и вытянутых лесоповалов по данным Landsat (на основе продукта Global Forest Change) и их дальнейшей верификации по спутниковым снимкам сверхвысокого разрешения с открытых картографических сервисов. На основе применения данного метода была получена информация о 320 случаях смерчей в лесной зоне России за период 2001–2017 гг., большинство из которых ранее были неизвестны. База данных опубликована на картографическом сервисе <http://tornado.maps.psu.ru>. Обновление данных продолжается и в настоящее время.

Оценены основные характеристики смерчей (длина, средняя и максимальная ширина). На основе дополнительных данных (спутниковые данные MODIS и данные реанализа CFSR) восстановлены даты большинства смерчей или диапазоны дат с точностью до месяца. На основе распределения Вейбулла в зависимости от ширины и длины смерча оценена вероятность превышения интенсивности смерча по шкале Фуджиты. Плотность смерчей в лесной зоне России, согласно новым данным, существенно выше, чем было известно до этого, особенно в северных регионах между 60° и 65° с.ш [1]. Выявлено несколько неизвестных ранее случаев смерчей с длиной трека 50 км и более, и максимальной шириной до 1000–2000 м.

Также по архивным спутниковым снимкам Landsat выполнен анализ разрушительной вспышки смерчей 1984 г. в центре Европейской части России. Точное число и характеристики треков этих смерчей не были известны до недавнего времени. Поиск ветровалов производился на основе визуального сравнения снимкой до и после события, с последующим уточнением по нормализованному индексу инфракрасной разности (NDII). Подтверждено прохождение восьми смерчей, определены их положение, ширина и длина смерчевого трека. Оценена интенсивность смерчей (на основе всех доступных источников информации, а также на основе эмпирической связи с длиной и шириной смерча).

Установлено, что данная вспышка смерчей была одной из самых сильных в Европе и может быть отнесена к верхнему квартилю американских смерчевых вспышек. Наибольшая ширина смерчевого ветровала составила 1740 м, наибольшая длина – в диапазоне от 81.5 до 85.9 км. На основе этой вспышки показано, что существующие базы данных об исторических смерчах в России имеют тенденцию переоценивать длину смерчевого трека (для очень длинных треков) и недооценивать максимальную ширину [2].

Исследование выполнено при поддержке РНФ (проект № 18-77-10076).

1. Shikhov A.N., Chernokulsky A.V. A satellite-derived climatology of unreported tornadoes in forested regions of northeast Europe // *Rem. Sens. Env.* 2018. V. 204. P. 553–567.
2. Chernokulsky A.V., Shikhov A.N. 1984 Ivanovo tornado outbreak: Determination of actual tornado tracks with satellite data // *Atm. Res.* 2018. V. 207. P. 111–121.

Climatology of tornadoes in the forest zone of Russia: satellite-based study of tornado-induced windthrows

A.V. Chernokulsky¹ (a.chernokulsky@ifaran.ru), A.N. Shikhov²

¹A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics RAS, 3 Pyzhevsky per, 119017 Moscow, Russia

²Perm State University, 15 Bukireva str., 614990 Perm, Russia

Until recently, the estimates of the frequency and intensity of tornadoes in the forest zone of Russia were very approximate due to the low population density. After the publication of the free-available archives of Landsat satellite images, it became possible to significantly clarify the climatology of tornadoes in the forest zone. We developed a method of identification of tornado damage tracks in forests with satellite data. The method enables an objective estimate (i.e. independently of population density and observational networks) of tornado climatology in forested regions. The method is based on the identification of narrow and elongated areas as forest disturbances obtained using Landsat satellite images and Global Forest Change (GFC) data. These areas were subsequently verified with high-resolution satellite images for verification of a tornadic cause of forest damage [1].

The main characteristics of tornadoes such as path length, average and maximum width were estimated. Landsat and MODIS satellite images, weather station observations and reanalysis data were additionally involved in order to determine tornado dates. A minimum F-scale tornado intensity was estimated by a Weibull distribution model using information on tornado path lengths and widths. On the basis of the developed method, we found more than 300 tornado events in the forest zone of Russia, most of them were previously unknown. The database is published on the web map service <http://tornado.maps.psu.ru>. The estimated density of tornadoes in the European Russia is significantly higher, than in previous studies, especially in the northern part (between 60° and 65° N). We found some strong tornadoes with path length up to 50 km, path width up to 1000 m.

Also we used Landsat archive to discover tornado-induced forest disturbances and restore actual characteristics of tornadoes of the devastating 1984 Ivanovo tornado outbreak. We determined the tornado-induced windthrows by visual comparison of satellite images and specified them with Normalized Difference Infrared Index. We confirmed the occurrence of eight tornadoes during the outbreak and determined their location, path width and length. Fujita-scale intensity of confirmed tornadoes was estimated based on the related literature corpus including previously omitted sources. In addition, information on tornado path lengths and widths was used to estimate minimal tornado intensity for those tornadoes that passed no settlements. In total, the Ivanovo outbreak includes 8–13 tornadoes. The outbreak was one of the strongest in Europe and can be attributed to the upper quartile of U.S. outbreaks. Characteristics of certain tornadoes within the Ivanovo outbreak are exceptional for Russia. The widest tornado path during the Ivanovo outbreak is 1740 m; the longest is from 81.5–85.9 km. With the example of the Ivanovo outbreak, we have shown that existing databases on historical Russian tornadoes tend to overestimate tornado path length (for very long tornadoes) and underestimate maximum tornado path width [2].

The study was funded by the RSF project № 18-77-10076.

1. Shikhov A.N., Chernokulsky A.V. A satellite-derived climatology of unreported tornadoes in forested regions of northeast Europe // Rem. Sens. Env. 2018. V. 204. P. 553–567.
2. Chernokulsky A.V., Shikhov A.N. 1984 Ivanovo tornado outbreak: Determination of actual tornado tracks with satellite data // Atm. Res. 2018. V. 207. P. 111–121.

Картографическая база данных ветровалов в лесной зоне Европейской России и Урала за 1986–2017 гг. на основе спутниковых наблюдений

Чернокульский А.В.¹ (a.chernokulsky@ifaran.ru), Шихов А.Н.²

¹Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Пыжевский пер. 3, 119017 Москва, Россия

²Пермский государственный университет, ул. Букирева 15, 614990 Пермь, Россия

Ветровалы являются одним из основных видов ущерба от конвективных опасных явлений (шквалов и смерчей) в лесной зоне. Также они могут быть вызваны сильным ветром в сочетании с налипанием мокрого снега или гололедом. С появлением в открытом доступе архивов спутниковых данных возможности исследования ветровалов значительно расширились. Анализ ветровалов представляет собой ценнейший источник информации о ранее неизвестных случаях шквалов и смерчей, а также существенно повышает репрезентативность климатологии этих явлений, особенно в районах с редкой сетью наблюдений.

Целью исследования является создание картографической базы данных о случаях ветровалов в лесной зоне Европейской России и Урала за период с 1986 по 2017 гг. Мы использовали данные Global Forest Change [1] для поиска и автоматизированного выделения ветровалов за период 2001–2017 гг., и данные Eastern Europe Forest Cover Change [2] за период с 1986 по 2000 гг. Некоторые ветровалы были выделены или уточнены по разновременным снимкам Landsat (вручную или автоматизированно), или по снимкам сверхвысокого разрешения с открытых картографических сервисов. Даты погодных явлений, вызвавших ветровалы, уточнялись по полному архиву снимков Landsat на основе анализа данных метеостанций, сообщений СМИ и других источников. Тип явления, вызвавшего ветровал, определялся с учетом даты появления ветровала на основе его геометрических признаков и анализа снимков сверхвысокого разрешения по методике [3]. Из анализа были исключены шкваловые ветровалы площадью менее 25 га и смерчевые ветровалы площадью менее 5 га, главным образом по причине объективных сложностей с определением даты появления для небольших участков ветровалов.

В настоящее время заполнение базы данных продолжается. Всего выделено уже свыше 600 случаев ветровалов в лесной зоне Европейской части России и Урала, на общей площади свыше 280 тыс. га. Из них 312 вызваны смерчами, 281 – шквалами и 10 – отложениями мокрого снега. При этом площадь шкваловых ветровалов приблизительно в 9 раз выше, чем площадь ветровалов, вызванных смерчами. Наиболее крупные ветровалы за весь 30-ти летний период в Европейской части России были вызваны сильными шквалами 27.06.2010 г. и 29–30.07.2010 г. Их общая площадь достигает 100 тыс. га. Характерно, что оба случая наблюдались на периферии долгоживущего блокирующего антициклона в условиях экстремально жаркой погоды. Помимо контуров ветровалов и их основных атрибутов (дата возникновения, тип, длина, ширина, характер повреждений растительности), база содержит данные метеостанций о скорости порывов ветра, зафиксированной вблизи мест возникновения ветровалов. Полученные оценки указывают на то, что сплошные ветровалы в большинстве случаев вызываются только особо сильными шквалами со скоростью ветра ≥ 30 м/с, или смерчами.

Исследование выполнено при поддержке РФФИ (проект № 19-05-00046-а) и РНФ (проект № 18-77-10076).

1. Hansen M.C., P.V. Potapov, R. Moore et al. High-Resolution Global Maps of 21st-Century Forest Cover Change // Science. 2013. V. 342. P. 850–853.

2. Potapov P.V., Turubanova S.A., Tyukavina A. et al. Eastern Europe's forest cover dynamics from 1985 to 2012 quantified from the full Landsat archive // *Rem. Sens. Env.* 2015. V. 159. P. 28–43.
3. Shikhov A.N., Chernokulsky A.V. A satellite-derived climatology of unreported tornadoes in forested regions of northeast Europe // *Rem. Sens. Env.* 2018. V. 204. P. 553–567.

A GIS database of windthrow events in the forests of the European Russia and Ural for 1986–2017

A.V. Chernokulsky¹ (a.chernokulsky@ifaran.ru), A.N. Shikhov²

¹A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics RAS, 3 Pyzhevsky per, 119017 Moscow, Russia

²Perm State University, 15 Bukireva str., 614990 Perm, Russia

Windthrows are one of the main types of damage caused by severe convective storms and tornadoes in the boreal forests. Also windthrows can be caused by strong wind with snow/ice accumulation. The possibilities of the study of windthrows have significantly improved with the publication of the free-available Landsat archive. Analysis of windthrows is a valuable data source on previously unknown squall and tornado events, which significantly improve their climatology, especially in areas with a rare network of observations.

The aim of the study is to create the GIS database of windthrow events occurred in the European Russia and Ural region between 1986 and 2017. We used Global Forest Change dataset [1] to search and automatic delineate the windthrows occurring between 2001 and 2017, and Eastern Europe Forest Cover Change [2] for the 1986–2000. Several windthrows were delineated manually by Landsat images or by high-resolution images. The dates (or the ranges of dates) of windthrows events were estimated by full Landsat archive, and also with the use of weather stations observations and media reports. The type of weather phenomena, that induced forest damage (squall, tornado or snow storm) was estimated with the use of high-resolution images obtained from the free-available web services, according to the method [3]. The threshold minimum area for tornado-induced windthrows was taken equal to 5 ha, and for other windthrows – 25.0 ha, since the determining of the occurrence dates is problematic for small or fragmented windthrows. In total, we found more than 600 windthrows in the forest zone of the European Russia and Ural between 1986 and 2017. Tornadoes, squalls and snow storms induced 312, 281 and 10 windthrows respectively. However, the total area of squall-induced windthrows is 8 times higher than the same of tornado-induced windthrows. The most significant forest damage (about 100 thous. ha) was caused by two severe squalls, which have been occurred 27 June 2010 and 29–30 July 2010. Besides the windthrows areas and their attributes, the database contains the weather station reports for the days when the windthrows have been occurred. At present, the formation of database content continues.

The study was funded by the RFBR project No 19-05-00046-a and RSF project No 18-77-10076.

1. Hansen M.C., P.V. Potapov, R. Moore et al. High-Resolution Global Maps of 21st-Century Forest Cover Change // *Science*. 2013. V. 342. P. 850–853.
2. Potapov P.V., Turubanova S.A., Tyukavina A. et al. Eastern Europe's forest cover dynamics from 1985 to 2012 quantified from the full Landsat archive // *Rem. Sens. Env.* 2015. V. 159. P. 28–43.
3. Shikhov A.N., Chernokulsky A.V. A satellite-derived climatology of unreported tornadoes in forested regions of northeast Europe // *Rem. Sens. Env.* 2018. V. 204. P. 553–567.

Компьютерное моделирование общего содержания СО и СН₄ над Евразией и сопоставление с экспериментальными данными

Штабкин Ю.А. (yuryshtabkin@ifaran.ru), Ракитин В.С., Скороход А.И., Еланский Н.Ф.

Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Пыжевский пер. 3, 119017 Москва, Россия

Представлены результаты анализа данных численного моделирования общего содержания (ОС) СО и СН₄ над Евразией и сопоставления их с наземными (станции ИФА РАН, NDACC) и спутниковыми (спектрометры MOPITT, AIRS и TROPOMI) измерениями. Для расчетов использовалась глобальная транспортно-химическая модель GEOS-Chem версии 11-01 (<http://acmg.seas.harvard.edu/geos/>) с метеорологией MERRA и эмиссиями

EDGAR (антропогенные), MEGAN (биогенные) и GFED (природные пожары). Рассчитанные распределения ОС CO и CH₄ хорошо согласуются с наблюдениями AIRS на большей части территории Евразии.

Кроме того, была предпринята попытка получить количественные оценки трендов ОС CO и CH₄ с использованием модели за период 2003–2015 гг. и 2007–2015 гг. Анализ результатов численных расчетов показывает, что модельные тренды ОС CH₄ удовлетворительно согласуются с наблюдаемыми и имеют ту же динамику, но не ту же величину. Так, при использовании среднегодовых значений, модельные расчеты для Московской и Ленинградской областей показали для обоих регионов положительный тренд ОС CH₄ 0.4 %/год для 2003–2015 гг. и 0.6 %/год для 2007–2015 гг., в то время как по данным AIRS за эти же периоды получено возрастание со скоростью 0.2 %/год и 0.25 %/год, соответственно. Дополнительно проведены расчеты значения атмосферного отклика на антропогенные эмиссии Московского региона в поле ОС CO. В докладе представлены первые результаты сопоставления этих расчетов с данными спутниковых наблюдений.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант №18-55-53062) и частичной поддержке РНФ (грант № 16-17-10275, расчеты атмосферного отклика CO).

Computer simulation of total CO and CH₄ content over Eurasia and comparison with experimental data

Y.A. Shtabkin (yuryshabkin@ifaran.ru), V.S. Rakitin, A.I. Skorokhod, N.F. Elansky
A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics RAS, 3 Pyzhevsky per., 119017 Moscow, Russia

The results of analysis of numerical simulation of CO and CH₄ total content (TC) data over Eurasia and its comparison with the ground-based (IAP RAS stations, NDACC) and satellite (MOPITT, AIRS and TROPOMI spectrometers) measurements are presented. Global transport chemistry model GEOS-Chem version 11-01 (<http://acmg.seas.harvard.edu/geos/>) was used for calculations with MERRA meteorology and EDGAR (anthropogenic), MEGAN (biogenic) and GFED (wildfires) emissions. The calculated CO and CH₄ TC distributions are in good agreement with AIRS observations over the most of Eurasia.

Also, we made an attempt to obtain quantitative assessments of CO and CH₄ TC trends using the model for 2003–2015 and 2007–2015. Analysis of numerical results has shown that the model CH₄ TC trends are in satisfactorily agreement with the observed and have the same dynamics, but not the same value. Thus, using average annual values, model calculations for the Moscow and Leningrad regions showed a positive trend of CH₄ equal to 0.4 %/year for 2003–2015 and 0.6 %/year for 2007–2015 for both regions, while according to AIRS data for the same periods, an increase was obtained at a rate of 0.2 %/year and 0.25 %/year, respectively. In addition, calculations of the atmospheric response to anthropogenic emissions in the Moscow region in CO TC field were carried out. The report presents the first results of comparing these calculations with satellite observations.

This work was supported by RFBR (grant No. 18-55-53062) and partially by RSCF (grant No. 16-17-10275, atmospheric response calculations).

Интеркалибровка бортовых инфракрасных фурье-спектрометров SI-1 и ИКФС-2

Козлов Д.А.¹ (dakozlov@kerc.msk.ru), Завелевич Ф.С.¹, Тимофеев Ю.М.²,
Поляков А.В.², Козлов И.А.¹, Черкашин И.С.¹

¹ГНЦ «Центр Келдыша», ул. Онежская 8, 125438 Москва, Россия

²Санкт-Петербургский государственный университет, Университетская наб. 7/9, 199034 Санкт-Петербург, Россия

Изучение климатических изменений на основе анализа спектров уходящего ИК-излучения, регистрируемых различной спутниковой аппаратурой, требует тщательного

определения состояния взаимной калибровки спектро радиометров. В настоящей работе проведена интеркалибровка фурье-спектрометров SI-1 (спутники «Метеор-28» и «Метеор-29», 1977 и 1979 гг.) и ИКФС-2 (КА «Метеор-М» № 2, в штатной эксплуатации с 2015 г.). В виду невозможности проведения прямых (синхронных) сопоставлений был применен метод двойных разностей, при этом в качестве опорных измерений принимались расчеты спектров уходящего излучения SI-1 и ИКФС-2 на основе данных аэрологического радиозондирования, вычисленные с использованием известного радиационного кода высокого качества LBLRTM. Применение метода двойных разностей позволило подтвердить хорошее согласование взаимной калибровки фурье-спектрометров и уточнить полученные ранее оценки изменения за 40 лет средних спектров уходящего теплового излучения по данным SI-1 и ИКФС-2.

Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (грант 17-05-00768 А).

Intercalibration of SI-1 and IKFS-2 space-borne infrared Fourier transform spectrometers

D.A. Kozlov¹ (dakozlov@kerc.msk.ru), E.S. Zavelevich¹, Yu.M. Timofeev²,
A.V. Polyakov², I.A. Kozlov¹, I.S. Cherkashin¹

¹Keldysh Research Center, 8 Onezhskaya, 125438 Moscow, Russia

²Saint-Petersburg State University, 7/9 Universitetskaya nab., 199034 Saint-Petersburg, Russia

The study of climate change based on spectral measurements of outgoing infrared radiation recorded by different space-borne spectroradiometers, requires careful intercalibration of these instruments. The results of SI-1/Meteor 28(-29) (1977, 1979) and IKFS-2/Meteor-M N2 (in orbit operation since 2015) FTIR spectrometers intercalibration are presented in this paper to clarify the results of IR atmospheric spectra changes over the past 40 years, previously obtained by authors. The double-difference method is applied due to the impossibility of direct (synchronous) comparisons. Calculations of the infrared atmospheric spectra based on the radiosonde data carried out using the LBLRTM radiation code are used as reference measurements. The application of double-difference method allowed to confirm the good agreement of the mutual calibration of Fourier spectrometers SI-1 and IKFS-2.

The study was supported by Russian Foundation for Basic Research (project 17-05-00768 А).

Спутниковые оценки содержания углекислого газа в атмосфере в 1979 году (прибор SI-1)

Тимофеев Ю.М.¹ (y.timofeev@spbu.ru), Поляков А.В.¹, Виролайнен Я.А.¹, Делер В.²,
Ортель Д.³, Шпенкух Д.²

¹Санкт-Петербургский государственный университет, физ. фак., Университетская наб. 7/9, 199034
Санкт-Петербург, Россия

²ранее работал в Метеорологической службе ГДР

³ранее работал в Институте космических исследований АН ГДР

Разработан и реализован оригинальный алгоритм решения обратной задачи по определению содержания CO₂ из измерений спектров теплового уходящего ИК излучения на основе искусственных нейронных сетей (ИНС). Алгоритм использует как сами экспериментальные спектры так и данные о температуре и влажности из архива реанализа NCEP CFSR.

Проанализированы возможности использования измерений уходящего теплового излучения, осуществленных в 1977 и 1979 года прибором СИ-1 на спутниках Метеор. Показано, что при средних ошибках индивидуальных измерений излучения прибора (~ 0.5 мватт/с·см⁻¹) количество информации о содержании CO₂ очень мало и существенно меньше используемой априорной информации. При этом, однако, в восстановленных

значениях XCO_2 для региона Европы прослеживается сезонная зависимость, а также получено низкое значение XCO_2 в южном полушарии. Пространственное и временное усреднения восстановленных значений дает средние зимние и весенне-летние значения для европейского региона в 338.2, и 336.5 ± 3.1 ppmv, соответственно, хорошо согласующиеся с данными наземных измерений на станции Мауна-Лоа.

Работа выполнена на основе финансирования РФФИ – грант 17-05-00768.

Satellite estimates of CO_2 content in the atmosphere in 1979 (SI-1 device)

Yu.M. Timofeev¹ (y.timofeev@spbu.ru), A.V. Polyakov¹, Ya.A. Virolainen¹, W. Döhler²,
D. Oertel³, D. Spänkuch²

¹*Saint-Petersburg State University, Physics Faculty, 7/9 Universitetskaya nab., 199034 Saint-Petersburg, Russia*

²*formerly at GDR Meteorological service*

³*formerly at Space Research Institute AS GDR*

The original algorithm for solving the inverse problem of the CO_2 content retrieval from measurements of the spectra of the outgoing thermal infrared radiation on the basis of the artificial neural networks (ANN) is designed and implemented. The algorithm uses both experimental spectra and temperature and humidity data from NCEP CFSR reanalysis archive.

The possibilities of using the measurements of outgoing thermal radiation carried out in 1977 and 1979 by the SI-1 device on the Meteor satellites are analyzed. It is shown that at average errors of individual device measurements (~ 0.5 mW/s·sr·cm⁻¹) the amount of information about the CO_2 content is very small and significantly less than the a priori information used. At the same time, however, in the retrieved XCO_2 values, seasonal dependence is observed, and a low XCO_2 value in the southern hemisphere is obtained for the European region. The spatial and temporal averaging of the retrieved values yields 338.2 and (336.5 ± 3.1) ppmv for the mean winter and spring-summer values for the European region, respectively. These values are well consistent with the ground-based measurements at the Mauna Loa station.

The work was supported by RFBR grant (17-05-00768).

СЕКЦИЯ 2. "ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ АТМОСФЕРЫ и ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ в РАЗЛИЧНЫХ ОБЛАСТЯХ СПЕКТРА"

Председатель: проф. **Ю.М. Тимофеев** (СПбГУ, СПб, Россия)

Сопредседатели: д.ф-м.н. **А.А. Троицкий** (НИРФИ, Н.-Новгород, Россия), Prof. **William L. Smith** (University of Wisconsin-Madison, USA), Prof. **Costas Varotsos** (University of Athens, Greece), Dr. **Gabriele Stiller** (The Research University in the Helmholtz Association, Germany)

SESSION 2. "REMOTE SENSING of ATMOSPHERE and UNDERLYING SURFACE in DIFFERENT SPECTRAL RANGES"

Chairman: Prof. **Yu.M. Timofeev** (SPbSU, SPbU, Russia)

Co-chairmen: Prof. **A.A. Troitsky** (RRI, N.-Novgorod, Russia), Prof. **William L. Smith** (University of Wisconsin-Madison, USA), Prof. **Costas Vorotsos** (University of Athens, Greece), Dr. **Gabriele Stiller** (The Research University in the Helmholtz Association, Germany)

Лидарные наблюдения скоплений атмосферного аэрозоля с самолета в проекте DELICAT

Федорова О.В. (ovfedorova@mail.ru), Коваль О.А., Мамонтов А.Е.

Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Пыжевский пер. 3, 119017 Москва, Россия

Основной задачей проекта DELICAT (DEmonstration of LIdar based CAT detection) была проверка возможности заблаговременного обнаружения областей турбулентности ясного неба путем регистрации интенсивности обратного молекулярного рассеяния при помощи установленного на борту самолета специально разработанного лидара, работающего в ультрафиолетовом диапазоне длин волн. Летные испытания проводились в период с 17 июля по 12 августа 2013 г. над западной частью Европы и прилегающими морскими территориями. Хотя предпочтительными были измерения в условиях чистого неба, в большинстве случаев вдоль трасс полета присутствовали аэрозольные скопления различной мощности. Скопления аэрозоля необходимо учитывать как источник помех, но их наблюдения также дают возможность получить информацию о свойствах аэрозоля и пространственно-временной эволюции скоплений. Мы приводим статистику наблюдений аэрозольных скоплений в полетах, описываем разнообразие их типов и прослеживаем влияние параметров полета на наблюдаемые характеристики скоплений.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-35-00368.

Airborne lidar observations of atmospheric aerosol clusters in the DELICAT project

O.V. Fedorova (ovfedorova@mail.ru), O.A. Koval, A.E. Mamontov

A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics RAS, 3 Pyzhevsky per., 119017 Moscow, Russia

The main goal of the DELICAT (DEmonstration of LIdar based CAT detection) project was to check the possibility of early detection of clear air turbulence regions by recording the intensity of reverse molecular scattering by means of a specially designed lidar mounted on the aircraft, operating in the ultraviolet range of wavelengths. Flight tests were conducted from July 17 to August 12, 2013 over the western part of Europe and the adjacent maritime territories. Although measurements in a clear sky were preferred, in most cases aerosol clusters of different power presented along the flight paths. Aerosol clusters should be considered as a source of interference, but their observations also provide an opportunity to obtain information on the properties of the aerosol and the spatial-temporal evolution of clusters. In this paper, we give statistics of observations of aerosol clusters in flights, describe the diversity of their types and trace the influence of flight parameters on the observed characteristics of clusters.

This study was funded by Russian Foundation for Basic Research according to the research project No. 18-35-00368.

EMME (Emission Monitoring Mobile Experiment) – обзор и первые результаты измерительной кампании вокруг Санкт-Петербурга

Макарова М.В.¹ (m.makarova@spbu.ru), Ионов Д.В.¹, Виролайнен Я.А.¹, Фока С.Ч.¹,
Косцов В.С.¹, Блюменсток Т.², Хассе Ф.², Алберти С.², Варнеке Т.³, Поберовский А.В.¹,
Волкова К.А.¹, Зайцев Н.А.¹, Тимофеев Ю.М.¹, Поляков А.В.¹, Осипов С.И.¹,
Бирюков Е.Ю.¹, Имхасин Х.Х.¹

¹Санкт-Петербургский государственный университет, физ. фак., Университетская наб. 7/9, 199034

Санкт-Петербург, Россия

²Институт технологии Карлсруе, Германия

³Бременский университет, 1 Библиотекитрассе, 28359 Бремен, Германия

Представлена измерительная кампания EMME (Emission Monitoring Mobile Experiment), проводившаяся СПбГУ совместно с КИТ и Bremen University (Германия) в марте–апреле 2019 г., а также предварительный анализ полученных результатов. Цель EMME – на основе мобильных дистанционных измерений прямого и рассеянного солнечного излучения в различных диапазонах спектра провести оценку эмиссии CO₂, CH₄, CO и NO₂ для Санкт-Петербурга – мегаполиса с населением ~ 5 млн.

Решение данной задачи достигалось комплексным подходом. Важным этапом являлось планирование эксперимента – за несколько часов до начала мобильных измерений осуществлялся прогноз положения шлейфа загрязнений Санкт-Петербурга с использованием дисперсионной модели HYSPLIT. Это позволяло предварительно наметить оптимальные наветренную и подветренную измерительные точки для двух экипажей, несущих Фурье-спектрометры Bruker EM27/SUN. Начав измерения, экипажи в режиме реального времени получали информацию об актуальной локализации шлейфа мегаполиса – для этого мобильным спектрометром OceanOptics HR4000Vis (третий экипаж) проводились наблюдения тропосферного содержания NO₂ вдоль КАД – и, исходя из этого, местоположение Фурье-спектрометров EM27/SUN, при необходимости, корректировалось.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 18-05-00011 “Изучение химически активных газов в атмосфере методами Фурье-спектрометрии”, а также проекта VERIFY (HORIZON2020). В работе использовалось научное оборудование ресурсного центра СПбГУ «Геомодель».

EMME (Emission Monitoring Mobile Experiment) – an overview and preliminary results of the St. Petersburg observational campaign

M.V. Makarova¹ (m.makarova@spbu.ru), D.V. Ionov¹, Ya.A. Virolainen¹, S.Ch. Foka¹,
V.S. Kostsov¹, T. Blumenstock², F. Hase², C. Alberti², T. Warneke³, A.V. Poberovskiy¹,
K.A. Volkova¹, N.A. Zaytsev¹, Yu.M. Timofeyev¹, A.V. Polyakov¹, S.I. Osipov¹,
E.Yu. Biryukov¹, H.H. Imhasin¹

¹Saint-Petersburg State University, Physics Faculty, 7/9 Universitetskaya nab., 199034 Saint-Petersburg, Russia

²Karlsruhe Institute of Technology, Institute of Meteorology and Climate Research, Karlsruhe, Germany

³Universität Bremen, 1 Bibliothekstraße, 28359 Bremen, Germany

The ideology and preliminary results of the EMME observational campaign – the Emission Monitoring Mobile Experiment, – carried out by SPbSU together with KIT and Bremen University (Germany) in March–April 2019, are presented. Campaign was based on the mobile remote sensing measurements of direct and scattered solar radiation in various spectral ranges. The goal of EMME is to estimate the emission of CO₂, CH₄, CO and NO₂ for St. Petersburg – a megacity with a population of ~ 5 million.

The solution to this problem was achieved by an combined approach. An important step was the planning of the experiment – a few hours before the start of mobile measurements, the position of St. Petersburg pollution plume was forecasted using the HYSPLIT dispersion model. This made it possible to point out preliminary up- and downwind locations of measurement points for two crews carrying Bruker EM27/SUN FTIR spectrometers. Having started the measurements, the crews have received real-time information on the current localization of the megacity plume – for

this, the OceanOptics HR4000Vis mobile spectrometer (third crew) monitored the tropospheric NO₂ column along the ring roadway. Based on this, the EM27/SUNs were moved, if necessary, to the most appropriate locations.

Research was supported by the RFBR grant 18-05-00011 “Study of reactive gases in the atmosphere using Fourier transform spectrometry” and VERIFY project (HORIZON2020). Experimental data were acquired using the scientific equipment belonging to the "Geomodel" resource center of SPbSU.

Изменчивость содержания окислов азота в приземном слое атмосферы вблизи Санкт-Петербурга

Ионов Д.В. (ionov@troll.phys.spbu.ru), Поберовский А.В.

*Санкт-Петербургский государственный университет, физ. фак., Университетская наб., 7/9, 199034
Санкт-Петербург, Россия*

Вблизи Санкт-Петербурга, на наблюдательной станции Санкт-Петербургского государственного университета (СПбГУ) в Петергофе (здание НИИ Физики) уже много лет ведутся исследования вариаций содержания NO₂ в атмосфере. Так, начиная с 2004 года осуществляются непрерывные измерения тропосферного содержания NO₂ дистанционным спектроскопическим методом по наземным зенитным наблюдениям рассеянного видимого солнечного излучения. Выполняются сопоставления результатов наземных измерений с данными одновременных спутниковых измерений и результатами численного моделирования содержания NO₂ в тропосфере. С 2009 года по наблюдениям прямого солнечного излучения с помощью ИК Фурье-спектрометра проводятся регулярные измерения содержания в толще атмосферы большого набора газовых составляющих, многие из которых имеют антропогенное происхождение в приземном слое. Эпизодически выполняются мобильные спектроскопические измерения тропосферного содержания NO₂ на кольцевой автомобильной дороге вокруг Санкт-Петербурга и в центральной части города. С 2012 года осуществляется постоянный мониторинг аэрозольных характеристик атмосферного воздуха – в частности, аэрозольной оптической толщи и приземной концентрации углеродсодержащего аэрозоля. Таким образом, наблюдательная станция СПбГУ в Петергофе располагает широким спектром измерительной аппаратуры, позволяющей осуществлять одновременный мониторинг разнообразных составляющих атмосферы, ответственных в том числе и за качество приземного воздуха.

В настоящей работе представлены первые результаты анализа основных закономерностей изменчивости концентрации оксидов азота в городском воздухе, наблюдаемых в данных измерений на станции Петергоф (Санкт-Петербург) в 2012–2018 гг. Приземные концентрации NO_x (NO и NO₂) определялись по измерениям хемилюминесцентного газоанализатора Thermo Scientific 42i TL (Trace Level NO-NO₂-NO_x Analyzer). Станция расположена в 30 км к юго-западу от центра Санкт-Петербурга и в 2.5 км от берега Финского залива. Преобладающие в точке наблюдений ветры западного и юго-западного направлений обеспечивают относительно низкие концентрации NO_x в приземном воздухе – в среднем 4 мкг/м³ для NO (0.07 ПДК) и 12 мкг/м³ для NO₂ (0.3 ПДК) за период измерений. Максимальные зарегистрированные среднесуточные концентрации – 142 мкг/м³ для NO (2.4 ПДК) и 67 мкг/м³ (1.7 ПДК) для NO₂. Благодаря усилению антропогенной эмиссии предприятиями теплоэнергетики в отопительный сезон, а также неблагоприятным зимним условиям для рассеяния и распада воздушных загрязнений, более низкие концентрации NO_x наблюдаются в летнее время (июнь–август), а более высокие – в холодный период (с сентября по март). Средний суточный ход характеризуется двумя выраженными максимумами – утром и поздно вечером, которые разделены периодами низких концентраций в течение дня и рано утром. Во временных вариациях концентрации NO_x в городском приземном воздухе проявляется недельный цикл хозяйственной и деловой активности – в среднем, воскресная концентрация NO снижается относительно максимального в рабочие дни недели на 33%, а концентрация NO₂ – на 17%. Поскольку

пункт измерений в Петергофе расположен к западу от центральной части Санкт-Петербурга, максимальные концентрации NO_x в среднем регистрируются при восточном ветре ($\sim 13 \text{ мкг/м}^3$ для NO и $\sim 27 \text{ мкг/м}^3$ для NO_2), а минимальные – при западном ветре ($\sim 2 \text{ мкг/м}^3$ для NO и $\sim 7 \text{ мкг/м}^3$ для NO_2). Приближенная оценка средней концентрации NO_x в центральной части города ($\sim 56 \text{ мкг/м}^3$) свидетельствует о допустимом уровне загрязнения городского воздуха окислами азота даже в относительно редких неблагоприятных для рассеяния воздушного загрязнения условиях восточного ветра.

Исследования проведены с использованием оборудования ресурсного центра Научного парка СПбГУ "Геомодель", при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект №18-05-00011).

Variability of nitrogen oxides in the surface layer of the atmosphere near St. Petersburg

D.V. Ionov (ionov@troll.phys.spbu.ru), A.V. Poberovsky

Saint-Petersburg State University, Physics Faculty, 7/9 Universitetskaya nab., 199034 Saint-Petersburg, Russia

Investigations of atmospheric NO_2 content variations near St. Petersburg are being conducted for many years at the observation site of St. Petersburg State University (SPbSU) in the city of Petergof (building of the Research Institute of Physics). Thus, since 2004, continuous measurements of tropospheric NO_2 content have been carried out by remote spectroscopic method using ground-based zenithal observations of scattered visible solar radiation. The results of ground-based measurements are compared with the data of simultaneous satellite measurements and the results of numerical simulation of NO_2 content in the troposphere. Since 2009, the observations of direct solar radiation using a Fourier transform infrared spectrometer are used for the regular measurements of vertical column amounts over a large set of gas constituents, many of which are of anthropogenic origin in the surface layer. Mobile spectroscopic measurements of tropospheric NO_2 content on the ring road around St. Petersburg and in the central part of the city are performed occasionally. Since 2012, the aerosol characteristics of atmospheric air – in particular, the aerosol optical depth and the surface concentration of carbonaceous aerosol – have been continuously monitored. Thus, the observation station of St. Petersburg State University in Petergof has a wide range of measuring equipment that allows simultaneous monitoring of various components of the atmosphere, including those responsible for the quality of surface air.

This work presents the first results of the analysis of the main regularities of the variability of nitrogen oxides concentrations in urban air observed in the measurement data at the Petergof station (St. Petersburg) in 2012–2018. Surface concentrations of NO_x emissions (NO and NO_2) were determined by measurements of chemiluminescent gas analyzer Thermo Scientific 42i TL (Trace Level $\text{NO-NO}_2\text{-NO}_x$ Analyzer). The station is located 30 km South-West of the center of St. Petersburg and 2.5 km from the shore of the Gulf of Finland. Prevailing winds of the western and south-western directions in the observation point provide relatively low NO_x concentrations in the surface air – an average of $4 \text{ }\mu\text{g/м}^3$ for NO (0.07 MPC) and $12 \text{ }\mu\text{g/м}^3$ for NO_2 (0.3 MPC) during the the period of observations. The maximum recorded daily mean concentrations – $142 \text{ }\mu\text{g/м}^3$ for NO (2.4 MPC) and $12 \text{ }\mu\text{g/м}^3$ for NO_2 (1.7 MPC). Due to the increase in anthropogenic emissions by thermal power plants during the heating season, as well as unfavorable winter conditions for the dispersion and decay of air pollution, lower NO_x concentrations are observed in the summer (June–August), and higher – in the cold period (September–March). The average daily variation is characterized by two pronounced peaks – in the morning and late at night, which are separated by periods of low concentrations during the day and early in the morning. The temporal variations of NO_x concentration in urban surface air show a weekly cycle of economic and business activity – on average, Sunday NO concentration decreases by 33% relative to the maximum on weekdays, and NO_2 concentration – by 17%. Since the measurement point in Petergof is located to the west of the central part of St. Petersburg, the maximum NO_x concentrations are recorded on average in the East wind ($\sim 13 \text{ }\mu\text{g/м}^3$ for NO and $\sim 27 \text{ }\mu\text{g/м}^3$ for NO_2), and the minimum – in the West wind

($\sim 2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ for NO and $\sim 7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ for NO₂). An approximate estimate of the average NO_x concentration in the central part of the city ($\sim 56 \mu\text{g}/\text{m}^3$) indicates an acceptable level of urban air pollution with nitrogen oxides even in the relatively rare East wind conditions unfavourable for dispersion.

The study was carried out using equipment of the Center for Geo-Environmental Research and Modeling (GEOMODEL) of the Research park of St. Petersburg State University, and supported by the Russian Foundation for Basic Research (18-05-00011).

Методы микроволновой радиометрии в задачах навигационного обеспечения ГЛОНАСС

Караваев Д.М. (dm.karavaev@mail.ru), Кулешов Ю.В., Щукин Г.Г.

Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского, ул. Ждановская 13, 197198 Санкт-Петербург, Россия

В докладе рассмотрен метод наземной микроволновой радиометрии, основанный на интерпретации нисходящего излучения атмосферы, для определения влагозапаса атмосферы, водозапаса облаков, а также измерения наиболее изменчивой тропосферной задержки радионавигационных сигналов, обусловленной водяным паром. Актуальность работы связана с развитием технологии навигационного обеспечения ГЛОНАСС, исследованием методов учета эффектов распространения радионавигационных сигналов в тропосфере.

Обсуждаются возможности применения современных наземных средств микроволновой радиометрии для измерения метеорологических параметров тропосферы, тропосферной задержки вдоль направления зондирования с высоким пространственно-временным разрешением. Для апробации и уточнения глобальных моделей тропосферной задержки используется метод спутниковой микроволновой радиометрии. Представлены некоторые результаты экспериментальных исследований временных и пространственных вариаций влагозапаса атмосферы и влажной компоненты тропосферной задержки в различных регионах над океаном и для условий Ленинградской области.

Methods of microwave radiometry in the GLONASS navigation support

D.M. Karavaev (dm.karavaev@mail.ru), Y.V. Kuleshov, G.G. Shchukin

Mozhaisky Military Space Academy, 13 Zhdanovskaya str., 197198 Saint Petersburg, Russia

The report examined the method of ground-based microwave radiometry, based on interpretation of downward atmospheric radiation, to determine the integrated water vapor of the atmosphere, integrated cloud liquid water content and measurements of the most fluid tropospheric wet delay of radio navigation signals. The relevance of the work associated with the development of GLONASS navigation support technologies, research methods of accounting for the effects of the radio wave propagations of navigation signals in the troposphere.

The use of modern ground-based means of microwave radiometry to measure meteorological parameters of the troposphere, tropospheric path delays along the direction sensing with high spatial and temporal resolution is discussed. The satellite-based microwave radiometry is used to test and refine the global tropospheric delay model. Some of the results of experimental studies of temporal and spatial variations of atmospheric integrated water vapor and tropospheric wet delay in various regions over the ocean and to the conditions of the Leningrad region are presented.

Исследование водозапаса облаков над сушей и водной поверхностью в северных регионах европейской части России по данным дистанционных измерений

Косцов В.С. (v.kostsov@spbu.ru), Ионов Д.В., Волкова К.А., Зайцев Н.А.
*Санкт-Петербургский государственный университет, физ. фак., Университетская наб. 7/9, 199034
Санкт-Петербург, Россия*

Совершенствование моделей облачности для климатических исследований в региональном масштабе требует полной информации о многих параметрах облачности. Поступление этой информации обеспечивается дистанционными наблюдениями облачности с наземных и спутниковых платформ, которые осуществляются с помощью различных методов и алгоритмов обработки данных. Водозапас облаков является одним из важнейших определяемых параметров. Ранее измерения водозапаса спутниковым прибором AVHRR показали, что в Северной Европе получаемые значения различны над сушей и водными поверхностями.

Настоящее исследование посвящено анализу данных о водозапасе облаков, полученных спутниковыми приборами SEVIRI и AVHRR в окрестности Санкт-Петербурга (малый район) и над обширной территорией, которая включает Финский залив, Невскую губу, Ладожское озеро и озеро Сайма (большой район). Спутниковые измерения водозапаса прошли валидацию путем сравнения с результатами наземных дистанционных измерений водозапаса микроволновым радиометром RPG-HATPRO, который функционирует на физическом факультете Санкт-Петербургского государственного университета. Представлены результаты этой валидации для измерений в теплый и холодный сезон и продемонстрировано хорошее согласие результатов измерений. На основе результатов, полученных спутниковыми приборами SEVIRI и AVHRR, для обоих сезонов были построены и проанализированы карты распределения водозапаса облаков в малом и большом районах. Показаны различия в значениях водозапаса над сушей и водной поверхностью (в том числе покрытой льдом). Обсуждаются и объясняются расхождения между картами водозапаса, построенными по данным SEVIRI и по данным AVHRR.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант 19-05-00372). Функционирование измерительной аппаратуры обеспечивалось ресурсным центром «Геомодель» Санкт-Петербургского государственного университета. Авторы благодарят коллег из ФРГ Anke Kniffka и Martin Stengel за предоставленные результаты спутниковых измерений.

Investigation of cloud liquid water path over land and water areas of the European part of Northern Russia on the basis of remote measurements

V.S. Kostsov (v.kostsov@spbu.ru), D.V. Ionov, K.A. Volkova, N.A. Zaitsev
Saint-Petersburg State University, Physics Faculty, 7/9 Universitetskaya nab., 199034 Saint-Petersburg, Russia

The improvement of cloud modelling for global and regional climate studies requires comprehensive information on many cloud parameters. This information is delivered by remote observations of clouds from ground-based and space-borne platforms using different methods and processing algorithms. Cloud liquid water path (LWP) is one of the main obtained quantities. Previously, the measurements of LWP by the AVHRR satellite instrument provided the evidences of the differences between LWP values over land and water areas in Northern Europe.

The present study is focused on the LWP data obtained by the satellite instruments SEVIRI and AVHRR in the vicinity of St. Petersburg (the small terrain) and over the large territory that includes the Gulf of Finland, the Neva bay, the Ladoga lake, and the Saimaa lake (the large terrain). The satellite measurements of LWP over land surface are validated through their comparison with the ground-based LWP measurements made by the microwave radiometer RPG-HATPRO operating at the Faculty of Physics, St. Petersburg State University. The results of the validation of

measurements performed during warm and cold seasons are presented and an overall good agreement is shown. For both seasons, the LWP maps for the considered small and large terrains are plotted using satellite data from SEVIRI and AVHRR. These maps are analysed and the difference between the LWP mean values over land and over large water/ice areas is demonstrated. Several reasons are suggested to explain the discrepancies between the LWP maps produced from the data provided by the SEVIRI and the AVHRR satellite instruments.

The research was supported by Russian Foundation for Basic Research through the project No. 19-05-00372. The operation of the RPG-HATPRO instrument was provided by the Research Centre GEOMODEL of St. Petersburg State University. The authors are grateful to German colleagues Anke Kniffka and Martin Stengel for providing the results of the space-borne measurements.

Динамика трендов состава атмосферы в урбанизированных и фоновых районах Евразии по данным наземных и спутниковых измерений

Ракитин В.С.¹ (vadim@ifaran.ru), Еланский Н.Ф.¹, Скороход А.И.¹, Штабкин Ю.А.¹,
Ракитина А.В.¹, Панкратова Н.В.¹, Макарова М.В.², Джола А.В.¹

¹Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Пыжевский пер. 3, 119017 Москва, Россия

²Санкт-Петербургский государственный университет, Университетская наб. 7/9, 199034 Санкт-Петербург, Россия

Представлены результаты анализа наземных (станции ИФА РАН, СПбГУ, наблюдательные пункты сетей NDACC и AERONET) и спутниковых (спектрометры MOPITT, AIRS и MODIS/Terra) измерений общего содержания (ОС) оксида углерода, метана и аэрозольной оптической толщи (АОТ) над Евразией. На основе спутниковых данных получены пространственные распределения трендов упомянутых атмосферных примесей в разные периоды и сезоны с начала XXI века. Приведены характеристики достоверности этих распределений. Полученные спутниковые оценки трендов сопоставлены с аналогичными оценками на основе наземных спектроскопических данных, в том числе в синхронные дни наблюдений. Отдельное внимание уделено району Московского мегаполиса и оценке пространственно-временных вариаций и долговременных трендов приземных концентраций и эмиссий парниковых газов и загрязняющих примесей в Москве и области.

Получено, что тренды в урбанизированных и фоновых районах Евразии после примерно 2007–2008 годов отличаются по направленности. Отмечено продолжение спада ОС СО и АОТ в Москве и Пекине; эта тенденция является типичной для большинства современных мировых мегаполисов. Так, в осенние месяцы 1998–2018 гг. ОС СО убывало со скоростью соответственно $(-2.8 \pm 0.6) \text{ \%/год}$ (1998–2018 гг.) и $(-1.2 \pm 0.1) \text{ \%/год}$ (2007–2018 гг.) для Москвы и $(-1.2 \pm 0.1) \text{ \%/год}$ (1998–2018) и $(-1.5 \pm 0.2) \text{ \%/год}$ (2007–2018 гг.) для Пекина (по данным наземных спектроскопических измерений). АОТ в районе обоих мегаполисов в этот же период и сезон также убывало со скоростью $(-2.9\text{--}6.0) \text{ \%/год}$ для Москвы и $(-1.9\text{--}3.4) \text{ \%/год}$ для Пекина. Также отмечено уменьшение ОС СО и АОТ над Южной Европой. Установлены статистически значимые отрицательные тренды приземных концентраций и эмиссий СО, CH_4 и NO_x в Москве и Московской области. Полученные для Москвы оценки эмиссий СО и NO_x в целом согласуются с аналогичными оценками международных баз об эмиссиях EDGAR и TNO; для CH_4 эмиссии EDGAR существенно (на порядок величины) превышают наши оценки для Москвы. В уменьшении загрязнения мегаполисов Москва и Пекин играет роль не только сокращение антропогенных выбросов, но и, возможно, климатический фактор, обеспечивающий улучшение условий удаления загрязнения из атмосферного приземного слоя атмосферы.

В то же самое время, после 2007 г. в летние и осенние месяцы фоновое содержание СО начало устойчиво расти практически над всей Северной Евразией, включая Северную и Центральную Европу. В средних и тропических широтах Центральной и Восточной Евразии тренды ОС СО после 2007 г. близки к нулю, за исключением территории Китая, где

продолжается устойчивый спад. Выраженная положительная динамика трендов ОС СО после 2007–2008 гг. отчетливо прослеживается во все сезоны на всей территории Евразии, кроме Китая. Таким образом, можно утверждать о переходе глобального СО в фазу стабилизации или даже накопления (в летне–осенний период). Этот факт может свидетельствовать о влиянии глобальных климатических изменений на всю атмосферную фотохимическую систему, поскольку рост антропогенных эмиссий и эмиссий от природных пожаров в этот период не наблюдался.

Наибольшее ускорение трендов ОС CH_4 после 2007 г. произошло в субтропическом и тропическом поясах Евразии (с $(0.3\text{--}0.35)\%$ /год в период 2003–2018 гг. до $(0.4\text{--}0.45)\%$ /год в 2007–2018 гг.), а также в Северной Европе (с $0.2\text{--}0.25$ до $(0.3\text{--}0.4)\%$ /год).

Авторы благодарят научные коллективы станций NDACC Кируна, Харестуа, Най Алесунд, Зуль, Бремен, Юнгфрау, Цугшпитце за возможность использования данных измерений содержания СО и CH_4 . Работа выполнена при поддержке проекта РФФИ №16-17-10275.

Trend dynamics of atmospheric composition in urban and background regions over Eurasia according ground-based and satellite data

V.S. Rakitin¹ (vadim@ifaran.ru), N.F. Elansky¹, A.I. Skorokhod¹, Yu.A. Shtabkin¹,
A.V. Rakitina¹, N.V. Pankratova¹, M.V. Makarova², A.V. Dzhola¹

¹A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics RAS, 3 Pyzhevsky per., 119017 Moscow, Russia

²Saint-Petersburg State University, Physics Faculty, 7/9 Universitetskaya nab., 199034 Saint-Petersburg, Russia

The analysis results of the spectroscopic ground-based (IAP RAS stations, SPbSU, observational NDACC and AERONET stations) and satellite (AIRS and MODIS/Terra spectrometers) total content (TC) measurements of carbon monoxide and methane and aerosol optic depth (AOD) over Eurasia are presented. Spatial trend distributions of mentioned atmospheric admixtures in different time-periods and seasons of the XXI century beginning have been obtained based on satellite data. The reliability characteristics of these distributions were given. Obtained satellite trend estimates were compared with similar estimates based on ground-based spectroscopic data, including in synchronous observation days. Special attention is paid to Moscow megapolis region and estimate of space-time variations and long time surface concentration trends and emissions of greenhouse gases and polluted admixtures in Moscow and Moscow region.

It is obtained that trends in urban and background Eurasia regions after about 2007–2008 differ in sign. It is marked the recession continuation of CO TC and AOD in Moscow and Beijing; this tendency is typical for majority of modern world megalopolises. So, in autumn months 1998–2018 CO TC decreased with speed accordingly $(-2.8 \pm 0.6)\%$ /yr (1998–2018) and $(-1.2 \pm 0.1)\%$ /yr (2007–2018) for Moscow and $(-1.2 \pm 0.1)\%$ /yr (1998–2018) and $(-1.5 \pm 0.2)\%$ /yr (2007–2018) for Beijing (according to ground-based spectroscopic measurements). AOD in region of both megalopolises in this periods and season as well decreased with speed $-(2.9\text{--}6.0)\%$ /yr for Moscow and $-(1.9\text{--}3.4)\%$ /yr for Beijing. The decreasing of CO TC and AOD over South Europe is marked as well. Statistically significant negative trends of surface concentrations and CO, CH_4 и NO_x emissions in Moscow and Moscow region were established. Obtained for Moscow CO and NO_x emission evaluations are in total agree with analogical estimates of international bases about EGDAR and TNO emissions; for CH_4 EDGAR emissions significantly (an order of magnitude) exceed our estimates for Moscow. Not only the reducing of anthropogenic emissions, but also, perhaps, the climatic factor that improves the conditions for removing pollution from the atmospheric surface layer play a role in reducing the Moscow and Beijing pollution.

In the same time after 2007 year in summer and autumn months CO background content began to grow steadily almost over all North Eurasia including North and Central Europe. In average and tropical latitudes of Central and East Eurasia the CO TC trends after 2007 year are near to zero except for China territory where the steady decreasing continue. Pronounced positive dynamics CO TC after 2007–2008 distinctly traced in all seasons over all territory of Eurasia except China. Thus, it is possible to claim about the transition of global CO to the phase of stabilization or even accumulation (in summer–autumn period). This fact can evidence about the influence of

global climatic changes on all atmospheric photo-chemical system because the growth of anthropogenic emissions and emissions from nature fires was not observed during this period.

The greatest acceleration of CH₄ TC trends after 2007 occurred in the subtropical and tropical zones of Eurasia (from (0.3–0.35) %/yr in 2003–2018 to (0.4–0.45) %/yr in 2007–2018), and also in Northern Europe (from 0.2–0.25 to (0.3–0.4) %/yr).

The authors thank the scientific teams of NDACC stations Kiruna, Harestua, Ny Alesund, Zhule, Bremen, Jungfraujoch, Zugspitze for the possibility of using their measurement data of CO and CH₄ content. This study was supported by the Russian Science Foundation under grant №16-17-10275.

Измерения общего содержания фреонов в атмосфере в окрестности Санкт-Петербурга

Поляков А.В. (a.v.polyakov@spbu.ru), Макарова М.В, Виролайнен Я.А.,
Тимофеев Ю.М., Поберовский А.В.
Saint-Petersburg State University, 7/9 Universitetskaya nab., 199034 Saint-Petersburg, Russia

Фреоны являются одним из источников активного хлора в стратосфере, фотохимические реакции с участием которого ведут к разрушению озонового слоя. Основным резервуаром фреонов в атмосфере является тропосфера, откуда они в ходе общей циркуляции попадают в стратосферу в полярных зонах Земли, где и может происходить разрушение озона вплоть до образования, так называемых, озоновых дыр. Результатом запретов и ограничений в применении фреонов является как убывание содержания таких соединений, как CFC-11 и CFC-12, так и рост пришедших им на замену, например, HCFC-22.

В представленной работе разработана новая методика определения общего содержания (ОС) фреонов CFC-12, HCFC-22 на основе наземных измерений солнечного излучения с высоким спектральным разрешением, получены оценки их ОС в атмосфере за период 2009–2019 гг. Систематические погрешности определения ОС составляют 5.0 и 2.0%, случайные 3.7 и 2.7% для HCFC-22 и CFC-12, соответственно. Общая изменчивость за вычетом систематического тренда – 5.6 и 2.4%, среднеквадратическая изменчивость в течение дня – 3.7 и 0.9% для HCFC-22 и CFC-12, соответственно. Оценки тренда за период 2009–2019 гг. составили (+ 2.2±0.14)% и (– 0.45±0.06)%, что согласуется с данными других авторов. Отметим, что в период 2017–2019 гг. наблюдается стабилизация и намечающаяся тенденция к убыванию ОС HCFC-22, связанная с ограничением и частичным прекращением его применения.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант 18-05-00426. Измерения солнечного излучения выполнялись с использованием аппаратуры ресурсного центра «Геомодель».

Measurements of freon total contents in the atmosphere in the vicinity of St. Petersburg

A.V. Polyakov (a.v.polyakov@spbu.ru), M.V. Makarova, Ya.A. Virolainen,
Yu.M. Timofeyev, A.V. Poberovsky
Saint-Petersburg State University, 7/9 Universitetskaya nab., 199034 Saint-Petersburg, Russia

Freons are one of the sources of active chlorine in the stratosphere, photochemical reactions with the participation of which lead to the destruction of the ozone layer. The main reservoir of freons in the atmosphere is the troposphere, from where they are transported into the stratosphere in the polar zones of the Earth during the general circulation. The ozone layer may be destroyed up the formation of so-called ozone holes. The result of prohibitions and restrictions in the use of freons is both a decrease in the content of such compounds as CFC-11 and CFC-12, as well as the growth of substitutes, for example, HCFC-22.

In the present work, a new technique for determining the CFC-12, HCFC-22 total columns (TC) based on ground-based measurements of solar radiation with high spectral resolution has been developed. Estimates of their TC in the atmosphere have been obtained for the period of 2009–2019. Systematic errors in determining TC are 5.0 and 2.0%, random ones are 3.7 and 2.7% for HCFC-22 and CFC-12, respectively. The total variability minus the systematic trend is 5.6 and 2.4%, the root-mean-square variabilities during the day are 3.7 and 0.9% for HCFC-22 and CFC-12, respectively. Trend estimates for the period of 2009–2019 are $(+ 2.2 \pm 0.14)\%$ and $(- 0.45 \pm 0.06)\%$, which are consistent with data from other authors. Some stabilization and the emerging tendency to reduce is observed for HC-22 TC in the period of 2017–2019. This fact is associated with the restriction and partial termination of its use.

This work was supported by the Russian Foundation for Basic Research, grant 18-05-00426. Measurements of solar radiation were performed using the equipment of the resource center "Geomodel".

Анализ временной изменчивости озоносферных газов вблизи Санкт-Петербурга

Виролайнен Я.А. (yana.virolainen@spbu.ru), Поляков А.В., Ионов Д.В., Макарова М.В., Тимофеев Ю.М., Поберовский А.В., Имхасин Х.Х.

Санкт-Петербургский государственный университет, физ. фак., Университетская наб. 7/9, 199034 Санкт-Петербург, Россия

В последние годы в Арктике и околополярных широтах отмечаются более частые и глубокие, чем ранее, озонные аномалии, выражающиеся в существенном сокращении общего содержания (ОС) озона полярной весной. Уникальность местоположения Санкт-Петербурга (60° с.ш.) заключается в частой смене воздушных масс, поступающих как из средних, так и высоких широт. Периодическое захождение циркумполярного арктического вихря в зимне-весенний период обуславливает возможность исследования динамических и фотохимических факторов, влияющих на изменчивость озона.

На основе регулярных (с 2009 г.) наземных измерений спектров ИК солнечного излучения с помощью спектрального комплекса на базе Фурье-спектрометра Bruker 125HR получены временные ряды ОС таких малых газовых составляющих (МГС) как озон, NO_2 , HNO_3 , HCl , HF , ClONO_2 и др. в районе Санкт-Петербурга. В отдельные периоды и сезоны проведен совместный анализ кратковременной изменчивости данных по ОС МГС, включенных в озонобразующий и озоноразрушающий циклы и полученных как с помощью наземных и спутниковых измерений, так и из результатов численного моделирования.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант 18-05-00426. Измерения солнечного излучения выполнялись с использованием аппаратуры ресурсного центра СПбГУ «Геомодель».

Analysis of temporal variations of ozonospheric trace gases near St. Petersburg

Ya.A. Virolainen (yana.virolainen@spbu.ru), A.V. Polyakov, D.V. Ionov, M.V. Makarova, Yu.M. Timofeyev, A.V. Poberovsky, H.H. Imhasin

Saint-Petersburg State University, Physics Faculty, 7/9 Universitetskaya nab., 199034 Saint-Petersburg, Russia

In recent years, more frequent and deeper than earlier ozone anomalies were registered during Polar spring in Arctic and Subarctic regions. Saint-Petersburg is located on the border of Subarctic and middle latitude bands (60° N) and is characterized by the frequent changes of different airmasses. During winter and spring periods, Saint Petersburg may often be on the edge of polar vortex, which allows to investigate separately the influence of photo-chemical and dynamical factors on the ozone variability.

The time series (starting at 2009) of some stratospheric minor trace gases, such as ozone, NO_2 , HNO_3 , HCl , HF , ClONO_2 , etc., have been obtained using Bruker 125HR spectrometer at Saint

Petersburg site of the NDACC measurement network. We simultaneously analyzed the short-term variations of these trace gases in winter-spring periods for different years from ground-based and satellite spectroscopic measurements along with the numerical simulation data.

This work was supported by the Russian Foundation for Basic Research, grant 18-05-00426. Measurements of solar radiation were performed using the equipment of the SPbSU resource center "Geomodel".

Итеративный алгоритм атмосферной коррекции для определения альbedo снега

Иванов Д.А.¹ (divanov@hmti.ac.by), Катковский Л.В.¹, Иванов А.П.²,
Кохановский А.А.³

¹*Институт прикладных физических проблем им. А.Н. Севченко БГУ, ул. Курчатова 7, 220045 Минск, Беларусь*

²*Институт Физики им. Б.И. Степанова НАНБ, пр. Независимости 68, Минск, 220072, Беларусь*

³*VITROCISET, Darmstadt, Germany*

Мы представляем алгоритм восстановления спектральной яркости снега из спутниковых спектральных данных, регистрируемых с борта авиакосмических носителей, а также новый итерационный метод атмосферной коррекции. Данная методика включает модель атмосферы и ее оптико-физические параметры, которые существенны с точки зрения переноса излучения. Решение обратной задачи по нахождению неизвестных параметров модели осуществляется методом наименьших квадратов (алгоритм Левенберга-Марквордта) для отдельного выделенного пикселя изображения. С использованием найденных параметров атмосферы и спектрального альbedo поверхности в предположении однородности атмосферы в пределах определенной области гиперспектрального изображения выполняется расчет спектрального альbedo у поверхности Земли. Алгоритм включает новую процедуру атмосферной коррекции, которая учитывает функцию спектральной яркости снега.

Этот алгоритм позволяет определять спектральную яркость подстилающей поверхности «на лету» без использования справочных таблиц или трудоемких численных решений уравнения переноса излучения. Вместо этого алгоритм использует параметризованное аналитическое решение уравнения переноса излучения на верхней границе безоблачной атмосферы в видимом и ближнем ИК диапазонах спектра. Метод может быть применен для анализа измерений спектральной яркости и альbedo чистого и загрязненного снега.

Iterative atmospheric correction algorithm for retrieval of reflectance over snow

D.A. Ivanov¹ (divanov@hmti.ac.by), L.V. Katkovsky¹, A.P. Ivanov², A.A. Kokhanovsky³

¹*A.N. Sevchenko Research Institute of Applied Physical Problems of Belarus State University, 7 Kurchatov str., 220045 Minsk, Belarus*

²*B.I. Stepanov Institute of Physics NASB, 68 pr. Nezavisimosti, 220072 Minsk, Belarus*

³*VITROCISET, Darmstadt, Germany*

We present an algorithm for retrieval of reflectance over snow from satellite spectral data along with a new iterative method of atmospheric correction. This technique includes the model of analytical solution to retrieve the snow absorption coefficient and grain size based on the analytical solution for snow reflectance within the asymptotic radiative transfer theory, as well as the atmosphere correction method for retrieval optical parameters of aerosol. The method of finding unknown aerosol parameters is based on the retrieval of spectral reflectance of the underlying surfaces. The algorithm includes a new atmospheric correction procedure that takes into account the snow reflectance distribution function.

This algorithm enables the determination of reflectance of the underlying surface "on the fly" without using look-up-tables (LUT) or time consuming numerical solutions of the radiative transfer equation. Instead the algorithm uses a parameterized analytical solution of the radiative transfer equation for outgoing radiance at the top of atmosphere for a wide range of atmospheric parameters. This method also enables the simulation of hyperspectral snow reflectance measurements in the broad spectral range from ultraviolet to the near infrared for a given snow surface. The technique could be apply for analysis of spectral reflectance measurements and albedo of clean and polluted snow.

Рефракционные особенности радиоволн в тропосфере на разных широтах Сибири

Дембелова А.М., Дембелов М.Г. (mdembelov@mail.ru), Аюров Д.Б.

Институт физического материаловедения СО РАН, ул. Сахьяновой 6, 670047 Улан-Удэ, Россия

Рассмотрены рефракционные параметры радиоволн над ключевыми пунктами наблюдения в разных широтных зонах Сибири (Тикси, Якутск и Иркутск). Значения температуры и относительной влажности воздуха на разных высотных уровнях атмосферного давления определялись по данным запусков метеорологических радиозондов (сайт университета Вайоминг). Дополнительно для восстановления вертикальных профилей температуры и влажности воздуха на разных уровнях атмосферного давления имеется возможность использования современных космических технологий, позволяющих подробно исследовать атмосферу с применением инструментального комплекса ATOVS на полярно-орбитальных спутниках NOAA с пространственным разрешением 20 км в ИК-диапазоне и 50 км в волновом диапазоне.

Показаны примеры сравнения высотных температурных профилей, полученных в результате запусков радиозондов и по данным полярно-орбитальных спутников NOAA. В результате усреднения данных метеорологических измерений получены экспоненциальные модели высотных зависимостей индексов рефракции для трех ключевых пунктов наблюдения за 2017 г. в разные сезоны года. Рассмотрены значения полной тропосферной задержки, которые получены в результате обработки данных постоянных GPS измерений. О такой задержке можно говорить относительно сигнала, который распространяется в тропосфере, тропопаузе и нижней части стратосферы. Величина тропосферной задержки в основном зависит от физических свойств атмосферы и отклонения источника от зенитного направления. Если источник сигнала (спутник GPS) находится в зенитном направлении, то задержка будет минимальна, и будет называться полной тропосферной зенитной задержкой сигналов (ZTD). Получены ряды многолетних измеренных данных по полной тропосферной зенитной задержке для пунктов наблюдения ТИХИ (Тикси), YAKT (Якутск) и IRKM (Иркутск). Показана методика определения «сухой» компоненты тропосферной зенитной задержки ZHD без использования каких-либо метеорологических данных. В таком случае легко находится «влажная» компонента $ZWD = ZTD - ZHD$. На основе данных «сухой» и «влажной» компонент тропосферной задержки выявляются приземные значения индекса рефракции.

Приведены примеры расчетных значений полных и истинных углов рефракции для видимых зенитных углов, близких 90 градусам, для трех ключевых пунктов наблюдения. Представлены зависимости тропосферных углов от величины «видимого» зенитного угла. Предложена и обоснована методика нахождения приземных значений показателя преломления и углов рефракции на основе измеренных посредством GPS данных по полной тропосферной зенитной задержке без использования метеорологических данных.

Таким образом, использование метеорологических данных запусков радиозондов и полярно-орбитальных спутников NOAA по вертикальным профилям температуры и влажности воздуха на разных уровнях атмосферного давления позволяет успешно

восстанавливать вертикальные профили индекса рефракции с целью получения характерных сезонных данных параметров экспоненциальной модели для выбранных пунктов наблюдения. Зондирование нижней части атмосферы методом GPS измерений с последующим использованием значений экспоненциальных параметров тропосферы позволяет эффективно исследовать рефракционные эффекты как самих сигналов GPS, так и других сигналов в диапазоне УКВ.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ и Министерства образования и науки Республики Бурятия в рамках научного проекта № 18-47-030007-р_а.

Refractive features of radio waves in the troposphere at different latitudes of Siberia

A.M. Dembelova, M.G. Dembelov (mdembelov@mail.ru), D.B. Ayurov

Institute of Physical Materials Science SB RAS, 6 Sakhyanova str., 670047 Ulan-Ude, Russia

The refractive parameters of radio waves above key observation points in different latitudinal zones of Siberia (Tiksi, Yakutsk and Irkutsk) are considered. The values of temperature and relative air humidity at different altitudinal levels of atmospheric pressure were determined according to the data of meteorological radiosonde launches (website of the University of Wyoming). In addition, to restore vertical profiles of air temperature and humidity at different levels of atmospheric pressure, it is possible to use modern space technologies to research the atmosphere in detail using the ATOVS instrumental complex on the NOAA polar-orbiting satellites with a spatial resolution of 20 km in the IR range and 50 km in the wave range.

Examples of comparison of altitude temperature profiles obtained as a result of radiosonde launches and data from polar orbiting NOAA satellites are shown. As a result of averaging the meteorological measurement data, exponential models of the altitude dependences of the refraction indices were obtained for three key observation points for 2017 in different seasons of the year. The values of the total tropospheric delay, which are obtained as a result of processing the data of permanent GPS measurements, are considered. We can speak about such delay with respect to the signal that propagates in the troposphere, the tropopause, and the lower part of the stratosphere. The magnitude of the tropospheric delay mainly depends on the physical properties of the atmosphere and the deviation of the source from the zenith direction. If the signal source (GPS satellite) is in the zenith direction, the delay will be minimal and will be called the full tropospheric zenith signal delay (ZTD). A series of long-term measured data on the full tropospheric zenith delay for the observation points TIXI (Tiksi), YAKT (Yakutsk) and IRKM (Irkutsk) were obtained. The technique for determining the “dry” component of the ZHD tropospheric zenith delay without using any meteorological data is shown. In this case, the “wet” component is easily found: $ZWD = ZTD - ZHD$. Based on the data of the “dry” and “wet” components of the tropospheric delay, surface values of the refraction index are revealed. Examples of calculated values of total and “true” refraction angles for visible zenith angles close to 90 degrees for three key observation points are given. The dependences of tropospheric angles on the “visible” zenith angle are shown. A method of finding the surface refractive index values and refraction angles based on the measured data of the full tropospheric zenith delay without using meteorological data is proposed and substantiated.

Thus, the use of meteorological data of radiosonde and polar-orbital NOAA satellite launches using vertical profiles of air temperature and humidity at different levels of atmospheric pressure makes it possible to successfully recover vertical profiles of the refraction index in order to obtain characteristic seasonal data of the parameters of the exponential model for the observation points. The sounding of the lower part of the atmosphere using GPS measurements with the subsequent use of the values of the exponential parameters of the troposphere makes it possible to effectively research the refraction effects of both the GPS signals themselves and other signals in the VHF range.

This work was supported by the Russian Foundation for Basic Research and the Ministry of Education and Science of the Republic of Buryatia in the framework of the research project No. 18-47-030007-r_a.

Оценки долговременных трендов содержания климатически важных атмосферных газов вблизи Санкт-Петербурга

Тимофеев Ю.М. (y.timofeev@spbu.ru), Поляков А.В., Виролайн Я.А., Макарова М.В.,
Ионов Д.В., Поберовский А.В., Имхасин Х.

*Санкт-Петербургский государственный университет, физ. фак., Университетская наб. 7/9, 199034
Санкт-Петербург, Россия*

На основе наземных Фурье спектрометрических измерений в Петергофе получен ~ 10-летний массив (2009–2018 гг.) общих содержаний различных климатически важных атмосферных газов. На основе этих измерений впервые в России получены комплексные оценки долговременных трендов содержания 13 климатически важных газов. Для 10 из них эти оценки оказались достоверны. Тренды основных парниковых газов – CO₂, CH₄ и N₂O – определяются с высокой точностью (погрешности ~ 0.02%), положительны и составляют значения 0.52, 0.42 и 0.28%, соответственно. Сравнения трендов метана с более ранними оценками позволяют предположить, что в последние годы тренд метана вблизи Санкт-Петербурга возрос. Вблизи Санкт-Петербурга наблюдаются отрицательные тренды содержаний тропосферного озона (– 0.75±0.56%/год), CFC-11 и CFC-12 (~ – 0.5–1.0%/год) и ClONO₂ (– 2.3%). Содержания HF, NO₂ и HCFC-22 в окрестностях Санкт-Петербурга растут, причем последних двух газов значительно ~ 2–4% год.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант 18-05-00426 – измерения, грант 8-05-00011 – интерпретация). Измерения солнечного излучения выполнялись с использованием аппаратуры ресурсного центра СПбГУ «Геомодель».

Estimates of long-term trends in the content of climate-affecting atmospheric gases near St. Petersburg

Yu.M. Timofeev (y.timofeev@spbu.ru), A.V. Polyakov, Ya.A. Virolainen, M.V. Makarova,
D.V. Ionov, A.V. Poberovsky, H.H. Imkhasin

Saint-Petersburg State University, Physics Faculty, 7/9 Universitetskaya nab., 199034 Saint-Petersburg, Russia

The total column amounts of various climate-affecting atmospheric gases in Peterhof (2009–2018) were obtained using the ground-based Fourier transform spectrometer measuring direct Sun radiation. Long-term content trends for 13 trace gases were estimated on the basis of these measurements for the first time in Russia. For ten of them, these estimates were reliable. Trends of the main greenhouse gases, CO₂, CH₄ and N₂O, are determined with high accuracy (~ 0.02%), positive and equal to 0.52, 0.42 and 0.28%, respectively. Comparison of trends in methane with earlier our estimates suggest that in recent years the trend of methane near St. Petersburg increased. Near Saint Petersburg there are negative trends in the total amount of tropospheric ozone (– 0.75±0.56% per year), CFC-11 and CFC-12 (~ – 0.5–1.0% per year) and ClONO₂ (– 2.3% per year). Trends of total amount for HF, NO₂ and HCFC-22 in the vicinity of St. Petersburg are positive and significant (~ 2–4% per year) for latter two gases.

The work was supported by RFBR (grant 18-05-00426 – measurements, grant 8-05-00011 – interpretation). Measurements of solar radiation were performed using the scientific equipment belonging the "Geomodel" resource center of SPbSU.

Анализ сезонной изменчивости грозовой активности в северо-восточной части Азии в 2009–2018 гг.

Тарабукина Л.Д. (tarabukina@ikfia.ysn.ru), Иннокентьев Д.Е., Козлов В.И.
*Институт космических исследований и аэронавтики им. Ю.Г. Шафера СО РАН, пр. Ленина 31,
677027 Якутск, Россия*

Инструментальные наблюдения за грозовой активностью в северо-восточной части Азии ведутся с начала 21 века в Якутии, позднее начаты наблюдения в Камчатском крае и

Республике Бурятии. Приборная база для регистрации атмосфериков (очень низкочастотных радиоимпульсов, излучаемых молниевыми разрядами) в Якутии была расширена в 2009 г. относительно короткодействующими (эффективный радиус детектирования до 480 км, 300 миль) однопунктовыми грозопеленгаторами Stormtracker и LD-250 фирмы Boltek Co. В том же году станция в г. Якутске вошла в мировую многопунктовую сеть World Wide Lightning Location Network (WWLLN). Многопунктовая сеть позволяет более точно отслеживать место удара молнии (до десятков км), однако не разделяет сигналы по типам молний, а также имеет относительно низкую эффективность детектирования грозовых разрядов по сравнению с однопунктовыми грозопеленгаторами. Многопунктовые системы лучше регистрируют сигналы от молниевых разрядов с большими токами (эффективность детектирования в среднем возрастает в два раза).

Посредством указанных выше приборов получены вариации суммарного на территории центральной части и всей площади (до 1200 км в радиусе и в ограничении по широтно-долготным границам – 105–150 в.д., 55–75 с.ш.) Якутии количества атмосфериков грозовых разрядов за сутки, месяц, сезон и по годам. Сезон гроз максимальной длительности развивается со второй декады мая до первой декады сентября. Наиболее продолжительные грозовые сезоны могут наблюдаться в южной части Якутии. Отмечается некоторое увеличение длительности сезона до 2015 г. в центральной части Якутии. Межгодовые вариации суммарного количества грозовых разрядов показывают периодические колебания (с периодом около 3 лет) для всей территории Якутии. Суммарное по месяцам количество грозовых разрядов выявляет смещение периодов активности внутри сезона из года в год. Таким образом, период максимальной частотности молний попадает то на начало лета, потом на середину и в начало августа с периодом около 3 лет. Периодов повышенной грозовой активности может быть до ~3, в среднем около 2 при усреднении скользящим средним до двух недель (по максимальной длительности циклонов). При смещении периодов повышенной активности к началу лета наблюдается уменьшение разности дней между пиками (при выборке двух максимумов). А при смещении максимума на начало августа, второй пик приходится на июнь, поэтому разность дней между двумя пиками увеличивается. Доля молний типа «облако–земля» (ОЗ) несколько снижается к 2016 г. по центральной части Якутии до 36% от общей суммы, как и доля отрицательных ОЗ разрядов. При этом стоит учесть, что прибор дает несколько завышенное значение доли ОЗ молний в силу своей конструкции, однако с годами прибор не видоизменялся, что позволяет судить о динамике изменений.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-35-00215 мол_а. Приборная база поддерживается за счет бюджетной темы II.16.2.1. (номер госрегистрации № AAAA-A17-117021450059-3).

Analysis of seasonal variability of lightning activity in north-eastern part of Asia in 2009–2018

L.D. Tarabukina (tarabukina@ikfia.ysn.ru), D.E. Innokentiev, V.I. Kozlov
Yu.G. Shafer Institute of Cosmophysical Research and Aeronomy SB RAS, 31 Lenin ave., 677027 Yakutsk, Russia

The instrumental observations of lightning activity in North-Eastern Asia have been conducted since the beginning of the 21st century in Yakutia, and later observations began in the Kamchatka Krai and the Republic of Buryatia. The instrumental base for recording sferics (very low-frequency radio pulses emitted by lightning discharges) in Yakutia was expanded in 2009 with relatively short-range (effective detection radius is up to 480 km, 300 miles) finders with single-point direction produced by Boltek Co. In the same year, the station in Yakutsk entered the World Wide Lightning Location Network (WWLLN) global network. The network allows to track the location of a lightning stroke more accurately (up to tens of kilometers), but it does not separate signals by the lightning types and has a relatively low detection efficiency for lightning strokes in

comparison with single-point direction finders. Multipoint system better detects signals from lightning strokes with large current (the detection efficiency almost doubled).

We got the diurnal, monthly, seasonal and interannual variations of the total number of lightning strokes over the territory of the central part and the entire area (in radius up to 1200 km and within the limits of 105–150° E, 55–75° N) of Yakutia, using the above described instruments. The maximum duration of thunderstorm season develops from the second decade of May to the first decade of September. The longest thunderstorm seasons can be observed in the southern part of Yakutia. There was a slight increase in the duration of the thunderstorm season to the largest value in 2015 in the central part of Yakutia. The interannual variations of the total number of lightning strokes showed oscillating fluctuations (with a period of about 3 years) for the entire territory of Yakutia. The monthly number of lightning strokes reveals a shift in periods of activity within the season from year to year. Thus, the days of maximum lightning activity occurred in the summer beginning, then in the middle of summer and in the beginning of August with a period of about 3 years. The number of groups of days with increased lightning activity can be up to 3, on average it was about 2 revealed by the moving the average of up to two weeks (by the maximum duration of cyclones). When the groups of days with increased lightning activity shifted to the beginning of summer, a decrease in the difference between the two peaks days was observed (the sample of two days with largest peak lightning number). With a shift of the maximum at the beginning of August, the second peak was in June, therefore the difference between the days of two peaks increased. The ratio of cloud-to-ground (CG) lightning strokes was slightly reduced to 36% of the total by 2016 in the central part of Yakutia as well as the ratio of negative CG strokes. It is noted that the device gives a slightly overestimated value of the CG lightning stroke ratio due to its design, although the device has not changed over the years that allows to estimate the dynamics of changes.

The reported study was funded by the Russian Foundation for Basic Research according to the research project No. 18-35-00215 mol_a. The instrument base is supported by the project II.16.2.1. (the state registration number № AAAA-A17-117021450059-3).

Экспериментальная апробация наземного пассивного метода дистанционного детектирования радиоактивных выбросов предприятий ядерно-топливного цикла

Колотков Г.А. (kolotkov@iao.ru)

Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, пл. Ак. Зюева 1, 634055 Томск, Россия

В настоящее время вместе с развитием ядерной энергетики развиваются и методы определения повышенной радиоактивности в приземной атмосфере. Наиболее перспективным с точки зрения дистанционного мониторинга газоаэрозольных выбросов предприятий ядерно-топливного цикла (ЯТЦ) в режиме реального времени является косвенный метод, разработанный в ИОА СО РАН [1]. Суть его состоит в том, что выбрасываемые в атмосферу бета-радиоактивные элементы (^{41}Ar , ^{85}Kr , ^{133}Xe , ^{131}I и другие) распадаются и образуются высокоэнергетичные электроны, которые в свою очередь ионизируют окружающую среду. В результате происходят не типичные для стандартной атмосферы фотохимические реакции с появлением так называемых маркеров радиоактивности. В рассматриваемом методе выбраны атомарный водород и гидроксил, которые спонтанно излучают на частотах 1420 и 1665–1667 МГц. Детектируя данное излучение можно говорить о наличии повышенной радиоактивности в атмосферных выбросах предприятий ЯТЦ.

С использованием опытного образца двухканального радиометрического комплекса, работающего в частотном диапазоне 1.4–1.7 ГГц, были проведены полевые исследования атмосферных выбросов Сибирского химического комбината (СХК, г. Северск). Представлены измерения сигнала на частотах 1.4–1.7 ГГц из шлейфа выброса, полученные с помощью двухканального радиометрического комплекса. Исследования, проведенные в

реальных зимних условиях, выявили основные «недоработки» опытного образца двухканального радиометрического комплекса, работающего в частотном диапазоне 1.4–1.7 ГГц. В результате натурных измерений сигнала, получаемого от радиоактивного газоаerosольного выброса СХК была показана возможность дистанционного детектирования повышенной радиоактивности в облаке выброса ядерно-топливного предприятия.

1. Kolotkov, G., Penin, S. Remote monitoring of emission activity level from NPP using radiofrequencies 1420, 1665, 1667 MHz in real time // J. Env. Radioact. 2013. V. 115. P. 69–72.

Experimental approbation of the ground-based passive method for remote detection of radioactive releases from nuclear fuel cycle enterprises

G.A. Kolotkov (kolotkov@iao.ru)

V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics SB RAS, 1 Ac. Zuev sq., 634021 Tomsk, Russia

At present, along with the development of nuclear power, methods are being developed for determining the increased radioactivity in the near-surface atmosphere. The most promising method from the point of view of remote monitoring of gas and aerosol emissions from nuclear fuel cycle (NFC) enterprises in real time is the indirect method developed at the IAO SB RAS [1]. Its essence is that the beta-radioactive elements emitted into the atmosphere (^{41}Ar , ^{85}Kr , ^{133}Xe , ^{131}I , and others) disintegrate and high-energy electrons are formed, which in turn ionize the environment. As a result, photochemical reactions that are not typical for the standard atmosphere occur with the advent of so-called radioactivity markers. In the method under consideration, atomic hydrogen and hydroxyl are chosen which spontaneously emit at frequencies of 1420 and 1665–1667 MHz. Detecting this radiation, one can speak of the presence of increased radioactivity in the atmospheric emissions of NFC enterprises.

Using a prototype of the two-channel radiometric complex operating in the frequency range 1.4–1.7 GHz, field studies of the atmospheric emissions of the Siberian Chemical Plant (Seversk) were conducted. Measurements of the signal at frequencies of 1.4–1.7 GHz from the emission plume, obtained using a two-channel radiometric complex, are presented. Studies conducted in real winter conditions have revealed the main “flaws” of the prototype of a two-channel radiometric complex operating in the frequency range 1.4–1.7 GHz. As a result of field measurements of the signal received from the radioactive gas-aerosol release of the Siberian Chemical Plant, the possibility of remote detection of increased radioactivity in the emission cloud of a nuclear fuel company was shown.

1. Kolotkov, G., Penin, S. Remote monitoring of emission activity level from NPP using radiofrequencies 1420, 1665, 1667 MHz in real time // J. Env. Radioact. 2013. V. 115. P. 69–72.

Радиометрический контроль изменчивости параметров атмосферы с целью уточнения прогноза обледенения воздушных судов. Аппаратура, методика, результаты

Ильин Г.Н.¹ (igen@iaaras.ru), Быков В.Ю.¹, Стэмповский В.Г.¹, Шишкин А.М.¹, Шелехов А.П.², Павлинский А.В.², Шелехова Е.А.², Зуев В.В.², Мордус Д.П.²

¹Институт прикладной астрономии РАН, наб. Кутузова 10, 191187 Санкт-Петербург, Россия

²Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, пр. Академический 10/3, 634055 Томск, Россия

Обледенение воздушного судна в полете относится к числу опасных атмосферных явлений, которые в первую очередь необходимо прогнозировать при освоении и использовании воздушного пространства. Ввиду ряда особенностей поведения переохлажденного водяного пара и жидкости в облаках и высокой внутрисуточной нестабильности параметров атмосферы в пространстве и во времени в области раздела «море–суша» особо значимой и актуальной проблемой является создание новых дистанционных технологий оперативного (в реальном времени) определения параметров

среды, отличающихся высоким пространственно-временным разрешением. Подобные технологии призваны обеспечить сбор необходимых метеорологических данных для интеллектуальных авиационных транспортных систем.

Основная цель работы заключается в разработке технологии прогнозирования обледенения воздушного судна в полете на основе дистанционного радиометрического контроля изменчивости параметров атмосферы прибрежной зоны с использованием оперативных данных об общем влагосодержании и профиле температуры. В работе представлены описание аппаратуры, методика, результаты мониторинга параметров атмосферы и прогноза обледенения воздушных судов в прибрежной зоне Финского залива. Радиометрический контроль изменчивости параметров атмосферы осуществлялся с применением специализированного радиометрического комплекса РМС-1 и метеорологического температурного профилера МТП5-РЕ. РМС-1 позволяет измерять общее влагосодержание (водосодержание) в зенитном направлении с периодичностью 1 минута. Метеорологический температурный профилер МТП5-РЕ осуществляет мониторинг профиля температуры с периодичностью 5 – 10 минут, в диапазоне высот от 0 до 1000 м с пространственным разрешением 10–25–50 м.

В основу предлагаемой методики прогноза обледенения воздушного судна положен оригинальный подход, основанный на анализе непрерывных рядов наблюдений статистическими методами с целью определения повторяемости обледенения в зависимости от общего влагосодержания и температуры и расчета диапазонов наиболее вероятных изменений температуры и общего влагосодержания, при которых возможно обледенение воздушного судна. Суточные вариации общего влагосодержания и профиля температуры получены на площадке ИПА РАН в Санкт-Петербурге с октября 2018 г. по июнь 2019 г. Периоды, когда наблюдалось явление обледенения воздушного судна, определялись по данным аэропорта Пулково. Показано, что при регистрации явления обледенения воздушного судна наиболее вероятные значения общего влагосодержания удовлетворяют условию $Q \geq 4 \text{ кг/м}^2$, а наиболее вероятные значения температуры воздуха лежат в диапазоне $-16^\circ\text{C} \leq T \leq 0^\circ\text{C}$. Вероятные значения указанных величин следует рассматривать в качестве необходимых условий возникновения обледенения воздушного судна в полете в пределах прибрежной зоной Финского залива. В докладе представлены результаты сравнения прогноза обледенения воздушного судна в полете с данными о фактическом обледенении для аэропорта Пулково.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-05-80051.

Radiometric monitoring of the variability of atmospheric parameters in order to improve the aircraft icing forecast. Equipment, methods and results

G.N. Ilin (igen@iaaras.ru)¹, V.Yu. Bykov¹, V.G. Stempkovskiy¹, A.M. Shishikin¹, A.P. Shelekhov², A.V. Pavlinsky², E.A. Shelekhova², V.V. Zuev², D.P. Mordus²

¹*Institute of Applied Astronomy RAS, 10 Kutuzov nab., 191187 Saint-Petersburg, Russia*

²*Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems SB RAS, 10/3 Akademicheskoy ave., 634055 Tomsk, Russia*

Aircraft icing in flight is one of the dangerous atmospheric phenomena that must first be predicted during the development and use of airspace. A number of features of the behavior of supercooled water vapor and liquid water in the clouds and the high day-to-day instability of atmospheric parameters in space and time in the coastal areas make the creation of new remote technologies for operational (real-time) determination of atmospheric parameters with high spatial and temporal resolution a particularly important and urgent problem. Such technologies are designed to gather the necessary meteorological data for intelligent aircraft transport systems.

This work is intended to developing a technology for forecasting in-flight aircraft icing based on remote radiometric monitoring of the coastal zone atmosphere parameters using real-time data

on the total water content and air temperature profiles. The work presents a description of the equipment, methodology, results of atmospheric parameters monitoring and aircraft icing forecasting in the coastal zone of the Gulf of Finland. Radiometric monitoring of atmospheric parameters was carried out using specialized radiometric complex RMS-1 and meteorological temperature profiler MTP5-PE. RMS-1 measures the total vapor content (water content) in the zenith direction with intervals of 1 minute. Meteorological temperature profiler MTP5-PE monitors the air temperature profile with intervals of 5 to 10 minutes, in the altitude range from 0 to 1000 m with spatial resolution 10, 25 and 50 m.

The proposed method for aircraft icing prediction implements an original approach based on the analysis of continuous observation series using statistical methods in order to determine the icing repeatability depending on the total vapor content and temperature and calculate the most likely temperature and total vapor content ranges for which the icing is possible. Daily variations in the total vapor content and temperature profiles were obtained at the site of the IAA RAS in St. Petersburg from October 2018 to June 2019. The periods with the aircraft icing observed were determined according to the meteorological data of Pulkovo airport. It is shown that during icing periods, the most probable values of total vapor content satisfy the condition $Q \geq 4 \text{ kg/m}^2$, and the most probable air temperature values are in the range of $-16^\circ\text{C} \leq T \leq 0^\circ\text{C}$. These probable values should be considered as the necessary conditions for the occurrence of aircraft icing in-flight within the coastal zone of the Gulf of Finland. The report presents the results of a comparison of the icing forecast with data on actual icing (crew reports) for Pulkovo Airport.

The study was performed with financial support of RFBR, research project No. 18-05-80051.

Дистанционный подход к моделированию полей термокарстовых озер

Полищук В.Ю.¹, Полищук Ю.М.², Чередыко Н.Н.¹ (atnik3@rambler.ru), Муратов И.Н.²

¹Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Академический пр. 10/3, 634055 Томск, Россия

²Югорский научно-исследовательский институт информационных технологий, ул. Мира 151, 628011 Ханты-Мансийск, Россия

Законсервированный в обширных мерзлых торфяных болотах Сибири и Северной Америки углерод, высвобождаясь в атмосферу при потеплении климата, может стать источником усиления потепления, усугубляя уже существующие эколого-экономические последствия и актуализируя новые большие вызовы для России. В работах [1, 2], проведенных в зоне мерзлоты Западной Сибири в 2007–2016 гг., установлена доминирующая роль малых термокарстовых озер с площадью менее 0.01–0.05 га в выделении углекислого газа и метана в атмосферу. Однако вклад миллионов таких озер в глобальный парниковый эффект из-за их малых размеров и крайне высокой численности до сих пор не учитывается. В связи с труднодоступностью территорий в зоне мерзлоты единственным возможным подходом к учету их роли может быть использование пространственных имитационных моделей климатозависимых процессов, происходящих в природной среде. Такая модель применительно к моделированию динамики полей термокарстовых озер в зоне мерзлоты в условиях изменения климата, основанная на геоимитационном подходе и данных спутникового мониторинга, разрабатывается в нашей научной группе [3].

Изложен подход к моделированию пространственной структуры полей термокарстовых озер на основе геоимитационной модели, представляющей совокупность случайных окружностей с равномерным распределением координат их центров и логнормальным распределением площадей. Экспериментальное обоснование логнормального распределения размеров озер проведено на основе результатов обработки космических снимков различного пространственного разрешения. Кратко описана процедура моделирования поля термокарстовых озер, представлен фрагмент смоделированного поля термокарстовых озер, статистические характеристики модельного поля озер получены по снимкам среднего и

высокого пространственного разрешения. Полученные результаты могут быть использованы для получения прогнозов динамики полей термокарстовых озер криолитозоны Северной Евразии.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (Грант № 18-45-703001 p_mol_a).

1. Pokrovsky O.S., Shirokova L.S., Kirpotin S.N. et al. Effect of permafrost thawing on the organic carbon and metal speciation in thermokarst lakes of Western Siberia // *Biogeosciences*. 2011. V. 8. P. 565–583.
2. Shirokova L.S., Pokrovsky O.S., Kirpotin S.N. et al. Biogeochemistry of organic carbon, CO₂, CH₄, and trace elements in thermokarst water bodies in discontinuous permafrost zones of Western Siberia // *Biogeochemistry*. 2013. V. 113, No (1–3). P. 573–593.
3. Полищук В.Ю., Полищук Ю.М. Геоимитационное моделирование полей термокарстовых озер в зонах мерзлоты. – Ханты-Мансийск: УИП ЮГУ. 2013. 129 с.

Remote approach to modeling the fields of thermokarst lakes using satellite images

V.Yu. Polischuk¹, Yu.M. Polischuk², N.N. Cheredko¹ (atnik3@rambler.ru), I.N. Muratov²

¹*Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems SB RAS, 10/3 Akademicheskoy ave., 634055 Tomsk, Russia*

²*Yugorsky Research Institute of Information Technologies, 151 Mira str., 628011 Khanty-Mansiysk, Russia*

Carbon conserved in the vast frozen peatlands of Siberia and North America, released into the atmosphere during climate warming, can become a source of increasing warming, aggravating the already existing environmental and economic consequences and actualizing new major challenges for Russia. In works [1, 2], carried out in the permafrost zone of Western Siberia in 2007–2016, the dominant role of small thermokarst lakes with an area of less than 0.01–0.05 hectares in the release of carbon dioxide and methane into the atmosphere was established. However, the contribution of millions of such lakes to the global greenhouse effect due to their small size and extremely high abundance is still not taken into account. Due to the inaccessibility of the territories in the permafrost zone, the only possible approach to taking into account their role can be the using of spatial simulation models of climate-dependent processes occurring in the natural environment. Such a model in relation to modeling the dynamics of the thermokarst lakes fields in the permafrost zone under conditions of climate change, based on the geo-simulation approach and satellite monitoring data, is being developed in our scientific group [3].

The approach to modeling the spatial structure of the thermokarst lakes fields based on a geo-simulation model representing a set of random circles with a uniform distribution of the coordinates of their centers and a log-normal distribution of areas is presented. Experimental substantiation of the log-normal distribution of lake sizes was carried out based on the results of processing satellite images of various spatial resolutions. The procedure for modeling the thermokarst lakes fields is briefly described, a fragment of the modeled field of thermokarst lakes is presented, the statistical characteristics of the model field of thermokarst lakes are obtained from medium and high spatial resolution images. The obtained results can be used to obtain predictions of the dynamics of the thermokarst lakes fields in the cryolithozone of Northern Eurasia.

This work was carried out with the partial support of the Russian Foundation for Basic Research (Grant No. 18-45-703001 p_mol_a).

1. Pokrovsky O.S., Shirokova L.S., Kirpotin S.N. et al. Effect of permafrost thawing on the organic carbon and metal speciation in thermokarst lakes of Western Siberia // *Biogeosciences*. 2011. V. 8. P. 565–583.
2. Shirokova L.S., Pokrovsky O.S., Kirpotin S.N. et al. Biogeochemistry of organic carbon, CO₂, CH₄, and trace elements in thermokarst water bodies in discontinuous permafrost zones of Western Siberia // *Biogeochemistry*. 2013. V. 113, No (1–3). P. 573–593.
3. Polischuk V.Yu., Polischuk Yu.M. Geo-imitational simulation of thermokarst lake fields in permafrost zones. – Khanty-Mansiysk: UIP YuGU. 2013. 129 pp. (in Russian).

Восстановление вертикального профиля отношения $\text{HDO}/\text{H}_2\text{O}$ в атмосфере из двух спектральных диапазонов: метод, программное обеспечение, характеристика

Задворных И.В.¹ (ilia.zadvornyh@urfu.ru), Грибанов К.Г.¹, Захаров В.И.¹,
Денисова Н.Ю.¹, Васин В.В.¹, Имасу Р.²

¹Уральский федеральный университет, лаб. физики климата и окружающей среды, пр. Ленина 51,
620083 Екатеринбург, Россия

²Институт атмосферы и океана, университет Токио, Япония

Мониторинг изотопического состава водяного пара в атмосфере позволяет получить информацию о водном цикле климатической системы Земли. Так, процессы конденсации тяжелого изотополога воды HDO происходят быстрее, а процессы испарения медленнее, в отличие от основного изотополога H_2^{16}O , и каждый цикл испарения и конденсации приводит к уменьшению относительного содержания HDO в атмосферном водяном паре. Таким образом, изменение соотношения $\text{HDO}/\text{H}_2\text{O}$ (обычно выражаемое в дельта величинах δD) в атмосферном водяном паре содержит информацию о происхождении и циркуляции воздушных масс в атмосфере Земли [1]. В работе [2] на примере метана было продемонстрировано преимущество метода обращения спутниковых спектров, измеренных одновременно в тепловом и ближнем ИК диапазонах, по сравнению с обращением спектров каждого диапазона по отдельности.

В настоящей работе мы исследовали возможность применения данного метода для восстановления вертикального профиля δD из спектральных диапазонов спектрорадиометров TANSO-FTS, установленных на японских спутниках GOSAT и GOSAT-2, которые являются единственными инструментами, способными выполнять радиационные измерения в обоих спектральных диапазонах одновременно. Решение обратной задачи по восстановлению профиля δD выполнено двумя методами: итеративно регуляризационным методом Гаусса-Ньютона и методом оптимального оценивания. В качестве статистического ансамбля использовались выходные данные изотопической версии модели общей циркуляции атмосферы ECHAM5-iso. Вычислены ядра усреднения, апостериорные ковариационные матрицы и степени свободы. Приведено сравнение методов восстановления. Алгоритм восстановления реализован с помощью оригинального программного обеспечения FIRE-ARMS [3] с включением в него модели радиационного переноса VLIDORT [4].

Работа выполнена в рамках исследований, поддержанных грантом РФФИ №18-11-00024.

1. Brenninkmeijer C.A.M., Janssen C., Kaiser J. et al. Isotope effects in the chemistry of atmospheric trace compounds // Chem. Rev. 2003. V. 103, No 12. P. 5125–5162.
2. Задворных И.В., Грибанов К.Г., Захаров В.И., Имасу Р. Метод для определения вертикального профиля метана из спектров атмосферы, измеренных одновременно в тепловом и ближнем ИК диапазонах // Оптика атмосферы и океана. 2018. Т. 31, № 12. С. 962–967.
3. Gribanov, K.G., Zakharov, V.I., Tashkun, S.A., Tyuterev, V.I. A new software tool for radiative transfer calculations and its application to IMG/ADEOS data // J.Q.S.R.T. 2001. V. 68, No 4. P. 435–451.
4. Spurr, R.J.D. VLIDORT: A linearized pseudo-spherical vector discrete ordinate radiative transfer code for forward model and retrieval studies in multilayer multiple scattering media // J.Q.S.R.T. 2006. V. 102, No 2. P. 316–342.

The joint atmospheric $\text{HDO}/\text{H}_2\text{O}$ ratio profile retrieval from two spectral ranges: method, software and characteristic

I.V. Zadvornyh¹ (ilia.zadvornyh@urfu.ru), K.G. Gribanov¹, V.I. Zakharov¹,
N.Yu. Denisova¹, V.V. Vasin¹, R. Imasu²

¹Ural Federal University, Climate and Environmental Physics Laboratory, 51 Lenin ave., 620083
Yekaterinburg, Russia

²Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo, Japan

Monitoring the isotopic composition of water vapor in atmospheric air provides information on hydrological cycle in the Earth's climate system. Condensation and evaporation processes for

HDO and H₂¹⁶O isotopologues occur at different rates. This leads to decreasing in HDO content in the air. Thus, variations of HDO/H₂O ratio (δD) in atmospheric water vapor provides information on origin and circulation of air masses in the atmosphere [1]. In [2] we demonstrated better methane retrieval from satellite spectra, measured simultaneously in the thermal and near-IR ranges, as compared with retrieval from each spectral range separately.

Here, we investigated possibility to apply this method for vertical δD profile retrieval from TANSO-FTS spectral ranges onboard the Japanese GOSAT and GOSAT-2 satellites, which are the only instruments capable to perform measurements in both spectral ranges simultaneously. We applied two methods to solve inverse problem: iteratively regularized Gauss-Newton method and optimal estimation method. The output data of ECHAM5-iso atmospheric general circulation model were used as a statistical ensemble. The averaging kernels, a posteriori covariance matrices and degrees of freedom are calculated. A comparison of methods is presented. The retrieval algorithm is implemented using FIRE-ARMS software [3] and VLIDORT radiation transfer model [4].

The study supported by the Russian Science Foundation grant No. 18-11-00024.

1. Brenninkmeijer C.A.M., Janssen C., Kaiser J. et al. Isotope effects in the chemistry of atmospheric trace compounds // Chem. Rev. 2003. V. 103, No 12. P. 5125–5162.
2. Zadornyykh I.V., Gribanov K.G., Zakharov V.I., Imasu R. Methane Vertical Profile Retrieval from the Thermal and Near-Infrared Atmospheric Spectra // Atm. Ocean. Opt. 2018. V. 31, No 12. P. 962–967 (in Russian).
3. Gribanov, K.G., Zakharov, V.I., Tashkun, S.A., Tyuterev, V.I. A new software tool for radiative transfer calculations and its application to IMG/ADEOS data // J.Q.S.R.T. 2001. V. 68, No 4. P. 435–451.
4. Spurr, R.J.D. VLIDORT: A linearized pseudo-spherical vector discrete ordinate radiative transfer code for forward model and retrieval studies in multilayer multiple scattering media // J.Q.S.R.T. 2006. V. 102, No 2. P. 316–342.

Определение содержания метана из атмосферных солнечных спектров высокого разрешения с использованием различных спектроскопических баз данных

Чеснокова Т.Ю.¹ (ches@iao.ru), Ченцов А.В.¹, Рокотян Н.В.², Захаров В.И.^{2,3}

¹Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, пл. Ак. Зуева 1, 634021 Томск, Россия

²Уральский федеральный университет им. Б.Н. Ельцина, пр. Ленина 51, 620083 Екатеринбург, Россия

³Институт математики и механики УрО РАН, ул. С. Ковалевской 16, 620108 Екатеринбург, Россия

Метан является вторым по значимости парниковым газом после водяного пара и углекислого газа. Регулярный мониторинг содержания метана проводится дистанционными методами, для которых необходима точная спектроскопическая информация по линиям поглощения метана. В работе [1] было показано, что различия в содержании метана в столбе атмосферы, определенного из измерений солнечных спектров на наземном Фурье-спектрометре при использовании параметров линий CH₄ из различных спектроскопических баз данных, могут достигать 2% и более. При этом было отмечено, что использование более новых баз данных в прямой задаче не всегда приводит к лучшему согласию измеренных и модельных спектров. Информация в спектроскопических базах данных постоянно обновляется, поэтому необходимо проводить регулярные оценки новых спектроскопических данных с применением измерений атмосферных спектров, чтобы достичь требуемой точности результатов определения содержания метана.

Проведено моделирование атмосферных солнечных спектров в полосах поглощения метана в ближнем ИК диапазоне и сделано сравнение со спектрами, измеренными на наземном Фурье-спектрометре Bruker IFS 125M в обсерватории Коуровка (57.038° N, 59.545° E) с высоким спектральным разрешением. Определено содержание метана в столбе атмосферы с использованием новых версий спектроскопических баз данных по линиям поглощения. В сравнении участвовали различные версии спектроскопических баз данных HITRAN [2], GEISA [3] и ATM [4], которые наиболее часто используются в атмосферных приложениях, а также банк данных по линиям поглощения CH₄ GOSAT2014 [5]. Расчеты,

выполненные с использованием 950 солнечных спектров, измеренных в Коуровке в 2015 г. в спектральном диапазоне $6000\text{--}6100\text{ см}^{-1}$, показали, что по критериям RMS (среднеквадратичное отклонение рассчитанного спектра от измеренного), DOFS (количество степеней свободы для исследуемого газа) и χ^2 (критерий однородности) наилучшие показатели решения задачи определения содержания метана в столбе были при использовании банка данных ATM и более ранней версии HITRAN2008. Расчеты с использованием новых версий HITRAN2016 и GEISA2015 имели меньшее согласие с измеренными атмосферными спектрами в рассматриваемом спектральном диапазоне. При этом различия в среднемесечном атмосферном содержании CH_4 , определенном с использованием даже двух ближайших версий HITRAN2012 и HITRAN2016 достигают 1.6%.

Исследования выполнены при финансовой поддержке в рамках проекта Программы фундаментальных научных исследований государственных академий наук (AAAA-A17-117021310147-0), грантов РФФИ № 18-45-700011p_a и РФФИ № 18-45-340002p_a, а также при поддержке проекта №3.6064.2017/8.9 в рамках базовой части государственного задания и при финансовой поддержке постановления № 211 Правительства Российской Федерации, контракт № 02.A03.21.0006.

1. Chesnokova T.Yu., A.V. Chentsov, N.V. Rokotyan, V.I. Zakharov. Impact of difference in absorption line parameters in spectroscopic databases on CO_2 and CH_4 atmospheric content retrievals // *Journal of Molecular Spectroscopy*. 2016. V. 327. P.171–179.
2. <https://www.cfa.harvard.edu/hitran/>
3. <http://www.pole-ether.fr>
4. Compilations from Geoffrey Toon (JPL) <http://mark4sun.jpl.nasa.gov/toon/linelist/linelist.html>
5. Nikitin A.V., Lyulin O.M., Mikhailenko S.N. et al. GOSAT-2014 methane spectral line list // *JQSRT*. 2015. V. 154. P. 63–71

Methane content retrievals from high resolution atmospheric solar spectra with use of different spectroscopic databases

T.Yu. Chesnokova¹ (ches@iao.ru), A.V. Chentsov¹, N.V. Rokotyan², V.I. Zakharov^{2,3},

¹V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics SB RAS, 1 Ac. Zuev sq., 634021 Tomsk, Russia

²B.N. Eltsyn Ural Federal University, 51 pr. Lenina, 620083 Ekaterinburg, Russia

³N.N. Krasovskii Institute of Mathematics and Mechanics UB RAS, 16 S.Kovalevskaya str., 620108 Yekaterinburg, Russia

Methane is the second significant greenhouse gas after water vapor and carbon dioxide. Regular monitoring of the atmospheric methane content is carried out by remote methods which require accurate spectroscopic information on the CH_4 absorption line parameters. It is shown in the work [1], the CH_4 values in the atmospheric total content, retrieved from the atmospheric solar spectra with use of different spectroscopic databases, can vary by 2% and more. It is noted that the use of newest spectroscopic databases in direct simulations not always leads to best agreement of the model and measured spectra. The information in spectroscopic databases is routinely updated, therefore it is necessary to estimate regularly new spectroscopic data with use of the atmospheric spectra measurements in order to achieve required accuracy of the methane content retrieval results.

The atmospheric solar spectra in the CH_4 absorption bands in the near infrared spectral region are simulated and compared with the atmospheric spectra measured by Bruker IFS 125M Fourier spectrometer with high spectral resolution in the Kourovka observatory (57.038° N , 59.545° E). The CH_4 content in the atmospheric column is retrieved with use of new versions of spectroscopic databases on absorption line parameters. The different versions of the HITRAN [2], GEISA [3], ATM [4], which are often used in the atmospheric applications, and the GOSAT2014 CH_4 line list [5] are compared. The analysis is carried out with use of the 950 solar spectra, measured in Kourovka in 2015 in the $6000\text{--}6100\text{ см}^{-1}$. It has been shown that according to the RMS, DOFS and χ^2 criteria, the best quality of solving of the methane content retrieval problem is for the results, obtained with use of ATM2016 databank and previous version HITRAN2008. The calculation with new versions of the HITRAN2016 and GEISA2015 are less agreed with the measured spectra in the considered spectral region. At that, the difference between the monthly average CH_4 atmospheric total contents,

retrieved even if with use of two closest versions of HITRAN2016 and HITRAN2012, reaches 1.6%.

The research is supported by Program of fundamental scientific research of state academies of science, Project II.10.3.7 and Projects of RFBR № 18-45-700011 p_a, 18-45-340002 p_a. Also it is supported by the Ministry of Education and Science of Russian Federation through the base part of the State task for high educational institutions (the Research Project No. 3.6064.2017/8.9) and in frame of the Resolution No. 211 of the Government of Russian Federation, Contract №02.A03.21.0006

1. Chesnokova T.Yu., A.V. Chentsov, N.V. Rokotyan, V.I. Zakharov. Impact of difference in absorption line parameters in spectroscopic databases on CO₂ and CH₄ atmospheric content retrievals // Journal of Molecular Spectroscopy. 2016. V. 327. P.171–179.
2. <https://www.cfa.harvard.edu/hitran/>
3. <http://www.pole-ether.fr>
4. Compilations from Geoffrey Toon (JPL) <http://mark4sun.jpl.nasa.gov/toon/linelist/linelist.html>
5. Nikitin A.V., Lyulin O.M., Mikhailenko S.N. et al. GOSAT-2014 methane spectral line list // JQSRT. 2015. V. 154. P. 63–71

Определение температуры воздуха и подстилающей поверхности Земли в модельных расчётах содержания метана в атмосфере

Шишигин С.А. (ssa@iao.ru)

Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, пл. Ак. Зюева 1, 634021 Томск, Россия

Рассмотрена возможность одновременного определения температуры воздуха и концентрации исследуемого газа. Особенностью Р и R-ветвей колебательно-вращательных полос поглощения атмосферных газов является резкое различие изменения коэффициентов поглощения с изменением температуры. Восстановление вертикального профиля исследуемого газа по уходящему излучению Земли как в Р так и R ветвях полосы поглощения исследуемого газа будет однозначно только при установлении истинной температуры слоёв. Данные закономерности продемонстрированы для стандартной модели атмосферы, представленной последовательностью однородных слоёв толщиной 100 метров от поверхности Земли до высоты 5 километров, которая преобразовывалась в виде пары однородных слоёв, толщина которых изменялась от 500 до 4500 метров. Проведено решение системы уравнений для спектральных участков уходящего излучения Земли 1240.901–1240.949 см⁻¹ и 1240.98–1241.02 см⁻¹, а также 1327.05–1327.1 см⁻¹ и 1327.12–1327.17 см⁻¹.

Тепловое излучение поверхности Земли неоднородно из-за рельефа, состава почвы, растительности, озёр, рек, техногенных сооружений и т.д. Ошибочное задание температуры поверхности Земли при расчетах вертикального распределения содержания метана в воздухе по уходящему излучению атмосферы приводит к значительным отклонениям содержания метана в слоях атмосферы. Эти отклонения имеют противоположный знак при расчётах по уходящему излучению в Р или R ветвях полосы поглощения исследуемого газа и увеличиваются с ростом ошибки задания температуры. Данная закономерность позволяет определить истинную излучательную температуру поверхности Земли по сходимости результатов расчёта содержания исследуемого газа в слоях атмосферы одновременно в Р и R ветвях полосы поглощения данного газа.

Definition of the temperature of air and surface in model calculations of the methane concentration in the atmosphere

S.A. Shishigin (ssa@iao.ru)

V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics SB RAS, 1 Ac. Zuev sq., 634055 Tomsk, Russia

The possibility of simultaneous determination of air temperature and the concentration of the test gas is discussed. Feature of P and R-branches of vibrational-rotational absorption bands of atmospheric gases is a sharp difference in the changes of absorption coefficients with temperature variations. Retrieval of the vertical profile of the investigated gas from outgoing Earth radiation

measurements in both P and R branches of the absorption bands will be unambiguous only when the true temperature of the layers is established. These regularities were demonstrated for the standard model of the atmosphere, represented by a sequence of homogeneous layers with a thickness of 100 meters from the earth's surface to a height of 5 kilometers, which was transformed into a pair of homogeneous layers with thickness varied from 500 to 4500 meters. The system of equations was solved for the following spectral ranges of the outgoing Earth radiation: 1240.901–1240.949 cm^{-1} , 1240.98–1241.02 cm^{-1} , 1327.05–1327.1 cm^{-1} and 1327.12–1327.17 cm^{-1} .

Thermal radiation of the Earth's surface is inhomogeneous due to topography, soil, vegetation, lakes, rivers, man-made structures, etc. Wrong temperature setting of the Earth's surface in the calculation of the vertical distribution of methane in the air on the outgoing radiation of the atmosphere leads to significant deviations of the methane concentration in the atmosphere. These deviations have the opposite sign in the calculations using the outgoing radiation at P and R branches of the absorption bands of the test gas, and increases with rising temperature errors. This pattern allows us to determine the true radiative temperature of the earth's surface by the convergence of the results of the calculation of the content of the studied gas in the atmospheric layers simultaneously in P and R branches of the gas absorption band.

Временные вариации концентрации CO₂, CH₄ и CO в пригороде Санкт-Петербурга (Петергоф)

Фока С.Ч. (st030659@student.spbu.ru), Макарова М.В., Поберовский А.В.,
Тимофеев Ю.М.

Санкт-Петербургский государственный университет, Университетская наб. 7/9, 199034 Санкт-Петербург, Россия

Проведено исследование годового и суточного ходов, а также трендов концентрации углекислого газа, метана в 2013–2018 гг. и монооксида углерода за 2013–2017 гг. в пригороде Санкт-Петербурга (59.88° с.ш. 29.83° в.д.). Для всех газов наблюдается следующий годовой ход: CO₂ – амплитуда ~ (2.4–4.6)% (минимум в июле–августе, максимум в январе), CH₄ – (0.6–6.2)% (максимум с января по февраль, минимум в основном в июне), CO – (25–52)% (максимум в январе–феврале, минимум в июне–июле).

Суточный ход концентрации CO₂ минимален с декабря по февраль (амплитуда 0.3%), максимален же в июле–августе (амплитуда – 14%–25%); для CH₄ минимальные значения амплитуды суточного хода (0.2–0.6%) наблюдаются с ноября по февраль, наиболее высокие – в мае–сентябре (1.5–4.6%); суточный ход CO, вне зависимости от времени года, характеризуется наличием минимума в 4–6 ч утра и максимума в 20–22 ч вечера.

За время наблюдений скорость роста концентрации CO₂ составила (2.43±0.15) млн⁻¹/год, CH₄ – (8.7±0.6) млрд⁻¹/год, CO – (–3.3±0.5) млрд⁻¹/год, что сопоставимо с изменениями концентраций газов в глобальном масштабе.

Исследования выполнены при финансировании гранта РФФИ № 14-17-00096, РФФИ № 18-05-00011. Измерения проведены на оборудовании ресурсного центра СПбГУ «Геомодель».

Temporal variations of CO₂, CH₄ and CO concentrations in a Saint-Petersburg suburb (Peterhof)

S.Ch. Foka (st030659@student.spbu.ru), M.V. Makarova, A.V. Poberovsky,
Yu.M. Timofeev

Saint-Petersburg State University, 7/9 Universitetskaya nab., 199034 Saint-Petersburg, Russia

The annual and diurnal variations of the carbon cycle gases concentrations and their trends in a suburb of Saint-Petersburg (59.88° N, 29.83° E) during 2013–2017 for CO and 2013–2018 for CO₂ and CH₄ were investigated. These gases have the annual cycle with the amplitude of (2.4–4.6)% for CO₂ (with the minimum in July–August; the maximum in January), 0.6 to 6.2% for CH₄

(with the maximum in January–February; the minimum in June) and (25–52)% for CO (with the maximum mainly in January–February; the minimum in June–July).

Each gas is characterized by the following diurnal variations: CO₂ – minimal values (with the amplitude of 0.3%) are from December to February, the maximum (with amplitudes of 14%–25.4%) is in July–August; CH₄ – the lowest values (0.2–0.6%) are from November to February, and the highest (1.5–4.6%) are from May to September; CO diurnal cycle has the minimum from 4 to 6 a.m. and the maximum from 8 to 10 p.m., regardless of season.

Growth rates of concentration are (2.43±0.15) ppmv/year for CO₂, (8.7±0.6) ppbv/year for CH₄, and (–3.3±0.5) ppbv/year for CO. These results are comparable with gases concentrations changes in global scale.

Investigation was supported by Russian Science Foundation (grant № 14-17-00096), Russian Foundation for Basic Research (grant № 18-05-00011). Authors thanks Geomodel Research Center (SPbU) for providing the observation facilities.

Пространственные и временные вариации радиационных возмущений CO₂ и новый метод их определения

Тимофеев Ю.М. (y.timofeev@spbu.ru), Виролайнен Я.А., Поляков А.В.
Санкт-Петербургский государственный университет, Университетская наб. 7/9, 199034 Санкт-Петербург, Россия

Основной причиной современных изменений климата является, по современным представлениям, увеличение содержания парниковых газов (CO₂, метан и т.д.) в атмосфере, вызванное антропогенными источниками. Для характеристики этого влияния часто используют величины радиационных возмущений (РВ) (radiation forcing), например, изменения теплового излучения (ТИ) (outgoing longwave radiation – OLR) на верхней границе атмосферы.

Приведен анализ физики возникновения РВ на основе анализа интегральной формы уравнения переноса теплового излучения и показано, что рост содержания CO₂ приводит к увеличению уходящего излучения в центре полос поглощения CO₂ (15, 10 и 4.3 мкм) и уменьшению излучения в их средних частях и крыльях. Это обусловлено расположением излучающих слоев в центре и крыльях полос в разных атмосферных слоях атмосферы в стратосфере и тропосфере, соответственно, и разным вертикальным градиентам температуры в этих слоях.

Проведены расчеты РВ для разных широт и сезонов и исследованы пространственно-временные вариации РВ за счет CO₂ от преиндустриального периода и до концов 21 и 22 столетий (в случае роста содержания CO₂ с современной скоростью). Предложен новый спутниковый метод определения локальных РВ в глобальном масштабе.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант 18-05-00426. Измерения солнечного излучения выполнялись с использованием аппаратуры ресурсного центра СПбГУ «Геомодель».

Spatial and temporal variations of radiative forcing CO₂ and new monitoring method

Yu.M. Timofeev (y.timofeev@spbu.ru), Ya.A. Virolainen, A.V. Polyakov
Saint-Petersburg State University, 7/9 Universitetskaya nab., 199034 Saint-Petersburg, Russia

In modern view, the main cause of the up-to-date climate change is the increase in greenhouse gases (CO₂, methane, etc.) in the atmosphere caused by man-made sources. To characterize this effect, the values of radiation forcing (RF), for example, changes of outgoing longwave radiation (OLR) at the top of the atmosphere are often used.

An analysis of the physics of RF appearance is performed on the basis of an analysis of the integral form of the thermal radiation transfer equation. It has been shown that the CO₂ growth leads to increasing the outgoing radiation at the center of CO₂ absorption bands (15, 10 and 4.3 μm)

and reducing the radiation in their middle parts and wings. This is due to the location of radiation layers in the center and wings absorption bands in different atmospheric layers in the stratosphere and the troposphere, respectively, and different vertical temperature gradients in these layers.

Calculations of RFs for different latitudes and seasons are carried out and RF spatio-temporal variations due to CO₂ from pre-industrial period until the ends of 21 and 22 centuries (in the case of CO₂ growth with modern speed) are studied. New satellite method for determining the local RF on a global scale is proposed and investigated.

This work was supported by the Russian Foundation for Basic Research, grant 18-05-00426. Measurements of solar radiation were performed using the equipment of the SPbSU resource center "Geomodel".

Определение интенсивностей ночных эмиссий углеродсодержащих газов по данным локальных измерений на станции Петергоф

Фока С.Ч.¹ (st030659@student.spbu.ru), Макарова М.В.¹, Поберовский А.В.¹,
Парамонова Н.Н.², Тимофеев Ю.М.¹

¹Санкт-Петербургский государственный университет, Университетская наб., 7/9, 199034 Санкт-Петербург

²Главная геофизическая обсерватория им. А.И. Воейкова, ул. Карбышева 7, 194021 Санкт-Петербург, Россия

С использованием простой боксовой модели для ночных штилевых условий в приближении отсутствия обмена воздуха между пограничным слоем атмосферы и свободной тропосферой были рассчитаны значения интенсивности эмиссий CH₄, CO₂ и CO. Средние значения интенсивностей эмиссий CH₄, CO₂ и CO равны (44 ± 27), (10500 ± 7800) и (90 ± 100) т/(км²·год), соответственно, при этом в случае совместного накопления интенсивности эмиссий составляют (32 ± 45), (8500 ± 6300) и (28 ± 23) т/(км²·год).

Анализ совместных накоплений CH₄, CO₂ и CO позволил определить основной тип антропогенных источников вблизи станции, а именно: транспорт; сжигание природного газа бытовой техникой и на промышленных предприятиях; отопление жилых массивов (в том числе с использованием дровяных печей при низких температурах).

Исследования выполнены при финансировании Российского фонда фундаментальных исследований (грант №18-05-000111). Измерения проведены на оборудовании Ресурсного центра СПбГУ "Геомодель".

Investigation of nocturnal area fluxes of carbon cycle gases using in-situ measurements (Peterhof station)

S.Ch. Foka¹ (st030659@student.spbu.ru), M.V. Makarova¹, A.V. Poberovsky¹,
N.N. Paramonova², Yu.M. Timofeev¹

¹Saint-Petersburg State University, 7/9 Universitetskaya nab., 199034 Saint-Petersburg, Russia

²A.I. Voeikov Main Geophysical Observatory, 7 Karbyshev str., 194021 Saint-Petersburg, Russia

Using a simple box model for nocturnal no-wind conditions, CH₄, CO₂ and CO fluxes values were estimated in the consideration of the absence of air exchange between the atmospheric boundary layer and free troposphere. Average values of CH₄, CO₂ and CO fluxes estimated for Peterhof for 2014–2015 are (44 ± 27), (10500 ± 7800) and (90 ± 100) т/(км²·yr), respectively. At the same time mutual accumulation average values of CH₄, CO₂ and CO fluxes estimated for Peterhof for 2014–2015 are of (32 ± 45), (8500 ± 6300) and (28 ± 23) т/(км²·yr).

Thus analysis of the mutual accumulation of CH₄, CO₂ and CO allowed us to ascertain the main types of anthropogenic sources for the territory of Peterhof such as traffic, natural gas combustion in domestic appliances and industrial plants, residential heating located nearby the observational site (including wood burning during the cold season).

Investigation was supported by Russian Foundation for Basic Research (grant №18-05-000111). Authors thank Geomodel Research Center (SPbU) for providing the observational facilities.

Исследования серебристых облаков из стратосферы: эксперимент SONC

Далин П.А.^{1,2} (pdalin@irf.se), Перминов В.И.³, Перцев Н.Н.³, Ефремов Д.И.^{4,5}, Ромейко В.А.⁶

¹Шведский институт космической физики, Кируна, Швеция

²Институт космических исследований РАН, ул. Профсоюзная 84/32, 117997 Москва, Россия

³Институт физики атмосферы им. А.М.Обухова РАН, Пыжевский пер. 3, 119017 Москва, Россия

⁴Аэрокосмическая лаборатория «Стратонавтика», Москва, Россия

⁵Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Ленинские горы 1/51, 119991 Москва, Россия

⁶Московская ассоциация изучения серебристых облаков, ул. Косыгина 17, 119334 Москва, Россия

Серебристые облака (С.О. или NLC в англоязычной литературе) являются самыми высокими облаками в атмосфере Земли. Они образуются на высотах области мезопаузы 80–90 км в летнее время, когда температура мезопаузы понижается до своих экстремально низких значений 120–140 К ($-150^{\circ} \div -120^{\circ}$ С). С.О. состоят из ледяных (H_2O) кристалликов с радиусами $\sim 30\text{--}100$ нм, которые эффективно рассеивают солнечный свет и благодаря этому при достаточном количестве частиц хорошо видны на фоне сумеречного сегмента неба. Традиционно С.О. исследуются как с поверхности Земли, так и из космоса. К регулярным методам относятся фотографические и лидарные измерения с земной поверхности, а также спутниковые измерения (AIM и Odin). Вместе с тем, и наземные и космические измерения С.О. обладают как достоинствами, так и определенными недостатками. Так, наземные измерения дают высокое пространственное (~ 100 м) и временное разрешение (секунды), но при этом имеют малое географическое покрытие, и им необходимы хорошие погодные условия и темное время суток (для фоторегистрации). Космические наблюдения, напротив, предоставляют круглосуточное глобальное географическое покрытие полей С.О. независимо от погодных условий, но при этом обладают низким пространственным (~ 5 км) и временным разрешением (~ 1.5 ч между соседними орбитами). Восполнить данные недостатки могут регулярные наблюдения С.О. из стратосферы с помощью баллонных измерений с высот 20–40 км, которые находятся на самом начальном этапе своего становления. Всего до настоящего времени было выполнено только три наблюдения С.О. из стратосферы, одним из которых является эксперимент SONC (Stratospheric Observations of Noctilucent Clouds), проведенный нашим коллективом в ночь с 5 на 6 июля 2018 г. во Владимирской области ($\sim 56^{\circ}$ с.ш., 41° в.д.) [1].

В эту ночь впервые в мире осуществлен успешный запуск шара-зонда с целью аэрофотосъемки и изучения С.О. на больших масштабах порядка 100–1500 км. Данный шар-зонд в течение 1.7 ч осуществил подъем на свою максимальную высоту 20.4 км, во время которого автоматическая фотокамера выполнила несколько сотен фотографий серебристых облаков. По сравнению с наземной фотосъемкой С.О. стратосферная имеет следующие несомненные преимущества: возможность круглосуточного наблюдения С.О. из-за низкого уровня рэлеевского атмосферного рассеяния света и отсутствия тропосферных помех (облачность, туман, аэрозольное поглощение), обнаружение очень слабых по яркости структур С.О. на самом раннем или самом позднем этапе их эволюции, регистрация их волновой вертикальной структуры на атмосферном лимбе. Кроме этого, комбинация высокого пространственного разрешения (10 м) с регистрацией крупномасштабных полей С.О. на расстояниях порядка 1500 км делает такие стратосферные измерения уникальными и недостижимыми для современных наземных и спутниковых методов регистрации С.О. В настоящее время продолжается анализ изображений С.О., полученных из стратосферы в ходе эксперимента SONC.

1. Dalin P., Pertsev N., Perminov V. et al. Looking at "night-shining" clouds from the stratosphere // Eos. 2019. No. 100, <https://doi.org/10.1029/2019EO118439>.

Studies of noctilucent clouds from the stratosphere: the SONC experiment

P.A. Dalin^{1,2} (pdalin@irf.se), V.I. Perminov³, N.N. Pertsev³, D.I. Efremov^{4,5}, V.A. Romejko⁶

¹Swedish Institute of Space Physics, Box 812, SE-981 28, Kiruna, Sweden

²Space Research Institute RAS, 84/32 Profsovnaya st., 117997 Moscow, Russia

³A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics RAS, 3 Pyzhevskiy per., 119017 Moscow, Russia

⁴Aerospace laboratory "Stratonautica", Moscow, Russia

⁵Faculty of Cosmic Research, M. V. Lomonosov Moscow State University, GSP-1, Leninskie Gory, 119991 Moscow, Russia

⁶The Moscow Association for NLC Research, 17 Kosygina st., 119334 Moscow, Russia

Noctilucent clouds (NLC) are the highest clouds in the Earth's atmosphere, forming at altitudes of the mesopause (80–90 km) in summertime, when the mesopause temperature is very cold, as low as 120–140 K ($-150^{\circ} \div -120^{\circ}$) C. These clouds are composed of water-ice crystals with radii of ~ 30 –100 nm, which effectively scatter sunlight and thus are clearly visible against the twilight arc of the sky when number of ice particles is high enough. Traditionally, NLC are explored from both the ground and space. Regular methods include photographic and lidar measurements conducted from the Earth's surface as well as satellite measurements (AIM and Odin). At the same time, both NLC ground and space measurements possess certain advantages and disadvantages. Thus, ground-based measurements provide high spatial (~ 100 m) and temporal resolution (seconds), but are limited to good weather conditions in the troposphere and to nighttime (for photo registration) as well as they provide relatively small geographic coverage. Observations made from space, on the contrary, provide an NLC global geographic coverage for 24 h regardless of weather conditions but they have low spatial (~ 5 km) and low temporal resolution (~ 1.5 h between adjacent orbits). Regular NLC observations from the stratosphere, using balloon-borne measurements from altitudes of 20–40 km, can compensate for these disadvantages; however, such stratospheric NLC observations are at the very initial stage of their formation. So far, only three NLC observations from the stratosphere have been conducted, one of which is the SONC experiment (Stratospheric Observations of Noctilucent Clouds), performed by our team on the night of 5–6 July 2018 in the Vladimir region ($\sim 56^{\circ}$ N, 41° E), Russia [1].

On this night, for the first time, a sounding balloon was successfully launched with the aim to aerially photograph and study NLC at large scales of 100–1500 km. The balloon reached its maximum altitude of 20.4 km, and the automatic NLC camera has taken several hundred of NLC images during its entire flight of 1.7 h. Compared to ground-based NLC registrations, stratospheric imaging has the following undoubted advantages: the possibility to observe NLC for 24 h due to low Rayleigh atmospheric scattering and absence of tropospheric interferences (cloudiness, fog, strong aerosol loading), the ability to detect very weak brightness of NLC structures at the earliest and/or latest stages of their evolution, the observation of their vertical wave structure on the atmospheric limb. Besides, the combination of high spatial resolution (10 m) and large spatial coverage over 1500 km makes such stratospheric measurements unique and unachievable for modern NLC ground-based and satellite methods. Currently, the analysis of NLC images obtained from the stratosphere during the SONC experiment is continuing.

1. Dalin P., Pertsev N., Perminov V. et al. Looking at "night-shining" clouds from the stratosphere // Eos. 2019. No. 100, <https://doi.org/10.1029/2019EO118439>.

Исследование нестационарных приповерхностных полей ветра по пространственно-временным изображениям морской поверхности

Титов В.И.¹ (titov@hydro.appl.sci-nnov.ru), Баханов В.В.¹, Репина И.А.²

¹Институт прикладной физики, ул. Ульянова 46, 603950 Н. Новгород, Россия

²Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Пыжевский пер. 3, 119017 Москва, Россия

В работе исследуются нестационарные приповерхностные поля ветра по их проявлениям на морской поверхности. Изменения скорости ветра приводят к изменениям интенсивности ряби и, соответственно, к изменению дисперсии уклонов волн. В работе показана возможность диагностики аномалий дисперсии уклонов поверхностных волн по вариациям яркости морской поверхности при наклонном визировании и освещении поверхности моря рассеянным светом неба (вне солнечных бликов). Анализируются контрасты аномалий при разных углах визирования (скольжения) с учетом затенения волн и подповерхностного обратно рассеянного излучения. Выявлено явление обращения контрастов аномалий при увеличении угла визирования. Разработан способ определения скорости приповерхностного ветра по вариациям яркости морской поверхности.

Исследования кататических ветровых потоков проводилось по пространственно-временным изображениям, полученным с океанографической платформы в п. Кацевели, Республика Крым. Пространственно-временные, или ДВИ (дальность–время–интенсивность), изображения морской поверхности регистрировались с помощью оптического комплекса, состоящего из нескольких приборов с зарядовой связью (ПЗС-линеек) с разными направлениями визирования. При наклонных углах визирования с океанографической платформы формировались ДВИ-изображения морской поверхности шириной несколько километров. По ДВИ-изображениям можно регистрировать длинные поверхностные волны (энергонесущие ветровые волны, волны зыби), определять их спектрально-кинематические характеристики, выявлять волны с аномально большой амплитудой, наблюдать проявления внутренних волн (ВВ) на морской поверхности и исследовать приповерхностные поля ветра по их проявлениям на морской поверхности. Проявления кататических ветров на морской поверхности идентифицировались по их характерной структуре. Синхронно с регистрацией ДВИ-изображений проводилась регистрация скорости и направления ветра на различных горизонтах.

В работе представлены результаты экспериментального исследования нестационарных ветровых потоков с гор, так называемых кататических ветров. Оптическим методом определяется скорость ветровых потоков, скорость ветра в потоках и пространственная структура поля ветра. Приводится сравнение с данными датчиков скорости и направления ветра.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 19-05-00547\19 а.

Investigation of near surface wind by optical RTI images of roughed water surface

V.I. Titov¹ (titov@hydro.appl.sci-nnov.ru), V.V. Bakhanov¹, I.A. Repina²

¹Institute of Applied Physics RAS, 46 Ulyanova str., 603950 Nizhny Novgorod, Russia

²A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics RAS, 3 Pyzhevsky pr., 119017 Moscow, Russia

Study of new remote sensing technique for investigation of near surface wind fields is an important oceanographic problem. This paper is focused on a new method of recording wind fields by analysis of optical images of sea surface and range–time–intensity images (RTI images) of sea surface. The RTI image constructed from optical profiles of sea surface is an optical analog of a side-looking radar image of sea surface but having higher spatial resolution and some possibility for remote sensing of sea roughness. It is possible to form RTI images with range from some tens meters to tens kilometers depending on spatial resolution needed. A set of original optical devices for recoding RTI images using linear arrays of CCD-photodiodes was created.

An analytical model of sea surface radiance for visible light is developed taking into account the polarization of light and shadowing of surface waves for grazing view geometry. The principle of remote sensing of near surface winds by its manifestations on waved surface under grazing angles based on comparison of measured and modeled surface radiance is discussed.

The investigations of near surface wind fields features in internal reservoirs and various regions of seas during last year were conducted by optical complex. The structure of near surface wind fields, eddies, wind fronts, catabatic wind flows for ranges from hundreds meters to some tens kilometers were recorded and analyzed. Derived data of optical monitoring of water surface may serve for future investigations of near surface wind features.

The work was supported by RFBR project № 19-05-00547\19 a.

Анализ изменений абсорбционных свойств дымового аэрозоля при дальнем переносе по данным сети AERONET

Головушкин Н.А.¹ (golovushkin@ipfran.ru), Коновалов И.Б.¹, Кузнецова И.Н.²,
Архангельская А.А.²

¹Институт прикладной физики РАН, ул. Ульянова 46, 603950 Нижний Новгород, Россия

²Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации, Б. Предтеченский пер. 11-13, 123242 Москва, Россия

Поглощающая органическая компонента дымового аэрозоля – коричневый углерод – вносит значительный вклад в радиационный форсинг, но недостаток знания атмосферной эволюции коричневого углерода является одним из существенных факторов, обуславливающих большие неопределенности модельных расчетов соответствующих радиационных эффектов. С целью восполнения недостатка этого знания для особого случая дымового аэрозоля, образуемого в результате мощных лесных пожаров в Сибири, в настоящей работе выполнен анализ данных дистанционного зондирования атмосферного аэрозоля на российских станциях сети AERONET. Анализ выполнен для летнего периода 2016 года, во время которого наблюдался дальний перенос дымовых шлейфов от сибирских пожаров, приведший к появлению оптически плотного задымления над Европейской территорией России (ЕТР).

Рассматривались данные измерений аэрозольной оптической толщи (АОТ), абсорбционной АОТ и альбеда однократного рассеяния на нескольких длинах волн. Для оценки вклада дымового аэрозоля от сибирских пожаров в оптические свойства аэрозоля, измеренные на станциях ЕТР, использовались расчеты, выполненные на основе химико-транспортной модели CHIMERE. В результате установлено, в частности, что дальний перенос дымового аэрозоля привел к сильному уменьшению абсорбционного показателя Ангстрема, притом, что значительных изменений показателя Ангстрема, рассчитанного для полной АОТ, не выявлено. Полученные результаты свидетельствуют о разрушении, хотя и не полном, коричневого углерода в составе дымового аэрозоля вследствие многочасового воздействия атмосферных фотохимических процессов и могут быть использованы для выработки эффективных модельных параметризаций атмосферной эволюции коричневого углерода.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №19-77-20109).

Analysis of changes in the absorption properties of biomass burning aerosol during its long-range transport using AERONET data

N.A. Golovushkin¹ (golovushkin@ipfran.ru), I.B. Konovalov¹, I.N. Kuznetsova²,
A.A. Arkhangel'skaya²

¹*Institute of Applied Physics RAS, 46 Ulyanovskaya str., 603950 Nizhny Novgorod, Russia*

²*Hydrometeorological Research Center of Russia, 11-13 B. Predtechensky per., 123242 Moscow, Russia*

The absorbing organic component of biomass burning (BB) aerosol – so-called brown carbon (BrC) – makes a significant contribution to the radiative forcing in the atmosphere, but the lack of knowledge about the BrC atmospheric evolution is one of the significant factors contributing to the large uncertainties of model simulations of the corresponding radiative effects. To improve this knowledge for the special case of BB aerosol originating from intense forest fires in Siberia, this study analyzes the aerosol remote sensing data from Russian stations of the AERONET network. The analysis was performed for the summer period of 2016, during which there was a remarkable episode of optically dense haze over the European territory of Russia (ETR) due to a long-range transport of BB smoke plumes from Siberian fires.

Retrievals of the extinction and absorption aerosol optical thicknesses (AOTs) and single-scattering albedo at several wavelengths were considered. The contribution of BB aerosol from Siberian fires to the aerosol optical properties measured at the AERONET stations at ETP was estimated by using simulations performed with the CHIMERE chemistry transport model. As a result, it was found, in particular, that the long-range transport of BB aerosol led to a strong decrease in the absorption Angstrom exponent, while no significant changes in the extinction Angstrom exponent were detected. The findings indicate that multi-hour atmospheric exposure of BB aerosol is associated with a partial BrC destruction presumably due to atmospheric photochemical processes. The results of the study can be used to develop effective model parameterizations of the atmospheric evolution of BrC originating from Siberian fires.

The study was funded by the Russian Science Foundation (project No. 19-77-20109).

Измерения и моделирование интегрального содержания азотистых соединений в нижней тропосфере в Московской области

Боровский А.Н.¹ (alexander.n.borovski@gmail.com), Березина Е.В.¹, Васильева А.В.¹,
Еланский Н.Ф.¹, Никитин С.В.², Пономарёв Н.А.¹, Постыляков О.В.¹

¹*Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Пыжевский пер. 3, 119017 Москва, Россия*

²*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Ленинские горы, д. 1 стр. 2, 119991 Москва, Россия*

Московский мегаполис входит в число 20-и крупнейших мегаполисов мира. Интенсивные выбросы загрязняющих веществ в атмосферу влияют не только на состояние атмосферы над мегаполисом, но и далеко за его пределами. Для получения диагностических и прогностических оценок этого воздействия разрабатываются методы измерения загрязнителей воздуха, а также проводится моделирование переноса химических веществ. Важной задачей в этом контексте является согласование параметров, используемых в химико-транспортных моделях (ХТМ), с их экспериментальными значениями. Для верификации параметров ХТМ существенные данные дают измерения содержания азотных соединений. Оксиды азота ($\text{NO}_x = \text{NO} + \text{NO}_2$) являются важным компонентом в химии озона. В частности, в нижних слоях атмосферы высокая концентрация NO_x создает хорошие условия для его образования. Азотные соединения связаны также с содержанием гидроксильных радикалов, которые из-за высокой реакционной способности не измеряются прямыми методами [1].

В работе представлены предварительные результаты измерений и моделирования интегрального содержания (ИС) NO_2 в пограничном слое атмосферы (ПСА) на Звенигородской научной станции (ЗНС), расположенной в 38 км к западу от Москвы. Так как

в этом регионе преобладают ветры западных направлений, большую часть времени ЗНС находится в фоновых условиях. Но при восточном ветре подверженные влиянию Московского мегаполиса загрязненные воздушные массы могут достичь ЗНС за 2–4 часа. На основе разработанных ранее алгоритмов определения ИС формальдегида в ПСА [2], разработан алгоритм определения ИС NO_2 в ПСА по данным измерений спектров рассеянного солнечного излучения на Звенигородской научной станции (ЗНС) Института физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН (ИФА). Для моделирования изменчивости ИС NO_2 на ЗНС использовалась химико-транспортная модель SILAM [3]. Анализируемый период охватывает январь и июль 2014 года, когда на ЗНС наблюдались фоновые и загрязненные воздушные массы. Измеренные на ЗНС значения ИС NO_2 в ПСА не превышают 0.5×10^{16} молек $\times$ см $^{-2}$ в фоновых условиях. ИС NO_2 вырастает до 5.4×10^{16} молек $\times$ см $^{-2}$ при переносе загрязненных воздушных масс со стороны Московского мегаполиса. Моделируемое ИС NO_2 имеет аналогичное поведение. В целом, наблюдается хорошее согласие между измеренным и моделированным набором данных. Некоторая недооценка выбросов NO_2 присутствует для источников, расположенных к западу и юго-западу от ЗНС, и переоценка для источников, расположенных к северу и северо-западу от ЗНС.

Исследование выполнено при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 18-35-00682 в части разработки алгоритма определения ИС NO_2 в ПСА и грант № 18-35-20031 в части анализа изменчивости ИС NO_2 в ПСА) и Российского научного фонда (грант № 16-17-10275 в части моделирования ИС NO_2 в ПСА).

1. Young C.J., Washenfelder R.A., Roberts J.M. et al. Vertically resolved measurements of nighttime radical reservoirs in Los Angeles and their contribution to the urban radical budget // *Environ. Sci. Technol.* 2012. V. 46. P. 10965–10973.
2. Postlyakov O.V., A.N. Borovski, V.A. Ivanov et al. Formaldehyde integral content in troposphere of Moscow Region: preliminary results of 6 years of measurements using DOAS technique // *Proc. SPIE.* 2016. V. 10035. P. 100353A; doi: 10.1117/12.2248630.
3. Elansky, N.F., N.A. Ponomarev, Y.M. Verevkin. Air quality and pollutant emissions in the Moscow megacity in 2005–2014 // *Atm. Env.* 2018. V. 175. P. 54–64.

Measurement and simulation of integral content of nitrogen compounds in the lower troposphere in Moscow region

A.N. Borovski¹ (alexander.n.borovski@gmail.com), E.V. Berezina¹, A.V. Vasileva¹, N.F. Elansky¹, S.V. Nikitin², N.A. Ponomarev¹, O.V. Postlyakov¹

¹A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics RAS, 3 Pyzhevsky per., 119017 Moscow, Russia

²M.V. Lomonosov Moscow State University, Leninskie Gory, 119991 Moscow, Russia

Moscow is one of the 20 largest megacities in the world. Intensive emissions of pollutants into the atmosphere affect not only the state of the atmosphere above the metropolis, but also far beyond. Methods for measuring air pollutants are being developed and chemical transport simulations are being carried out to obtain diagnostic and prognostic assessments of these effects. An important task in this context is to harmonize the parameters used in chemical transport models (CTM) with their experimental values. To verify the parameters of CTM, significant data is provided from measurements of the content of nitrogen compounds. Nitrogen oxides ($\text{NO}_x = \text{NO} + \text{NO}_2$) are an important component in ozone chemistry. In particular, in the lower atmosphere a high concentration of NO_x forms a good conditions for ozone generation. Nitrogen compounds are also associated with the content of hydroxyl radicals, which due to their high reactivity are not measured by direct methods [1].

The paper presents the preliminary results of measurements and modeling of the NO_2 integral content (IC) in the atmospheric boundary layer (ABL) at Zvenigorod scientific station (ZSS), located 38 km west from Moscow. Since this region is dominated by West winds, most of the time ZSS is in the background atmospheric condition. But polluted air masses affected by the Moscow metropolis can reach ZSS in 2–4 hours during East wind. Based on previously developed algorithms for determining the formaldehyde IC in the ABL [2], an algorithm is developed to

determine NO₂ IC in the ABL basing on the measurements of spectra of scattered solar radiation at the ZSS of A.M. Obukhov Institute of atmospheric physics RAS. For modeling of the NO₂ IC variability a chemical transport model SALAM was used [3]. The period for analysis covers January and July 2014, when background and polluted air masses were observed at the ZSS. Measured on the ZSS the NO₂ IC in the ABL does not exceed $0.5 \times 10^{16} \text{ mol} \times \text{cm}^{-2}$ under background conditions. The NO₂ IC grows up to $5.4 \times 10^{16} \text{ mol} \times \text{cm}^{-2}$ when polluted air masses from the Moscow metropolis reach ZSS. The simulated NO₂ IC has a similar behavior. In general, there is good agreement between the measured and simulated data sets. Some underestimation of NO₂ emissions for sources located to west and south-west from ZSS and overestimation for sources located to north and north-west from ZSS are present.

The study was supported by the Russian Foundation for Basic Research (grant No. 18-35-00682 in part of the development of the algorithm for determining NO₂ IC in the ABL and grant No. 18-35-20031 in part of the analysis of variability of NO₂ IC in the ABL) and the Russian Science Foundation (grant No. 16-17-10275 in part of modeling NO₂ IC in the ABL).

1. Young C.J., Washenfelder R.A., Roberts J.M. et al. Vertically resolved measurements of nighttime radical reservoirs in Los Angeles and their contribution to the urban radical budget // *Environ. Sci. Technol.* 2012. V. 46. P. 10965–10973.
2. Postlyakov O.V., A.N. Borovski, V.A. Ivanov et al. Formaldehyde integral content in troposphere of Moscow Region: preliminary results of 6 years of measurements using DOAS technique // *Proc. SPIE.* 2016. V. 10035. P. 100353A; doi: 10.1117/12.2248630.
3. Elansky, N.F., N.A. Ponomarev, Y.M. Verevkin. Air quality and pollutant emissions in the Moscow megacity in 2005–2014 // *Atm. Env.* 2018. V. 175. P. 54–64.

Измерение интегрального влагосодержания атмосферы и облаков с помощью СВЧ-радиометра, установленного на борту самолёта-лаборатории Як-42

Дроздов Д.В. (drozdov@solarixx.com), Рыбаков Ю.В., Герасимов О.А.

Главная геофизическая обсерватория им. А.И. Воейкова, уд. Карбышева 7, 194021 Санкт-Петербург, Россия

Возможность точного определения интегрального влагозапаса атмосферы (в миллиметрах осаждённой воды) по данным радиозондовых измерений – то есть по стандартной методике интегрирования профиля абсолютной влажности для каждой точки запуска – ограничена рядом факторов. Таких как непредсказуемая удалённость конечной точки полёта радиозонда, низкая точность измерений при отрицательных температурах, периодичность запуска (два раза в сутки). В то же время измерения при помощи наземных СВЧ-радиометров, обладая рядом преимуществ, не обеспечивают достаточной точности профиля влажности по высоте и достаточной чувствительности к значениям влажности на больших высотах. А дистанционное наблюдение за влажностью атмосферы со спутников на сегодня даёт практический результат только при измерениях над однородной водной поверхностью (над океаном).

Двухдиапазонный СВЧ-радиометр, установленный в 2013 году на самолёте-лаборатории Як-42, имеет линию визирования 30° вверх от горизонта. Это позволяет определить высотный профиль интегральной влажности при ступенчатом изменении высоты аналогично радиозонду, а также, при эшелоне порядка 10 км, получить информацию о количестве влаги на больших высотах. При последовательном увеличении высоты полёта можно проследить за изменением радиоярких температур, связанных как со свободной атмосферой, так и с наличием облаков, чего радиозонд не может сделать принципиально. Полученные в ходе экспериментальных полётов данные измерений радиоярких температур сравнивались с теоретическими значениями интегрального влагозапаса по рассчитанным значениям оптической толщины. При измерениях использовалась методика определения оптической толщины радиоастрономическим методом угломестного сканирования за счёт крена самолёта. Этот способ позволяет также учесть фоновое

излучение радиопрозрачного иллюминатора, чтобы в дальнейшем непосредственно использовать значения радиоярких температур, получаемых экспериментально на борту.

Работа была выполнена по теме НИОКР Росгидромета.

Measurements of integral atmospheric moisture and cloud liquid water content using a microwave radiometer installed onboard the Yak-42 laboratory aircraft

D.V. Drozdov (drozdov@solarixx.com), Y.V. Rybakov, O.A. Gerasimov
A.I. Voeikov Main Geophysical Observatory, 7 Karbyshev str., 194021 Saint-Petersburg, Russia

The ability to determine the water vapor total column of the atmosphere (in millimeters of condensed water) basing on radiosonde measurements and the traditional method of integrating the absolute humidity profile for each launch point is limited by some factors – the unpredictable remoteness of the end point of the radiosonde flight, low accuracy of measurements at negative temperatures, the frequency of launching (twice a day). Measurements using ground-based microwave radiometers, having some advantages, do not provide, however, sufficient accuracy of the vertical humidity distribution and sufficient sensitivity to humidity values at high altitudes. Remote monitoring of the humidity of the atmosphere from satellites gives today a practical result only when measuring over a uniform water surface (over oceans).

The dual-frequency microwave radiometer, installed in 2013 on the Yak-42 aircraft laboratory, has a line of sight 30° up from the horizon. This makes it possible to determine the altitude profile of the integral humidity with a stepwise change in altitude, similarly to a radiosonde, and also, at flight level 330, to obtain information about the amount of moisture at high altitudes. With a consistent increase in flight altitude, it is possible to trace the change in the radio brightness temperatures associated with both the free atmosphere and the presence of clouds, which the radiosonde cannot do in principle. The results of measurements of the brightness temperatures obtained during experimental flights were compared with the theoretical values of the total column water vapor using the calculated values of the optical thickness. In the measurements, the radio astronomy method of elevation scanning due to the roll of the aircraft was used to determine the optical thickness. This method allows also taking into account the background radiation of the radio transparent window in order to directly use the values of the brightness temperatures, obtained experimentally on board.

The work was performed within the R&D program of Roshydromet.

О возможности обнаружения горизонтальной неоднородности водозапаса облаков по наземным микроволновым измерениям в режиме углового сканирования

Бирюков Е.Ю. (st023805@spbu.ru), Косцов В.С.
*Санкт-Петербургский государственный университет, физ. фак., Университетская наб. 7/9, 199034
Санкт-Петербург, Россия*

Спутниковые измерения водозапаса приборами SEVIRI и AVHRR свидетельствуют о существовании различий в средних значениях водозапаса над сушей и водной поверхностью морей и больших озер в Северной Европе. На физическом факультете Санкт-Петербургского государственного университета функционирует микроволновый радиометр RPG-HATPRO, предназначенный для определения профилей температуры и влажности тропосферы, а также водозапаса облаков. Радиометр работает в режиме наблюдений в зенит, а также в режиме углового сканирования в направлении на северо-восток. Радиометр расположен на расстоянии 2.5 км от южного побережья Финского залива, и при угловом сканировании поле зрения охватывает пространство над водной поверхностью.

Сформулирована задача обнаружения различий в средних значениях водозапаса над сушей и водной поверхностью в районе расположения радиометра для разных климатических сезонов. В рамках решения данной задачи, был проведен численный эксперимент. Для определения водозапаса облаков были использованы два регрессионных алгоритма: множественная линейная регрессия (МЛР) и множественная квадратическая регрессия (МКР). Использовалась статистическая модель атмосферы, состоящая из 38157 наборов профилей метеопараметров для летнего сезона и 40652 набора для зимнего сезона. Логнормальные распределения водозапаса облаков генерировались со средними значениями, полученными из спутниковых данных: 0.030 кг/м^2 и 0.009 кг/м^2 летом, 0.028 кг/м^2 и 0.004 кг/м^2 зимой для суши и для водной поверхности соответственно. Наземные микроволновые измерения были смоделированы для двух спектральных каналов микроволнового радиометра 22.24 и 31.4 ГГц. В результате численного эксперимента были получены следующие средние значения водозапаса облаков: 0.025 кг/м^2 (суша, лето) и 0.029 кг/м^2 (суша, зима), 0.009 кг/м^2 (водная поверхность, лето), 0.004 кг/м^2 (водная поверхность, зима). Полученные различия в значениях водозапаса свидетельствуют о применимости регрессионных алгоритмов для обнаружения горизонтальной неоднородности водозапаса для различных климатических сезонов по микроволновым измерениям в режиме углового сканирования.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант 19-05-00372). Функционирование измерительной аппаратуры обеспечивалось ресурсным центром «Геомодель» Санкт-Петербургского государственного университета.

On a possibility to detect horizontal inhomogeneity of cloud liquid water path by ground-based microwave measurements performed in angular scanning mode

E.Yu. Biryukov (st023805@spbu.ru), V.S. Kostsov

Saint-Petersburg State University, Physics Faculty, 7/9 Universitetskaya nab., 199034 Saint-Petersburg, Russia

Cloud liquid water path (LWP) measurements by satellite instruments SEVIRI and AVHRR indicate the existence of differences in LWP mean values over land and water surfaces of seas and big lakes of Northern Europe. Microwave (MW) radiometer RPG-HATPRO designed for retrieval of temperature and humidity profiles together with LWP is functioning at the Faculty of Physics, Saint-Petersburg State University. The radiometer operates in zenith observation mode and also in angular scanning mode in the North-East direction. It is located at 2.5 km distance from the south coast of the Gulf of Finland, and in angular scanning mode the field of view intersects the space above water surface.

The problem of detecting the difference between LWP mean values over land and water surface in the vicinity of the radiometer for different seasons has been formulated., and a numerical experiment has been conducted. Two regression algorithms were used for LWP retrieval: multiple linear regression (MLR) and multiple quadratic regression (MQR). The statistical model of the atmosphere was used which consisted of 38157 sets of profiles of meteorological parameters for summer and 40652 sets for winter. Lognormal LWP distributions were generated with mean values provided by satellite measurements: 0.030 кг/м^2 and 0.009 кг/м^2 for summer, 0.028 кг/м^2 and 0.004 кг/м^2 for winter over land and water surfaces respectively. Ground-based MW measurements were modeled for two spectral channels of MW radiometer: 22.24 and 31.4 GHz. The following LWP mean values were retrieved in the numerical experiment: 0.025 кг/м^2 (land surface, summer), 0.029 кг/м^2 (land surface, winter), 0.009 кг/м^2 (water surface, summer), 0.004 кг/м^2 (water surface, winter). The retrieved differences in LWP values demonstrate that the regression algorithms can be successfully used for the purpose of detecting horizontal LWP inhomogeneity for different seasons from MW measurements performed in angular scanning mode.

The research was supported by Russian Foundation for Basic Research through the project No. 19-05-00372. The operation of the RPG-HATPRO instrument was provided by the Research Centre GEOMODEL of St. Petersburg State University.

Изучение химически активных газов в атмосфере методом ИК фурье-спектрометрии высокого спектрального разрешения

Макарова М.В. (m.makarova@spbu.ru), Поберовский А.В., Имхасин Х.Х.,
Тимофеев Ю.М., Фока С.Ч.

*Санкт-Петербургский государственный университет, физ. фак., Университетская наб. 7/9, 199034
Санкт-Петербург, Россия*

Представлены результаты десятилетних (2009–2018 гг.) измерений химически активных газов CO, C₂H₆, HCN, C₂H₂, H₂CO, CH₃OH и HCOOH во всей толще атмосферы, проводимых на станции St. Petersburg (СПбГУ, сеть IRWG-NDACC) методом наземной ИК фурье-спектрометрии высокого спектрального разрешения (аппаратура Bruker IFS 125 HR). Комплексный анализ одновременных измерений CO, C₂H₆, HCN, C₂H₂, H₂CO, CH₃OH и HCOOH является уникальным для России: СПбГУ в настоящее время является единственной организацией на территории России, осуществляющей на долговременной основе фурье-спектрометрические измерения общего содержания и профилей более чем двадцати газовых компонентов атмосферы.

В работе уделено особое внимание разработке и усовершенствованию методик определения общего содержания CO, C₂H₆, HCN, C₂H₂, CH₃OH, HCOOH и H₂CO, оптимизированных с учетом географического положения станции St. Petersburg, особенностей климата и специфики измерительной аппаратуры. Начиная с 2018 г. данные по общему содержанию H₂CO, получаемые на станции St. Petersburg, успешно участвуют в валидационной кампании спутникового эксперимента TROPOMI/SENTINEL5. На станции St. Petersburg проводятся регулярные подспутниковые измерения с последующей оперативной обработкой спектров высокого спектрального разрешения с целью определения общего содержания H₂CO.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 18-05-00011 “Изучение химически активных газов в атмосфере методами Фурье-спектрометрии”. Работа выполнена на научном оборудовании ресурсного центра СПбГУ «Геомодель».

Study of reactive gases in the atmosphere using high resolution FTIR spectrometry

M.V. Makarova (m.makarova@spbu.ru), A.V. Poberovsky, H.H. Imkhasin,
Yu.M. Timofeev, S.Ch. Foka

Saint-Petersburg State University, Physics Faculty, 7/9 Universitetskaya nab., 199034 Saint-Petersburg, Russia

The results of the ten-year (2009–2018) measurements of reactive gases such as CO, C₂H₆, HCN, C₂H₂, H₂CO, CH₃OH and HCOOH in the atmosphere, carried out at the St. Petersburg site (St. Petersburg State University, IRWG-NDACC network) using ground-based FTIR spectrometry with high spectral resolution (Bruker IFS 125 HR). Comprehensive analysis of simultaneous measurements of CO, C₂H₆, HCN, C₂H₂, H₂CO, CH₃OH and HCOOH is unique to Russia: St. Petersburg State University is currently the only organization in Russia that performs long-term basis FTIR measurements of the total column and profiles of more than twenty trace gases of the atmosphere.

We paid attention to the development and improvement of the methods for retrieving the total columns of CO, C₂H₆, HCN, C₂H₂, CH₃OH, HCOOH and H₂CO, optimized taking into account the geographical location of the St. Petersburg site, climate and specifics of instrumentation. Starting from 2018, the data on the H₂CO total column obtained at the St. Petersburg site have been successfully used in the validation campaign of the satellite experiment TROPOMI/SENTINEL5. St. Petersburg site conducts regular sub-satellite measurements with subsequent operational processing of IR high spectral resolution spectra in order to retrieve the H₂CO total column.

Research was supported by the RFBR grant 18-05-00011 “Study of reactive gases in the atmosphere using Fourier transform spectrometry”. Experimental data were acquired using the scientific equipment belonging the “Geomodel” resource center of SPbU.

СЕКЦИЯ 3. "ТЕОРИЯ ПЕРЕНОСА ИЗЛУЧЕНИЯ"

Председатель: д.т.н. В.П. Будак (МЭИ, Москва, Россия)

Сопредседатели: к.ф.-м.н. Л.П. Басс (ИПМ РАН, Москва, Россия), к.ф.-м.н. Е.П. Зере (Институт Физики НАНБ, Беларусь)

SESSION 3. "RADIATION TRANSFER THEORY"

Chairman: Dr. L.P. Bass (IAM RAS, Moscow, Russia)

Co-chairmen: Prof. V.P. Budak (MPEI, Moscow, Russia), Dr. E.P. Zege (Institute of Physics, NASB, Belarus)

Влияние рассеяния излучения на аэрозолях на перенос излучения в инфракрасных полосах CO₂ и CO в дневной атмосфере Марса в условиях нарушения колебательного ЛТР

Огибалов В.П. (v.ogibalov@spbu.ru), Швед Г.М.

*Санкт-Петербургский государственный университет, физ. фак., Университетская наб., 7/9, 199034
Санкт-Петербург, Россия*

Поскольку атмосфера Марса является достаточно разреженной уже у поверхности, нарушение колебательного локального термодинамического равновесия (ЛТР) для молекул CO₂ и CO в дневное время начинается с тропосферы. В силу запыленности нижней атмосферы Марса рассеяние инфракрасного солнечного излучения аэрозолями должно влиять на населенности колебательных состояний этих молекул.

В докладе впервые представлены результаты моделирования переноса излучения с учетом нарушения ЛТР в полосах CO₂ и CO в диапазоне длин волн 1–5 мкм с учетом рассеяния излучения на аэрозолях. Исследовались зависимости указанных населенностей от оптических толщин аэрозольного слоя и полос, вертикального распределения аэрозолей, зенитного угла Солнца и параметров аэрозоля, описывающих рассеяние и поглощение излучения. Чем слабее полоса, тем сильнее влияние аэрозоля на населенность. Этот эффект проявляется в увеличении и уменьшении населенности выше и ниже определенного высотного уровня соответственно.

Effect of aerosol scattering on radiative transfer in the CO₂ and CO infrared bands in the daytime Martian atmosphere under breakdown of vibrational LTE

V.P. Ogibalov (v.ogibalov@spbu.ru), G.M. Shved

Saint-Petersburg State University, 7/9 Universitetskaya nab., 199034 Saint-Petersburg, Russia

Since the Martian atmosphere is sufficiently rarified already at the surface, the breakdown of vibrational local thermodynamic equilibrium (LTE) for the CO₂ and CO molecules starts in the daytime from the troposphere. As the Mars lower atmosphere is dusty, the scattering of infrared solar radiation by aerosols should affect the vibrational state populations of these molecules.

The report presents for the first time the results of modeling the radiative transfer under non-LTE conditions in the CO₂ and CO bands in the wavelength range of 1–5 μm, taking into account the radiation scattering by aerosols. The populations were studied depending on the optical thickness of both the aerosol layer and the bands, the vertical distribution of aerosols, the solar zenith angle, and the aerosol parameters describing the scattering and absorption of radiation. The band is weaker, the aerosol effect on a population is stronger. This effect manifests as an increase and a decrease in population above and below a certain altitude level, respectively.

VoTe – Новый теоретический лайнлист H_2^{16}O до 25000 cm^{-1}

Воронин Б.А.¹ (vba@iao.ru), Теннисон Дж.²

¹Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, пл. Ак. Зуева 1, 634055 Томск, Россия

²Университетский Колледж Лондона, Лондон, UK

В докладе представлен новый расчетный лайн лист и уровни энергии H_2^{16}O – это расчет VoTe (Voronin, Tennyson). Расчеты проводились на кластере “atun” в Университетском Колледже Лондона и на сервере лаборатории Молекулярной спектроскопии ИОА СО РАН. Диапазон лайн листа до 25000 cm^{-1} . Отсечки по интенсивности отсутствует. Самая слабая линия 5.797778 cm^{-1} (переход $J=30 \rightarrow J=31$) для комнатной температуры имеет интенсивность $0.186\text{E}^{-91}\text{ см/молекулу}$, а самая сильная $202.686081\text{ cm}^{-1}$ (переход $J=3 \rightarrow J=4$) интенсивность $0.2669\text{E}^{-17}\text{ см/молекулу}$. Максимальное использованное в расчете значение углового момента $J=50$. Для идентификации использовались расчеты Партриджа и Швенке 1996 [1], 2000 [2] годов, а также более поздние, проведенные Сергеем Анатольевичем Ташкуном [3], расчет BT2 [4]. Кроме того в расчетах использовался программный пакет DVR3D [5] и потенциал Бубукиной и др. [6]. В итоге лайнлист VoTe содержит около 120 тысяч уровней энергии и более 150.000.000 переходов.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (грант № 18-02-00462).

1. Partridge H., Schwenke D.W. The determination of an accurate isotope dependent potential energy surface for water from extensive *ab initio* calculations and experimental data // J. Chem. Phys. 1997. V. 106. P. 4618–4639.
2. Schwenke D.W., Partridge H. Convergence testing of the analytic representation of an *ab initio* dipole moment function for water: Improved fitting yields improved intensities // J. Chem. Phys. 2000. V. 113. P. 6592–6597.
3. <http://spectra.iao.ru/molecules>.
4. Barber R.J., Tennyson J., Harris G.J., Tolchenov R.N. A high-accuracy computed water line list // Mon. Not. R. Astron. Soc. 2006. V. 368. P. 1087–1094.
5. Tennyson J., Kostin M. A., Barletta P. et al. DVR3D: a program suite for the calculation of rotation–vibration spectra of triatomic molecules // Computer Phys. Comm. 2004. V. 163. P. 85–116.
6. Bubukina I.I., Zobov N.F., Polyansky O.L. et al. Optimized semiempirical potential energy surface for H_2^{16}O up to 26000 cm^{-1} // Opt. Spectrosc. 2011. V. 110. P. 160–166.

New line list of H_2^{16}O up to 25000 cm^{-1}

B.A. Voronin¹ (vba@iao.ru), Jonathan Tennyson²

¹V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics SB RAS, 1 Ac. Zuev sq., 634021 Tomsk, Russia

²Department of Physics and Astronomy, University College London, London, WC1E 6BT, UK

A new line list transition of the water molecule is presented. The line lists is created on the basis of VoTe calculations (Voronin, Tennyson et al. in preparation). The cut of values used for this line list are 25000 cm^{-1} in wavenumber and $J_{\text{max}}=50$. Calculations uses the high accuracy, empirical potential energy surface (PES) of Bubukina et al. [1] and the CVR water dipole moment surface (DMS) [2]. Vibration-rotation energy levels up to $J=50$ are obtained and a novel method of labeling is used which allows more thorough labelling of the energy levels with approximate vibrational and rotational quantum numbers than previous water line lists computed using DVR3D. Some details are present in [3].

The work was supported by RFBR grant № 18-02-00462.

1. Bubukina I.I., Zobov N.F., Polyansky O.L. et al. Optimized semiempirical potential energy surface for H_2^{16}O up to 26000 cm^{-1} // Opt. Spectrosc. 2011. V. 110. P. 160–166.
2. Lodi L., J. Tennyson, O. Polyansky. A global, high accuracy *ab initio* dipole moment surface for the electronic ground state of the water molecule // J. Chem. Physics. 2011. V. 135, No 3. P. 034113.
3. Voronin B.A., J. Tennyson, L. Lodi. The VoTe room temperature H_2^{16}O line list up to 25000 cm^{-1} // Proc. of SPIE. 2018. V. 10833, 108330H <https://doi.org/10.1117/12.2504466>

Эффективные алгоритмы для учёта молекулярных спектров в задачах зондирования средней атмосферы методами инфракрасной спектроскопии

Фомин Б.А. (b.fomin@mail.ru)

Московский физико-технический институт, Институтский пер. 9, 141701 Долгопрудный Моск. обл., Россия

Молекулярные инфракрасные спектры в средней атмосфере обладают некоторыми особенностями по сравнению со спектрами в нижней атмосфере. Во-первых, с высотой спектральные линии приобретают довольно сложную форму и становятся всё более узкими и изолированными. Следует отметить, что спектроскопическая база HITRAN-2016 даёт возможность расчёта контура Хартманна-Трана, более точного чем контур Фойгта. Но это значительно усложняет вычисления. Также в средней атмосфере приходится учитывать не-ЛТР эффекты, что также существенно усложняет вычисления. В этой связи для вышеуказанных задач возрастает роль предварительно рассчитанных таблиц спектров («Spectral Lookup Tables»). Однако такие таблицы должны быть достаточно точными и как можно более компактными. В докладе представлены алгоритмы получения и применения таких таблиц на основе метода прямого интегрирования.

Работа стимулировалась подготовкой к проекту «Климат», планируемому на ближайшие годы, и была поддержана грантами РФФИ (18-01-00609А and 17-01-00220А).

Effective algorithms for taking into account molecular spectra in remote sensing of the middle atmosphere by infrared spectroscopy

B.A. Fomin (b.fomin@mail.ru)

Moscow Institute of Physics and Technology, 9 Institutsky per., 141701 Dolgoprudny Moscow region, Russia

Molecular infrared spectra in the middle atmosphere have some peculiarities compared with the spectra in the lower atmosphere. First, with height, the spectral lines become quite complex and more and more narrow and isolated. It should be noted that the spectroscopic base HITRAN-2016 makes it possible to calculate the contour of Hartmann-Tran, more accurate than the Voigt contour. But this greatly complicates the calculations. Also in the middle atmosphere, one has to take into account non-LTE effects, which also significantly complicates the calculations. In this regard, for the above tasks, the role of pre-calculated spectral tables (“Spectral Lookup Tables”) is increasing. However, such tables should be fairly accurate and as compact as possible. The report presents algorithms for obtaining and applying such tables based on the line-by-line method.

The work was stimulated by the preparation for the Climate project planned for the coming years and was supported by grants from the Russian Foundation for Basic Research (18-01-00609A and 17-01-00220A).

Оценка статистических характеристик ослабления оптических импульсов с использованием ретроспективных данных самолетного зондирования облачности

Черненко А.Е. (ae.chernenko@gmail.com), Бусыгин В.П., Кузьмина И.Ю,
Ковалевская О.И.

12 Центральный научно-исследовательский институт МО РФ, Весенняя ул. 2б, 141307 Моск. обл., Сергиев Посад-7, Россия

Поле оптического излучения подоблачного импульсного источника, формируемое в космосе, зависит от множества параметров атмосферы и подстилающей поверхности. Учёт всех параметров практически невозможен, поскольку их пространственное распределение и изменение во времени обычно являются случайными и неконтролируемыми. Поэтому для описания возможных вариаций характеристик поля целесообразно применять

статистические методы, а определяемый коэффициент прозрачности атмосферы рассматривать как функцию случайных величин.

Для реализации данного подхода разрабатываются статистические модели атмосферы с основными метеорологическими элементами и их комплексами, определяющими условия переноса излучения на трассах «земля-космос». Данные модели проецируются на реальные условия конкретных географических пунктов с учетом их сезонно-климатических особенностей, или обобщаются путем районирования на достаточно большие территории. В основу построения моделей положены дифференциальные законы повторяемости метеорологических элементов и их комплексов, полученные в результате первичной обработки материала самолетного зондирования облачности почти за десятилетний период в 32-х пунктах территории бывшего СССР. Объем материала позволяет проводить статистическое описание облачных полей, начиная с одномерных распределений и заканчивая комплексами второй и третьей размерности. При этом они включают в себя среднюю водность облаков, что дает возможность получить для рассматриваемых пунктов и районов распределения оптической толщины облаков и коэффициентов прозрачности атмосферы, необходимые для оценки вероятности регистрации оптических импульсов, например, молниевых разрядов.

Evaluation of the statistical characteristics of the attenuation of optical pulses using retrospective data of aircraft cloud sensing

A.E. Chernenko (ae.chernenko@gmail.com), V.P. Busygin, I.Yu. Kuzmina,
O.I. Kovalevskaya

*12th Central Research Institute of the Ministry of Defence of the Russian Federation, 2b Vesennyaya str.,
141307 Moscow Reg., Sergiyev Posad-7, Russia*

The field of optical radiation of a subcloud pulse source formed in space depends on many parameters of the atmosphere and the underlying surface.

The field of optical radiation of a subcloud pulse source formed in space, depends on many parameters of atmosphere and underlying surface. Taking into account all the parameters is practically impossible because of their spatial distribution and change in time is usually random and uncontrolled. Therefore, to describe the possible variations in field conditions it is reasonable to apply statistical methods, and determine the coefficients of atmosphere transparency as a function of random variables.

For implementing this approach, the paper develops a statistical model of the atmosphere with the main meteorological elements and their complexes, determining the conditions for radiation transfer on the track «earth-space». These models are projected on the real conditions of specific locations, taking into account their seasonal and climatic characteristics, or summarized by zoning on a fairly large territory. The basis for constructing of models based on differential laws of the frequency of occurrence of meteorological elements and their complexes, obtained as a result of the primary processing of the aircraft cloud sensing for almost a decade in 32 sites of the territory of the former USSR. The volume of the material allows for a statistical description of the cloud fields, starting with the one-dimensional distributions and ending with the complexes of the second and third dimension. They include the average water content of clouds, that gives the opportunity to obtain (for the considered points and the areas) distributions of the cloud optical thickness and cloud transparency coefficients needed to assess the probabilities of detection of optical pulses, for example, lightning strokes.

Роль отдельных параметров атмосферы в переносе оптического излучения молний в космос

Кузьмина И.Ю.¹ (irkuzmina@bk.ru), Бусыгин В.П.²

¹АО НПО "Системы прецизионного приборостроения", ул. Авиамоторная 53, 111024 Москва, Россия

²12 Центральный научно-исследовательский институт МО РФ, Весенняя ул. 26, 141307 Моск. обл., Сергиев Посад-7, Россия

В настоящее время возрастает научный и практический интерес к изучению природы образования и последствий грозовых явлений. Одно из основных направлений исследований в этой проблеме связано с глобальным космическим мониторингом молниевых разрядов. Значительная частота их наблюдения создаёт определенные трудности при идентификации разрядов, при разрешении отдельных ударов в рамках вспышки, при анализе материала совместной регистрации радиочастотных и оптических сигналов молний. Также внимание уделяется выбору и анализу информативных признаков, наиболее ярко выраженных у оптических импульсов молний.

В работе исследуются физические аспекты переноса оптического излучения приземного импульсного источника через облачный слой на приемник, находящийся на космическом аппарате. Характеристики поля излучения рассчитываются методом Монте-Карло. Изучаются особенности поведения относительной плотности потока излучения на борту космического аппарата при облаках с оптической толщиной от долей единицы до ста единиц и зенитных углах визирования от нуля до 60 градусов. Изучаются оптические эффекты, возникающие при наблюдении источника под различными углами визирования в зависимости от оптической толщины облачности τ . Изучаются принципы формирования светящейся области на верхней границе облака, ее амплитудно-временные и пространственные характеристики. Выявлен ряд особенностей формирования светимости верхней границы облачного слоя и углового распределения выходящего излучения. Показано, что при углах, отличных от нуля, область наиболее интенсивного свечения (световое пятно) с возрастанием τ смещается от линии визирования к направлению в зенит, образуя известный эффект «преломления» рассеянного света.

Линейный излучатель можно рассматривать как геометрическую модель молниевых разрядов с временной функцией потока $F(t)$. Тогда сигнал выходящего рассеянного излучения молнии определяется как математическая свертка функции $F(t)$ с импульсной характеристикой трассы $J(t)$. В работе рассчитаны примеры сигналов молний для функции $F(t)$.

Influence of some atmospheric parameters on the transfer of the lightning optical radiation to space

I.Yu. Kuzmina¹ (irkuzmina@bk.ru), V.P. Busygin²

¹RPC "Precision Systems and Instruments", 53 Aviamotornaya str. 111024 Moscow, Russia

²12th Central Research Institute of the Ministry of Defence of the Russian Federation, 2b Vesennyya str., 141307 Moscow Reg., Sergiyev Posad-7, Russia

Now there is a growing scientific and practical interest in the study of the nature of formation and the consequences of thunderstorm phenomena. One of the main directions of research in this matter is connected with the global space monitoring of lightning discharges. The significant frequency of their observation creates certain difficulties in identifying discharges, in resolving individual shocks within a flash, in analyzing the material of the joint recording of radio frequency and optical lightning signals. On the other hand, attention is paid to the selection and analysis of informative features that are most pronounced in optical pulses of lightning, primarily in powerful return strokes.

This paper is dedicated to studying the physical aspects of the transfer of optical radiation from impulse source below the cloud layer to a receiver located on a spacecraft. The amplitude-time and spatial-angle characteristics of the radiation field are calculated by the Monte Carlo method.

The features of the behavior of the relative radiation flux density on board a spacecraft in the presence of clouds with various optical thickness and under different zenith angles are investigated. The optical effects arising from observing the source under different angles are investigated depending on the optical thickness of the clouds τ . The principles of forming a luminous region at the upper boundary of the cloud are studied. A number of features of the formation of the luminosity of the upper boundary of the cloud layer and the angular distribution of the outgoing radiation are revealed. It is shown that at angles other than zero, the region of the most intense lighting (light spot) shifts from the line of sight to the direction of the zenith with increasing τ , forming the well-known “refraction” effect of scattered light.

A linear source can be considered as a geometric model of lightning discharge with its the time function $F(t)$. Then the signal of the scattering lightning radiation is determined as the mathematical convolution of the function $F(t)$ with the impulse response of the transmission trace $J(t)$. Examples of lightning signals for specified function $F(t)$ are calculated.

Многократное рассеяние света на ансамбле частиц в среде с круговым дихроизмом

Городничев Е.Е. (gorodn@theor.mephi.ru), Рогозкин Д.Б.

Национальный исследовательский ядерный университет "МИФИ", Каширское ш. 31, 115409 Москва, Россия

Интерес к исследованиям деполаризации света в сильно рассеивающих средах вызван широким применением поляризационных методов в дистанционном зондировании природных сред (аэрозолей, морской воды, облаков, биологических тканей) и искусственных структур (коллоидных растворов, эмульсий, пудр и др.). Многие из таких сред являются оптически активными – скорости распространения и коэффициенты поглощения волн, поляризованных по и против часовой стрелки, в них различаются. Различия в коэффициентах поглощения называют круговым дихроизмом. Основная экспериментальная трудность количественного измерения характеристик кругового дихроизма различных веществ связана со слабостью эффекта. Поэтому представляют интерес различные способы его усиления за счёт увеличения длины пути световых лучей в исследуемом веществе. Известно, что в окрестности первых двух резонансов Ми может быть выполнено так называемое первое условие Керкера – равенство между собой электрической и магнитной поляризуемостей частиц. При рассеянии на частицах, удовлетворяющих этому условию, не меняется циркулярная поляризация. Поэтому при диффузии света в ансамбле таких частиц затухание поляризации происходит аномально медленно.

В работе, на примере первоначально неполяризованного пучка света, показано, что добавление частиц в однородный, обладающий круговым дихроизмом образец может приводить к существенному увеличению разницы между интенсивностями прошедшего через него право- и лево-поляризованного света. При выполнении первого условия Керкера эффект может усиливаться по сравнению с однородным образцом до десяти раз.

Multiple light scattering by an ensemble of particles in a medium with circular dichroism

E.E. Gorodnichev (gorodn@theor.mephi.ru), D.B. Rogozkin

National Research Nuclear University, 31 Kashirskoe sh., 115409 Moscow, Russia

Interest in studies of the depolarization of light in strongly scattering media is caused by wide applications of polarization methods to remote sensing of natural media (aerosols, sea water, clouds, biological tissues) and artificial structures (colloid solutions, emulsions, powders, etc.). Many of these media are optically active: the waves polarized clockwise and counterclockwise are characterized by the different propagation velocities and absorption coefficients. The difference in

absorption coefficients is called as the circular dichroism. The main experimental difficulty in measuring the characteristics of circular dichroism for various substances is due to the weakness of the effect. Therefore, various ways of enhancing the effect by increasing the path length of light rays in the substance under study are of interest. It is known that, in the vicinity of the first two Mie resonances, the so-called first Kerker condition can be satisfied, which means equality between the electric and magnetic polarizabilities of the particles. When light is scattered by the particles satisfying this condition, the circular polarization does not change. Therefore, in the case of diffusive propagation through an ensemble of such particles, the decay of the polarization occurs abnormally slowly.

In this work, using the example of an initially unpolarized light beam, we show that the addition of particles to a homogeneous sample with circular dichroism can lead to a significant increase in the difference between the transmission intensities of right-hand and left-hand polarized light. When the first Kerker condition is fulfilled, the effect can increase up to ten times compared to a homogeneous sample.

Малопараметрическая аппроксимация коэффициента яркости солнечного излучения, отраженного атмосферой, в полосе газового поглощения

Николаева О.В. (nika@kiam.ru)

Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, Миусская пл. 4, 125047 Москва, Россия

При решении задач дистанционного зондирования земли (ДЗЗ) полезной является информация о зависимости от длины волны коэффициента яркости солнечного света, отраженного системой атмосфера–подстилающая поверхность. Такая информация позволяет восстановить некоторые важные параметры атмосферы: общее содержание поглощающего газа, средний радиус аэрозольной или облачной частицы и т.д.

В докладе представлена аналитическая формула для спектральной зависимости коэффициента яркости в полосе газового поглощения. Формула включает в себя сечения газового поглощения и неизвестные параметры, определяемые из условия наименьшего отклонения расчётных, с использованием аппроксимирующей формулы, и измеряемых спектральных коэффициентов яркости. Предлагаемая аппроксимация может быть использована при решении следующих задач:

1. Проведение line-by-line расчетов коэффициента яркости излучения во всех линиях газового поглощения.
2. Моделирование гиперспектральных измерений солнечного излучения.
3. Сжатие гиперспектральных данных.
4. Выполнение коррекции влияния газового поглощения на коэффициент яркости.

Low-parametrical approximation for the atmosphere spectral reflectance in a gas absorption band

O.V. Nikolaeva (nika@kiam.ru)

Keldysh Institute of Applied Mathematics, 4 Miusskaya sq., 125047 Moscow, Russia

Spectral dependence of Sun radiation reflected by the atmosphere–underlying surface carries very useful information for solving remote sensing problems. Particularly these data allows one to retrieve some atmosphere parameters not depending on wavelength. They are the total absorbing gas, mean radius of aerosol or cloud particles and so on.

The analytical formula defining the spectral reflectance in a gas absorption bands is presented. The formula includes gas absorption cross sections and unknown parameters. These parameters can

be found by minimization of the difference between results obtained with the use of the presented formula and measured spectral radiance of Sun light reflected by the atmosphere.

The formula can be used to solve the following problems:

1. Line-by-line calculations of reflectance in gas absorption lines.
2. Simulation of hyperspectral measurements of reflectance.
3. Hyperspectral data compression.
4. Correction of the gas absorption influence on atmosphere reflectance.

Влияние облачных слоев на потоки собственного и солнечного излучения в атмосфере Земли. Эталонные расчеты

Федотова Е.А. (godograf87@mail.ru), Мингалев И.В. (mingalev_i@pgia.ru),
Орлов К.Г. (orlov@pgia.ru)

Полярный геофизический институт, Академгородок 26а, 184209 Апатиты, Россия

В данной работе представлены результаты эталонных расчетов потоков собственного и солнечного излучения в атмосфере Земли на средних широтах, выполненных с разрешением по частоте 0.001 см^{-1} при наличии облачных слоев нижнего, среднего и верхнего ярусов, обладающих большой оптической толщиной. Целью данной работы исследование границ изменения скорости нагрева атмосферы собственным и солнечным излучением при наличии указанных облачных слоев. При расчетах использовалось приближение горизонтальной однородной атмосферы и учитывалось молекулярное и аэрозольное рассеяние. Численное решение 1-мерного по пространству уравнения переноса излучения выполнялось методом дискретных ординат. В расчетах использовались равномерная сетка по высоте с шагом 200 м и равномерная сетка по зенитным углам с шагом менее 9 градусов. Коэффициенты молекулярного поглощения рассчитывались с использованием спектроскопической базы данных HITRAN 2012.

The influence of cloud layers on the flows of thermal and solar radiation in the earth's atmosphere. Line-by-line calculations

E.A. Fedotova (godograf87@mail.ru), I.V. Mingalev (mingalev_i@pgia.ru),
K.G. Orlov (orlov@pgia.ru)

Polar Geophysical Institute, 26 Akademgorodok str., 184209 Apatity, Russia

This paper presents the results of reference calculations of thermal and solar radiation fluxes in the earth's atmosphere at mid-latitudes performed with a frequency resolution of 0.001 cm^{-1} in the presence of cloud layers of the lower, middle and upper tiers with a large optical thickness. The aim of this work is to study the boundaries of changes in the rate of heating of the atmosphere by thermal and solar radiation, in the presence of these cloud layers. The calculations used the approximation of a horizontal homogeneous atmosphere and took into account molecular and aerosol scattering. For the numerical solution of the 1-dimensional radiation transfer equation, one of the variants of the discrete ordinate method was used. The calculations used a uniform grid height in increments of 200 m and a grid uniform at Zenith angles in increments of less than 9 degrees. Molecular absorption coefficients were calculated using the HITRAN 2012 spectroscopic database.

Параметризации оптических параметров в нижней и средней атмосфере Земли для расчетов потоков собственного и солнечного излучения

Орлов К.Г. (orlov@pgia.ru), Мингалева И.В. (mingaleva_i@pgia.ru),
Федотова Е.А. (godograf87@mail.ru)

Полярный геофизический институт, Академгородок 26а, 184209 Апатиты, Россия

В данной работе представлено новое семейство параметризаций молекулярного поглощения в атмосфере Земли в интервале высот от поверхности Земли до 75 км. Проведено сравнение результатов расчетов поля собственного и солнечного излучения атмосферы Земли с использованием этих параметризаций с результатами эталонных расчетов. Рассмотрены как случай безоблачной атмосферы, так и случаи наличия облачных слоев нижнего, среднего и верхнего ярусов, обладающих большой оптической толщиной. Эталонные расчеты выполнены с разрешением по частоте излучения 0.001 см^{-1} . При расчетах использовалось приближение горизонтальной однородной атмосферы и учитывалось молекулярное рассеяние. Для численного решения 1-мерного по пространству уравнения переноса излучения использовался один из вариантов метода дискретных ординат. В расчетах использовались равномерная сетка по высоте с шагом 200 метров и равномерная сетка по зенитным углам с шагом менее 9 градусов. Коэффициенты молекулярного поглощения рассчитывались с использованием спектроскопической базы данных HITRAN 2012.

Parameterization of optical parameters in the lower and middle atmosphere of the Earth for calculations of thermal and solar radiation fluxes

K.G. Orlov (orlov@pgia.ru), I.V. Mingaleva (mingaleva_i@pgia.ru),
E.A. Fedotova (godograf87@mail.ru)

Polar Geophysical Institute, 26 Akademgorodok str., 184209 Apatity, Russia

This paper presents a new set of parametrizations of molecular absorption in the earth's atmosphere in the range of heights from the earth's surface to 75 km. The results of calculations of the field of thermal and solar radiation of the earth's atmosphere, using these parametrizations, are compared with the results of Line-by-Line calculations. Both the case of cloudless atmosphere and the cases of cloud layers of the lower, middle and upper tiers with a large optical thickness are considered. The calculations used the approximation of a horizontal homogeneous atmosphere and took into account molecular and aerosol scattering. For the numerical solution of the 1-dimensional radiation transfer equation, one of the variants of the discrete ordinate method was used. The calculations used a uniform grid height in increments of 200 meters and a grid uniform at Zenith angles in increments of less than 9 degrees. Molecular absorption coefficients were calculated using the HITRAN 2012 spectroscopic database.

Статистическое моделирование кольцевых световых структур при рассеянии лазерных импульсов в облачных и водных слоях

Пригарин С.М.^{1,2} (sergeim.prigarin@gmail.com), Миронова Д.Э.¹

¹*Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, пр. Ак. Лаврентьева 6, 630090 Новосибирск, Россия*

²*Новосибирский государственный университет, ул. Пирогова 2, 630090 Новосибирск, Россия*

Работа посвящена статистическому моделированию распространения лазерных импульсов в атмосферной облачности и водной среде. Известно, что после прохождения короткого лазерного импульса через достаточно тонкий облачный слой в течение нескольких

микросекунд в слое наблюдается расширяющееся световое кольцо (см., например, [1]). Результаты статистического моделирования [2, 3] говорят о том, что внутри основного светового кольца на короткое время возникает второе световое кольцо. Появление внутреннего кольца объясняется особенностями облачной индикатрисы рассеяния. Эффект, аналогичный расширяющемуся световому кольцу в облаке, может наблюдаться при определенных условиях и в водной среде.

1. Love S.P., Davis A.B., Ho C., Rohde C.A. Remote sensing of cloud thickness and liquid water content with Wide-Angle Imaging Lidar (WAIL) // *Atm. Res.* 2001. № 59–60, P. 295–312.
2. Prigarin S.M., Mironova D.E. Stochastic simulation of 3D distributions for laser pulses scattered in optical media // *Proc. SPIE.* 2016. V. 10035. 100351M.
3. Prigarin S.M., Mironova D.E. Stochastic simulation of peculiarities of laser pulse propagation in clouds and water media // *Proc. SPIE.* 2018. V. 10833. 108331Z.

Monte Carlo simulation of luminous rings generated by laser pulses in clouds and water layers

S.M. Prigarin^{1,2} (sergeim.prigarin@gmail.com), D.E. Mironova¹

¹*Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS, 6 Lavrentyeva pr., 630090 Novosibirsk, Russia*

²*Novosibirsk State University, 2 Pirogova str., 630090 Novosibirsk, Russia*

This paper deals with Monte Carlo simulation of laser pulse propagation in atmospheric clouds and water media. It is well known (see, for example [1]) that after a short laser pulse goes through a sufficiently thin cloud layer, an expanding ring of the multiply scattered light can be observed during a few microseconds. The simulation results show that the second smaller luminous ring may appear for a short time in addition to the primary ring of light [2, 3]. The second ring appears because of local maxima of the cloud phase functions. Moreover, under certain conditions the effects similar to an expanding ring may be observed in the water media.

1. Love S.P., Davis A.B., Ho C., Rohde C.A. Remote sensing of cloud thickness and liquid water content with Wide-Angle Imaging Lidar (WAIL) // *Atm. Res.* 2001. № 59–60, P. 295–312.
2. Prigarin S.M., Mironova D.E. Stochastic simulation of 3D distributions for laser pulses scattered in optical media // *Proc. SPIE.* 2016. V. 10035. 100351M.
3. Prigarin S.M., Mironova D.E. Stochastic simulation of peculiarities of laser pulse propagation in clouds and water media // *Proc. SPIE.* 2018. V. 10833. 108331Z.

Определение спектра водяных капель по облачной индикатрисе рассеяния

Чжао Б.¹, Пригарин С.М.^{1,2} (sergeim.prigarin@gmail.com)

¹*Новосибирский государственный университет, ул. Пирогова 2, 630090 Новосибирск, Россия*

²*Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, пр. Ак. Лаврентьева 6, 630090 Новосибирск, Россия*

Работа посвящена восстановлению распределения радиуса капель в атмосферном облаке по зашумленной индикатрисе рассеяния [1]. Для решения этой некорректно поставленной задачи используется вариационный метод регуляризации Тихонова, который сводится к поиску минимума функционала невязки со стабилизатором. В качестве стабилизатора используется дискретный аналог второй производной от искомого решения.

Приводятся результаты вычислительных экспериментов для различного уровня шума. Индикатрисы рассматриваются на всём интервале углов от 0 до 180 градусов и на участках 0–30 и 150–180 градусов. Показано, что метод Тихонова даёт хорошие результаты при подходящем выборе параметра регуляризации. Для выбора параметра регуляризации был использован L-curve метод.

1. Kablukova E.G., Prigarin S.M., Zabinyako G.E. Cloud droplet size distribution reconstruction by the phase function // *Proc. SPIE.* 2018. V. 10833. 1083325.

The determination of water drop spectra by cloud phase functions

B. Zhao¹, S.M. Prigarin² (sergeim.prigarin@gmail.com)

¹Novosibirsk State University, 2 Pirogova str., 630090 Novosibirsk, Russia

²Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS, 6 Lavrentyeva pr., 630090 Novosibirsk, Russia

This paper deals with the reconstruction of size distributions of water drops in atmospheric clouds based on the scattering phase function measurements. To solve this ill-posed problem, we have applied the Tikhonov variational regularization method, which brings about finding a minimum of the residual functional with a stabilizer. As the stabilizer, we consider a discrete analogue of the second derivative.

In this study, we present the results of computational experiments for various degrees of noise. The phase function is considered over the whole range of angles (from 0 to 180 degrees) and in ranges of 0–30 and 150–180 degrees. The Tikhonov regularization method gives good results with a suitable choice of the regularization parameter. To choose the regularization parameter, we use the L-curve method.

1. Kablukova E.G., Prigarin S.M., Zabinyako G.E. Cloud droplet size distribution reconstruction by the phase function // Proc. SPIE. 2018. V. 10833. 1083325.

Математическая модель коэффициента яркости поверхности реальных объектов

Басов А.Ю. (callia12@rambler.ru), Будаков В.П.

Национальный исследовательский университет «МЭИ», Красноказарменная ул. 14, 111250 Москва, Россия

При проведении светотехнических расчётов коэффициента яркости в большинстве случаев процессы, происходящие в объёме, не учитываются. Однако доказано, что результаты в этом случае не будут соответствовать действительности. Для получения достоверных результатов необходимо использовать модель отражения, учитывающую рассеяние в объёме. Настоящая работа посвящена созданию математической модели отражения плоскопараллельного слоя с учётом этих особенностей.

В основе модели лежит решение уравнения переноса излучения (УПИ) для слоя, в котором процессы, происходящие на границах слоя, не учитываются. Для нахождения численного решения необходимо разложить функции, входящие в уравнение, по конечному базису. Однако существует проблема с дискретизацией интеграла рассеяния, так как в угловом распределении яркости существует дельта-особенность. Поэтому решение представляется в виде суммы изотропной и анизотропной части. Анизотропная часть решения находится с помощью малоугловой модификации метода сферических гармоник. Регулярная часть решения представляется в виде разложения по методу дискретных ординат. В дальнейшем наиболее общая модель была расширена с учётом процессов, которые могут происходить на границах слоя – верхняя граница отражает по закону Френеля, а подложка отражает по закону Ламберта. Также в работе рассматривается структура из нескольких слоёв. Матрично-операторный метод отражает свойства инвариантности решения для плоского слоя, то есть решение для нескольких слоёв инвариантно решению для одного слоя с учётом коэффициентов, характеризующих каждый слой в отдельности.

Описанная модель была реализована в среде MATLAB. Проведена отладка программы и достигнута высокая скорость расчётов. Проведён анализ влияния количества дискретных ординат на результаты расчётов, и предложен метод синтетических итераций, который позволяет ускорить расчёты без потери качества. В дальнейшем необходимо наполнить модель параметрами (рассеяние по теории Ми, оптическая толща), чтобы результаты моделирования корректно описывали процессы, происходящие в реальных средах. Для получения более функциональной модели планируется реализовать геометрическую

особенность границы – сделать её случайно неровной. Результаты работы модели будут сравниваться с результатами экспериментальных исследований, а также с результатами компьютерного моделирования по методу Монте-Карло.

Mathematical model of radiance factor of real object surfaces

A.Yu. Basov (callia12@rambler.ru), V.P. Budak

*National Research University "Moscow Power Engineering Institute", 14 Krasnokazarmennaya str., 111250
Moscow, Russia*

Processes in the volume are not considered in most cases when carrying out light reflection calculations. However, it is proved that the results in this case will not correspond to reality. To obtain reliable results of the light calculations, it is necessary to use the model of reflection considering the scattering in the volume. This paper is devoted to the creation of a radiance reflection mathematical model of a plane-parallel layer considering these features.

The model is based on the solution of the radiation transfer equation for a layer in which the processes occurring at the boundaries of the layer are not considered. To find a numerical solution, it is necessary to expand the functions entering the equation in a finite basis. However, there is a problem with the discretization of the scattering integral. There is a singularity in the angular distribution of luminance. Therefore, the solution is represented as the sum of the isotropic and anisotropic parts. The anisotropic part of the solution is found using a small-angle modification of the spherical harmonics method. The regular part of the solution is represented as a discrete ordinate decomposition. Then the most general model was expanded considering the processes that can occur at the boundaries of the layer: the top boundary reflects by the Fresnel law, and the substrate reflects by the Lambert law. The paper also considers the structure of several layers. The matrix-operator method shows the invariance properties of a solution for a flat layer, that is, a solution for several layers is invariant to a solution for a single layer, considering the coefficients characterizing each layer separately.

The described model was implemented in MATLAB. The program was debugged, and high speed of calculations was achieved. The effect analysis of the discrete ordinates number on the results of calculations has been carried out, and a method of synthetic iterations has been proposed, which allows speeding up calculations without loss of quality. In the future, it is necessary to fill the model with parameters (scattering according to the Mie theory, optical depth) so that the simulation results correctly describe the processes occurring in real layers. To obtain a more functional model, it is planned to implement a geometric feature of the border to make it randomly uneven (irregular). The results of the model will be compared with the results of experimental studies, as well as with the results of computer simulation using the Monte Carlo method.

О возможностях моделей глубоких сверточных нейронных сетей и многоагентных систем в задачах обработки гиперспектральных спутниковых изображений

Басс Л.П. (bass@kiam.ru), Кузьмина М.Г., Николаева О.В.

Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша, Миусская пл. 4, 125047 Москва, Россия

Последнее десятилетие наряду с множеством высокоточных традиционных вычислительных методов, используемых для обработки и анализа гиперспектральных спутниковых данных и необходимых для решения обратных задач восстановления характеристик атмосферы и земной поверхности по спутниковым наблюдениям, активно применяются нейросетевые методы, основанные на построении сверточных нейронных сетей с глубоким обучением (DCNN-сетей, deep convolutional neural networks).

В докладе дано представление о современном состоянии исследований по применению глубоких сетей для анализа гиперспектральных спутниковых данных (включая сети-

автоэнкодеры, используемые для сжатия информации). В целом ряде работ была продемонстрирована высокая точность решения задач анализа гиперспектральных изображений DCNN-методами (например, в задачах сегментации и классификации гиперспектральных спутниковых изображений). Развиваются методы преодоления длительности предварительной настройки (обучения) DCNN-сетей. Активно развиваются и применяются также методы обработки гиперспектральных спутниковых изображений, основанные на построении моделей многоагентных систем (multi-agent systems, MAS). Приводятся примеры успешного применения.

On the capabilities of deep convolutional neural network models and multi-agent systems in problems of satellite hyperspectral image processing

L.P. Bass (bass@kiam.ru), M.G. Kuzmina, O.V. Nikolaeva
Keldysh Institute of Applied Mathematics, 4 Miusskaya sq., 125047 Moscow, Russia

During last decade network approaches based on development of deep convolutional neural networks models (DCNN) were actively and successfully applied in problems of large hyperspectral satellite image processing (besides a great variety of traditional computational methods, used for analysis of hyperspectral images)..

The presented talk contains the information on neural network approach applications to the problems of hyperspectral image analysis (including DCNN-networks and autoencoder networks, AE, that are used for information compression). In considerable number of papers a high performance accuracy of DCNN-methods was demonstrated in solutions of image segmentation and classification problems. New advanced methods were also developed to overcome great computer time necessary for preliminary DCNN network tuning. Methods based on creating the models of multi-agent systems (MAS) were actively developed as well. The examples of MAS-models, successfully applied in problems of hyperspectral image processing are also marked.

Моделирование случайно-неровной френелевской границы двух сред в задачах переноса излучения

Будак В.П. (BudakVP@gmail.com), Гримайло А.В.
Национальный исследовательский университет «МЭИ», Красноказарменная ул. 14, 111250 Москва, Россия

При моделировании переноса поляризованного излучения в системе «атмосфера-океан» актуальной задачей является учет корреляции волнений состояния границы раздела. Единственным реальным методом решения указанной задачи является метод Монте-Карло, поскольку учет корреляций в стохастическом переносе излучения с последующим усреднением приводит к связанной иерархической системе уравнений. Подобная модель выходит за рамки только атмосферной оптики и представляет модель коэффициента яркости поверхностей реальных объектов. Свет практически всегда отражается не только от граней поверхности вещества, но и от самого объема этого вещества.

С целью учета этих эффектов при моделировании отражения предлагается использовать схему с рассеивающим слоем, ограниченным диффузно отражающей подложкой снизу и случайно-неровной френелевской границей сверху. Формирование последней представляет собой нетривиальную задачу. Существует два основных подхода для решения подобного рода задач. Первый заключается в моделировании поверхности как случайного поля. При этом появляется необходимость каждый раз вычислять координаты точки пересечения луча с поверхностью, что требует большого количества вычислительных ресурсов. В этой связи более предпочтительным является второй подход, который основан на методе математических ожиданий. Его суть заключается в моделировании не всей

поверхности, а только конкретных точек пересечения луча с поверхностью. Также разыгрывается направление луча после взаимодействия с поверхностью.

В докладе приведен алгоритм данного метода применительно к светотехническим задачам. Его использование позволило проверить, насколько существенное влияние на результат оказывает учет корреляционной функции при моделировании неровностей поверхности. Также этот алгоритм в перспективе даст возможность ускорить вычисления в описанной модели отражающей поверхности, что откроет дорогу для ее использования при расчете многократных отражений.

Modelling of the random rough Fresnel boundary between two media in the radiative transfer problems

V.P. Budak (BudakVP@gmail.com), A.V. Grimailo

National research University "Moscow Power Engineering Institute", 14 Krasnokazarmennaya str., 111250 Moscow, Russia

While modelling polarized radiative transfer in the atmosphere-ocean system, the actual problem is to account the correlation between the fall and rise of the media boundary waves. The only way to solve the problem is using Monte-Carlo Methods because the correlation account in the stochastic radiative transfer with subsequent averaging leads to the related hierarchical equation system. The model above goes beyond the atmospheric optics only and represents the luminance factor model for the surfaces of different real objects. The light is almost always reflected not only from the surface of the object but from the material volume as well.

In order to account these effects while modelling surface reflection, we propose the scheme with a scattering layer bounded by diffusely reflecting plane at the bottom and randomly rough Fresnel surface above. The formation of the latter is a nontrivial problem. There are two approaches to solve such problems. The first one is to model the surface as a random field. In this case, it becomes necessary to calculate the coordinates of the ray and surface intersection points. This way requires a lot of computational resources. The second approach based on the method of mathematical expectations is preferable, accordingly. Its essence lies in modelling not the entire surface, but the specific points of the ray and surface intersection. The scattered ray direction is selected randomly as well.

The algorithm of this method applied to lighting engineering problems is presented in the report. Using the method enabled us to test the influence of the correlation function account on the result in the random rough surface modelling. In the future, this algorithm will make it possible to speed up the calculations in the surface reflection model described and open the way for its usage in the multiple reflections modelling.

Влияние солнечной активности на распространение солнечного излучения в линии Лайман-альфа в D-области ионосферы

Дышлевский С.В.¹ (sergiodd@mail.ru), Беликов Ю.Е.²

¹МГИМО МИД России, пр. Вернадского 76, 119454 Москва, Россия

²Институт прикладной геофизики им. Е.К. Федорова, Ростокинская ул. 9, 129128 Москва, Россия

Солнечное излучение в водородной линии Лайман-альфа считается одним из основных источников ионизации в D-области ионосферы. Однако до настоящего времени не решена проблема ионизации этой области в сумеречных и ночных условиях, в особенности нижней её части на высотах 60–75 км, когда отсутствует освещение прямым солнечным излучением. Таким источником может быть рассеянное излучение в линии Лайман-альфа.

Расчеты прямого и рассеянного излучения по всей ширине линии проводились по сферической модели переноса, учитывающей эффекты многократного рассеяния. Концентрации рассеивающей составляющей, атомарного водорода, и поглощающей

компоненты, молекулярного кислорода, задавались по модели MSIS-00. Результаты расчетов позволили объяснить ряд особенностей в явлении зимней аномалии в области D. В работе приводятся результаты расчетов прямых и рассеянных потоков в зависимости от солнечной активности в летний и зимний сезоны для различных зенитных углов Солнца в дневных, сумеречных и ночных условиях на разных высотах в D-области ионосферы. Показано, что полный поток излучения в период высокой солнечной активности в летнее время на высотах 70–85 км выше в 2.5–3 раза, чем в годы низкой активности. Для зимнего сезона существенных различий потоков в зависимости от активности Солнца на указанных высотах не наблюдается. Увеличение потока летом при активном Солнце происходит на “крыльях” линии Лайман-альфа, причем рост на “красном крыле” линии существенно превышает вклад “фиолетового крыла”. Характерным фактом является значительное превышение рассеянного излучения над прямым при больших зенитных углах Солнца независимо от солнечной активности и сезона на высотах от ~ 60 км до 75–80 км. По нашим оценкам, рост потоков излучения летом при повышенной солнечной активности может приводить при определенных условиях к росту электронной концентрации в D-области в 1.5–2 раза.

The effect of solar activity on propagation of solar radiation in Lyman-alpha line in the D-region of the ionosphere

S.V. Dyshlevsky¹ (sergiodd@mail.ru), Yu.E. Belikov²

¹MGIMO University, 76 Vernadsky ave., 119454 Moscow, Russia

²E.K. Fedorov Institute of Applied Geophysics, 9 Rostokinskaya str., 129128 Moscow, Russia

The solar radiation in the hydrogen Lyman-alpha line is considered to be one of the main sources of ionization in the ionospheric D-region. However up till now the problem of D-region ionization in the twilight and night conditions is not solved, particularly in its lower layer at the altitudes of 60–75 km when the direct solar irradiation is absent. A possible source of ionization is the scattered radiation in Lyman-alpha line.

Calculations of the direct and scattered radiation over the line width were carried out by the spherical model of radiation transfer which takes into account the multiscattering effects. The concentration of scattering and absorbing agents, the atomic hydrogen and molecular oxygen correspondingly, were given by MSIS-00 model. The obtained results allowed us to explain some peculiarities in the winter anomaly phenomenon in the D-region. We present the results of the direct and scattered fluxes calculations for low and high solar activity in summer and winter, and for various solar zenith angles for daytime, twilight, and nighttime conditions at various altitudes in the ionospheric D-region. It has been shown, that the total radiation flux in the period of high solar activity in the altitudinal range of 70–85 km in summertime is higher than that one during low solar activity by 2.5–3 times. For wintertime there is no sufficient flux difference for the quiet and active Sun. The flux rise in summertime for active Sun conditions is observed at the Lyman-alpha line ‘wings’, where the rise at the ‘red wing’ sufficiently exceeds that one at the ‘violet wing’. A specific result is a significant excess of the scattered radiation over the direct one for large solar angles irrespectively of the solar activity and season at the altitudes from ~ 60 km to 75–80 km. We assume that for certain conditions in summertime during enhanced solar activity the flux increase can bring to the electron concentration rise in the D-region up to 1.5–2 times.

Статистическое моделирование переноса тепловой радиации в неоднородной облачности с учетом сферичности атмосферы

Насртдинов И.М., Журавлева Т.Б. (ztb@iao.ru), Чеснокова Т.Ю.

Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, пл. Ак. Зюева 1, 634055 Томск, Россия

Выявленное еще в 70-ых годах XX века влияние горизонтальной неоднородности облаков на перенос ИК-излучения в атмосфере Земли стимулировало появление

радиационных моделей, корректно описывающих перенос оптического излучения в облачной атмосфере с учетом пространственной неоднородности последней. Существующие на сегодняшний день алгоритмы расчета реализованы в рамках плоско-параллельной модели атмосферы, а вертикально- и горизонтально неоднородные облачные поля задаются в виде совокупности «кубиков» с постоянными оптическими характеристиками. Для учета 3D эффектов облаков используются алгоритмы метода Монте-Карло или Spherical Harmonics Discrete Ordinate Method (SHDOM, [1]). С точки зрения учета молекулярного поглощения, традиционными в 1D и 3D радиационных кодах являются методы полинейного счета и k-distribution.

В настоящей работе представлены новые модификации алгоритмов метода Монте-Карло, предназначенные для расчета спектральных радиационных характеристик теплового излучения в сферической модели атмосферы Земли в присутствии пространственно-неоднородных облаков. Эти алгоритмы базируются на созданном нами ранее в рамках пакета MATHART программно-алгоритмическом обеспечении для моделирования спектрально-угловых характеристик и потоков солнечного излучения в 2D и 3D облачных полях [2]. Новые алгоритмы реализованы в пуассоновской модели разорванной облачности [3]; облачные элементы аппроксимированы опрокинутыми усеченными параболоидами. Алгоритмы отличаются различными подходами к учету молекулярного поглощения: нами использованы традиционный метод k-distribution и оригинальная модификация метода рандомизации по частоте. Суть метода рандомизации по частоте состоит в том, что выбранный спектральный интервал $\Delta\lambda$ разбивается на более узкие подынтервалы с высоким спектральным разрешением (0.005 см^{-1}). Для моделирования траектории фотона используется метод сопряженных блужданий. В пределах выбранного случайным образом подынтервала оптические характеристики неоднородной трехмерной среды меняются только за счет вариаций коэффициента молекулярного поглощения, тогда как оптические характеристики аэрозоля, облаков, коэффициенты рэлеевского рассеяния, а также альbedo подстилающей поверхности в узком спектральном интервале $\Delta\lambda$ остаются постоянными. Собственное излучение Земли и атмосферы рассчитывается как математическое ожидание по всему множеству траекторий, которое вычисляется в виде функции Планка только в тех точках столкновения, в которых имел место факт поглощения.

В работе приведены результаты тестирования развитых алгоритмов на основе сопоставления с независимыми расчетами других авторов, а также взаимного тестирования наших алгоритмов – методов k-распределения и рандомизации по частоте. Представлены примеры моделирования уходящей с верхней границы атмосферы спектральной яркости в интервале 6–14 мкм в различных облачных реализациях. Обсуждается влияние конфигурации облаков и альbedo подстилающей поверхности на формирование спектрально-угловых характеристик поля теплового излучения в зависимости от условий наблюдения (в том числе – больших зенитных углах).

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (грант 19-01-00351).

1. Evans K.F. The spherical harmonics discrete ordinate method for three-dimensional atmospheric radiative transfer // J. Atmos. Sci. 1998. V. 55. P. 429–446.
2. Zhuravleva T, Nasrtdinov I. Simulation of Bidirectional Reflectance in Broken Clouds: From Individual Realization to Averaging over an Ensemble of Cloud Fields // Remote Sens. 2018. 10:1342.
3. Зуев В.Е., Титов Г.А. Оптика атмосферы и климат Томск.: Изд-во Спектр ИОА СО РАН. 1996. 271 с.

Statistical simulation of thermal radiative transfer in inhomogeneous clouds with accounting for the atmospheric sphericity

I.M. Nasrtdinov, T.B. Zhuravleva (ztb@iao.ru), T.Yu. Chesnokova
V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics SB RAS, 1 Ac. Zuev sq., 634055 Tomsk, Russia

The effect of horizontal cloud inhomogeneity on IR radiative transfer in the Earth's atmosphere, revealed as early as 1970s, stimulated the appearance of radiation models that describe correctly the radiative transfer in the cloudy atmosphere, taking into account its spatial

inhomogeneity. The calculational algorithms, existing today, are implemented in the framework of the plane-parallel model of the atmosphere; while the vertically and horizontally inhomogeneous cloud fields are specified as a set of «cuboids» with constant optical characteristics. Algorithms of the Monte Carlo method or the Spherical Harmonics Discrete Ordinate Method (SHDOM, [1]) are used to treat the 3D cloud effects. From the viewpoint of accounting for the molecular absorption, methods of the line-by-line calculation and k-distribution are traditional in 1D and 3D radiation codes.

In this work, we present new algorithms of the Monte Carlo method, designed to calculate the spectral thermal radiance and fluxes in the spherical model of the atmosphere in the presence of spatially inhomogeneous clouds. These algorithms are based on the MATHART software package that we developed earlier to simulate the spectral-angular characteristics and fluxes of solar radiation in 2D and 3D cloud fields [2]. New algorithms are implemented in a Poisson model of broken clouds [3]; cloud elements are approximated by inverted truncated paraboloids. The algorithms differ by approaches to accounting for the molecular absorption: we used the traditional k-distribution method and an original modification of the method of randomization in frequency. The essence of the method of randomization in frequency is that the selected wavelength interval $\Delta\lambda$ is divided into narrower subintervals with a high spectral resolution (0.005 cm^{-1}). Photon trajectory modeling is performed using the method of adjoint walks. Within a subinterval chosen at random, the optical characteristics of inhomogeneous tree-dimensional medium change only due to variations in the molecular absorption coefficient; while the optical characteristics of aerosol and clouds, Rayleigh scattering coefficients, as well as the surface albedo in a narrow wavelength interval $\Delta\lambda$ remain constant. The thermal radiation of the Earth and the atmosphere is calculated as a mathematical expectation over the entire set of trajectories, which is calculated as a Planck function only at those collision points where absorption occurred.

In this work our algorithms are tested by comparing them with independent calculations, performed by other authors, as well as through cross-check of our algorithms, i.e., the methods of k-distribution and randomization in frequency. We present examples of simulating the spectral radiance, outgoing at the top of the atmosphere, in the interval of 6–14 μm in different cloud realizations. We discuss how the cloud configuration and the surface albedo influence the formation of spectral-angular characteristics of the field of thermal radiation for different observation conditions (and, in particular, for large zenith angles).

This work was supported in part by the Russian Fund for Basic Research (through grant 19-01-00351).

1. Evans K.F. The spherical harmonics discrete ordinate method for three-dimensional atmospheric radiative transfer // J. Atmos. Sci. 1998. V. 55. P. 429–446.
2. Zhuravleva T, Nasrtdinov I. Simulation of Bidirectional Reflectance in Broken Clouds: From Individual Realization to Averaging over an Ensemble of Cloud Fields // Remote Sens. 2018. 10:1342.
3. Zuev V.E., Titov G.A. Atmospheric optics and climate. Tomsk: Spektr Publishing, Institute of Atmospheric Optics, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences. 1996. 271 pp. (in Russian)

Расчет методом Монте-Карло оптической передаточной функции системы океан-атмосфера

Ухинова О.С. (olsu@osmf.sccc.ru), Каргин Б.А.

Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, пр. Ак. Лаврентьева 6, 630090 Новосибирск, Россия

Поле оптического излучения системы океан-атмосфера, как известно, в значительной мере формируется под воздействием взволнованной морской поверхности, отражающей и преломляющей приходящее электромагнитное излучение. Характерная особенность этого воздействия обусловлена случайным характером ветрового волнения морской поверхности. В силу этого строгое решение подавляющего числа прямых задач оптики системы океан-атмосфера возможно лишь в статистической формулировке. Математическая суть таких задач заключается в вычислении соответствующих функционалов от решения уравнения

переноса излучения, заданных на случайном поле, каковым является взволнованная морская поверхность. Метод Монте-Карло впервые был применен к расчету переноса солнечной радиации в системе атмосфера-океан в [1], где для описания взволнованной поверхности моря принята так называемая плоская “фацетная” модель, в которой граница раздела вода-воздух представляет собой случайную поверхность, составленную из набора элементарных площадок, центры которых лежат в одной плоскости, а нормали к ним распределены с заданной одноточечной функцией распределения. Расчеты в [1] были выполнены на основе прямого моделирования процесса переноса излучения. Позже в [2] для той же модели предложены более эффективные весовые алгоритмы. Результаты расчетов в [1, 2] получены в пренебрежении эффектами затенения и переотражения излучения элементами поверхности. Указанная выше “фацетная” модель была впервые применена для широкомасштабных численных расчетов оптических характеристик взволнованной поверхности моря в [3]. В [4] выписано интегральное стационарное уравнение переноса излучения в среде со случайно-неоднородной преломляющей границей и предложен весовой алгоритм решения этого уравнения методом Монте-Карло. Предполагалось, что этот алгоритм будет реализован в рамках разрабатываемой системы автоматизации статистического моделирования атмосферно-оптических задач, частично описанной в [5].

В настоящей работе рассмотрена задача по восстановлению изображения подводных объектов. В работе приведен алгоритм метода Монте-Карло для расчетов оптической передаточной функции (ОПФ) системы океан-атмосфера, основанный на сочетании методов «коррелированной выборки» и «сопряженных траекторий». Представлены некоторые численные оценки влияния ряда факторов на ОПФ системы.

Работа выполнена в рамках проекта гос. задания № 0315-2016-0002.

1. Plass G.N., Kattawar G.W. Radiative Transfer in an Atmosphere-Ocean System // *Appl. Opt.* 1969. V. 8, № 2. P. 455–466.
2. Джетыбаев Е.О., Каргин Б.А. Актуальные проблемы прикладной математики и математического моделирования. Новосибирск: Наука. 1982. С. 83–91.
3. Мулламаа Ю.-А.Р. Атлас оптических характеристик взволнованной поверхности моря. Институт физики и астрономии АН ЭССР. Тарту. 1964.
4. Kargin B.A., Rakingulov K.B. A weighting Monte Carlo method for modelling the optical radiation field in the ocean-atmosphere system // *Russ. J. Numer. Anal. Math. Modelling.* 1992. V. 7, № 3. P. 221–240.
5. Каргин Б.А., Лаврентьев А.Е., Пригарин С.М. Система автоматизации статистического моделирования радиационного поля атмосферы // *Оптика атмосферы и океана.* 1999. Т. 12. № 3. С. 238–245.

The Monte-Carlo method for calculation of the optical transfer function of the ocean-atmosphere system

O.S. Ukhinova (olsu@osmf.sssc.ru), B.A. Kargin

*Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS, 6 Lavrentyeva pr., 630090
Novosibirsk, Russia*

The field of optical radiation of the ocean-atmosphere system is known to be largely formed under the influence of the disturbed sea surface, which reflects and refracts the incoming electromagnetic radiation. A characteristic feature of this impact is due to the random nature of the wind waves of the sea surface. Because of this, an exact solution of the overwhelming number of direct problems of optics of the ocean-atmosphere system is possible only in a statistical formulation. The mathematical essence of such problems consists in calculating the corresponding functionals of the solution of the radiation transfer equation given on a random field, which is the rough sea surface. The Monte-Carlo method was first applied to the calculation of solar radiation transfer in the atmosphere-ocean system in [1], where the so-called “facet” model was used to describe the rough sea surface, in which the water-air interface represents as a random surface composed of a set of elementary areas, the centers of which lie in the one plane, and the normals to them are distributed with a given single-point distribution function. The calculations in [1] were performed on the basis of direct simulation of the radiation transfer process. Later in [2] the more efficient weighting algorithms were proposed for the same model. The results of calculations in [1,

2] were obtained, therefore, in neglecting the effects of shading and re-reflections of radiation by elements of the surface. The above-mentioned “facet” model was first used for large-scale numerical calculations of optical, including polarization, characteristics of the rough sea surface in [3]. In the Monte-Carlo calculations, the “facet” model was subsequently used in [4] to study the possibility of determining the parameters of internal waves in the ocean from space and in [5], where the effect of wind waves on the lidar echo signal in the laser probing problem was studied the upper layer of the ocean. The integral stationary radiation transfer equation in a medium with a randomly inhomogeneous refracting boundary was written in [4], and the weighting algorithm was proposed for solving this equation using the Monte Carlo method. It has been assumed that this algorithm will be implemented within the framework of the automation system being developed for statistical modeling of atmospheric-optical problems, partially described in [5].

In this paper, we consider the problem of correction the image of underwater objects. We present an algorithm of the Monte Carlo method for calculating the optical transfer function (OTF) of the ocean-atmosphere system based on a combination of the methods of “correlated sampling” and “conjugate trajectories”. Some numerical estimates of the effect of a number of factors on the OTF system are presented.

The work was carried out as part of the state task project No. 0315-2016-0002.

1. Plass G.N., Kattawar G.W. Radiative Transfer in an Atmosphere-Ocean System // Appl. Opt. 1969. V. 8, № 2. P. 455–466.
2. Dzhetybaev E.O., Kargin B.A. Actual programs of applied mathematics and mathematical modeling. Novosibirsk: Nauka. 1982. C. 83–91 (in Russian).
3. Mullamaa Yu.-A.R. Atlas optical characteristics of rough sra surface. Institute of Physics and Astronomy AS ESSR. Tarty. 1964.
4. Kargin B.A., Rakimgulov K.B. A weighting Monte Carlo method for modelling the optical radiation field in the ocean-atmosphere system // Russ. J. Numer. Anal. Math. Modelling. 1992. V. 7, № 3. P. 221–240.
5. Kargin B.A., Lavrentiev A.E., Prigarin S.M. System pf avtomation System of automation of statistical modeling of the radiation field of the atmosphere // Optika Atmosphery i Okeana. 1999. V. 12, № 3. C. 238–245 (in Russian).

Сравнение нового лайн-листа VoTe с БД GEISA2015, HITRAN2016 и с другими экспериментальными данными по водяному пару

Воронин Б.А. (vba@iao.ru), Михайленко С.Н. (semen@iao.ru)

Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, пл. Ак. Зуева 1, 634055 Томск, Россия

Одним из наиболее важных газовых компонентов атмосферы является водяной пар. В частности его основная изотопная модификация – H_2^{16}O . Основные параметры линий поглощения – это частота и интенсивность. Так как в настоящее время все чаще используются для атмосферных приложений вариационные расчеты, авторами доклада сделано сравнение нового вариационного расчета VoTe [1] как с известными банками данных атмосферных газов GEISA, HITRAN, так и с экспериментальными и расчетными спектрами поглощения в различных диапазонах. Наибольший интерес представляет диапазон выше 15000 см^{-1} , который наименее исследован. Авторы работы ставили перед собой задачу определения применимости данного расчета, оценку ошибок по частоте и интенсивности.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (грант №19-03-00389).

1. Voronin B.A., J. Tennyson, L. Lodi. The VoTe room temperature H_2^{16}O line list up to 25000 см^{-1} // Proc. SPIE. 2018. V. 10833, 108330H, <https://doi.org/10.1117/12.2504466>.

Comparison of the VoTe line list against GEISA2015 and HITRAN2016 data bases and experimental spectra of water vapor

B.A. Voronin (vba@iao.ru), S.N. Mikhailenko (semen@iao.ru)

V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics SB RAS, 1 Ac. Zuev sq., 6340055 Tomsk, Russia

Due to the progress of computational methods, the quality of molecular spectra calculations is improving very quickly. In particular, the quality of variational calculations of water molecule spectra today is such that the results of these calculations are used both for the analysis of laboratory spectra and for the atmospheric applications. Now we are reporting a comparison of the new H_2^{16}O variational line list VoTe [1] against two spectroscopic data bases GEISA and HITRAN, and against experimental absorption spectra in different regions. Our interest is focused on the range above 15000 cm^{-1} , which is the least studied. The main absorption line parameters are frequency and intensity. So, the authors set themselves the task of determining the applicability of this calculation for the spectrum analysis as well as the error evaluation in the line positions and the line intensities.

The work partly was supported by the Russian Foundation for Basic Research (Grants No. 19-03-00389).

1. Voronin B.A., J. Tennyson, L. Lodi. The VoTe room temperature H_2^{16}O line list up to 25000 cm^{-1} // Proc. SPIE. 2018. V. 10833, 108330H, <https://doi.org/10.1117/12.2504466>.

Оценки параметров уширения линий водяного пара двуокисью углерода для БД HITRAN, GEISA и расчета VoTe

Воронин Б.А. (vba@iao.ru)

Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, пл. Ак. Зюева 1, 634055 Томск, Россия

Спектроскопия является важным методом дистанционного измерения содержания H_2^{16}O в атмосферах планет с исходной спектроскопической информацией из баз данных HITRAN, GEISA и др., адаптированных для исследований атмосферы Земли. В отличие от Земли, атмосферы Марса и Венеры состоят в основном из углекислого газа с содержанием CO_2 около 95–96%. По этой причине использовались расчеты и оценки уширения CO_2 . Данные были оценены теоретически в рамках двух методов: полуэмпирического подхода [1] и метода усредненных энергетических разностей [2]. Для больших значений квантовых чисел использовались различные экстраполяционные модели.

В файлах HITRAN и GEISA содержатся частота, интенсивность, квантовая идентификация колебания-вращения и другие параметры. Мы изменили в БД коэффициент уширения воздуха на $\gamma(\text{H}_2^{16}\text{O}-\text{CO}_2/\text{HD}^{16}\text{O}-\text{CO}_2)$ в $\text{cm}^{-1}/\text{атм.}$, коэффициент температурной зависимости $\gamma(\text{H}_2^{16}\text{O}-\text{air})$ на $\gamma(\text{H}_2^{16}\text{O}-\text{CO}_2/\text{HD}^{16}\text{O}-\text{CO}_2)$, для чего были использованы результаты из наших предыдущих исследований [3, 4]. Также были рассчитаны $\gamma(\text{H}_2^{16}\text{O}-\text{воздух})$ и $\gamma(\text{H}_2^{16}\text{O}-\text{CO}_2)$ для нового списка линий H_2^{16}O -VoTe для 300 К [5].

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (грант № 17-52-16022).

1. Bykov A., N. Lavrentieva, L.N. Sinitsa. Semiempiric approach for the line broadening and shifting calculation // Mol. Phys. 2004. V. 102. P. 1653–1658.
2. Dudaryonok A., N. Lavrentieva, Q. Ma. The average energy difference method for calculation of line broadening of asymmetric tops // Atm. Oceanic Optics. 2015. V. 28, No 6. P. 403–409.
3. Lavrentieva N., B. Voronin, A. Fedorova. H_2^{16}O line list for the study of atmospheres of Venus and Mars // Optika i Spektroskopiya. 2015. V. 118, No 1. P. 13–20.
4. Lavrentieva N., B. Voronin, O. Naumenko et al. Linelist of HD^{16}O for study of atmosphere of terrestrial planets (Earth, Venus and Mars) // Icarus. 2014. V. 236. P. 38–47.
5. Voronin B.A., J. Tennyson, L. Lodi. The VoTe room temperature H_2^{16}O line list up to 25000 cm^{-1} // Proc. SPIE. V. 10833. P. 108330H-1–108330H-8, doi: 10.1117/12.2504466.

Estimation of H₂O line broadening induced by CO₂ for HITRAN, GEISA and VoTe databases

B.A. Voronin (vba@iao.ru)

V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics SB RAS, 1 Ac. Zuev sq., 634021 Tomsk, Russia

Spectroscopy is an important method of remote measurement of H₂¹⁶O content in planetary atmospheres with initial spectroscopic information from the HITRAN, GEISA, et al., databases adapted for studies at atmosphere of Earth. Unlike the Earth, the atmospheres of Mars and Venus mainly consist of carbon dioxide with a CO₂ content of about ~ 95–96%. Because of this reasons used our calculation and estimations of CO₂ broadening. The data have been evaluated theoretically in the frame of two methods: semi-empirical approach [1] and averaged energy differences method [2].

At HITRAN and GIESA files contains the frequency (cm⁻¹), intensity (cm/molecule), vibration–rotation quantum identification and others. We changed the air-broadening coefficient on $\gamma(\text{H}_2^{16}\text{O}-\text{CO}_2/\text{HD}^{16}\text{O}-\text{CO}_2)$ in cm⁻¹/atm, and the temperature dependence coefficient of $\gamma(\text{H}_2^{16}\text{O}-\text{air})$ on $\gamma(\text{H}_2^{16}\text{O}-\text{CO}_2/\text{HD}^{16}\text{O}-\text{CO}_2)$ used results from studies [3, 4]. Also was calculated $\gamma(\text{H}_2^{16}\text{O}-\text{air})$ and $\gamma(\text{H}_2^{16}\text{O}-\text{CO}_2)$ for new linelist of H₂¹⁶O - VoTe [5] for 300K.

The work partly was supported by the Russian Foundation for Basic Research (Grants No. 17-52-16022).

1. Bykov A., N. Lavrentieva, L.N. Sinitsa. Semiempiric approach for the line broadening and shifting calculation // *Mol. Phys.* 2004. V. 102. P. 1653–1658.
2. Dudaryonok A., N. Lavrentieva, Q. Ma. The average energy difference method for calculation of line broadening of asymmetric tops // *Atm. Oceanic Optics.* 2015. V. 28, No 6. P. 403–409.
3. Lavrentieva N., B. Voronin, A. Fedorova. H₂¹⁶O line list for the study of atmospheres of Venus and Mars // *Optika i Spektroskopiya.* 2015. V. 118, No 1. P. 13–20.
4. Lavrentieva N., B. Voronin, O. Naumenko et al. Linelist of HD¹⁶O for study of atmosphere of terrestrial planets (Earth, Venus and Mars) // *Icarus.* 2014. V. 236. P. 38–47.
5. Voronin B.A., J.Tennyson, L. Lodi. The VoTe room temperature H₂¹⁶O line list up to 25000 cm⁻¹ // *Proc. SPIE.* V. 10833. P. 108330H-1–108330H-8, doi: 10.1117/12.2504466.

Расчеты коэффициентов уширения линий диоксида кремния давлением диоксида углерода

Воронин Б.А. (vba@iao.ru), Дударёнок А.С., Лаврентьева Н.Н.

Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, пл. Ак. Зюева 1, 634055 Томск, Россия

Вычислены коэффициенты уширения линий молекулы SO₂ давлением углекислого газа при комнатной температуре. Данные были получены теоретически с использованием двух методов: полуэмпирического подхода [1] и метода средних частот [2]. Полуэмпирический метод основывается на полуклассическом подходе и включает в себя корректирующий фактор, параметры которого определяются подгонкой к экспериментальным полуширинам линий. Метод средних частот основывается на сопоставлении средней частоты столкновительных переходов со значением полуширины линии. Используемые подходы позволяют получать коэффициенты уширения линий молекул типа асимметричного волчка с точностью, близкой к современным расчетным и экспериментальным методам. Основной вклад в уширение линий оксида серы дает диполь-квадрупольное взаимодействие. Также учтены квадруполь-квадрупольный и поляризационный (как индукционный, так и дисперсионный) члены межмолекулярного потенциала. Оценена зависимость коэффициентов уширения от колебательных и вращательных квантовых чисел [3]. Проведено сравнение полученных в работе результатов с литературными данными. Сгенерированный обширный список параметров контура линий может быть полезен для атмосферных, астрофизических приложений и спектроскопических баз данных.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (грант № 17-52-16022).

1. Bykov A.D., N.N. Lavrentieva, L.N.Sinita. Semiempiric approach for the line broadening and shifting calculation // *Mol. Phys.* 2004. V. 102. P. 1653–1658.
2. Dudaryonok A.S., N.N. Lavrentieva, Q. Ma. The average energy difference method for calculation of line broadening of asymmetric tops // *Atm. Oceanic Optics*. 2015. V. 28, No 6. P. 403–409.
3. B.A.Voronin, S.S.Voronina, N.N. Lavrentieva et al. Estimation of carbon dioxide broadening and self-broadening coefficients of SO₂ lines // *Proc. SPIE*. 2018. V. 10833. P. 108330G-1–108330G-5, doi: 10.1117/12.2504465.

Calculation of sulfur dioxide line broadening induced by carbon dioxide

B.A. Voronin (vba@iao.ru), A.S. Dudaryonok, N.N. Lavrentieva
V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics SB RAS, 1 Ac. Zuev sq., 634055 Tomsk, Russia

Carbon dioxide-broadened line widths of SO₂ molecules are obtained at the room temperature. The data have been calculated in the frame of two methods: semi-empirical approach [1] and averaged energy difference method [2]. The semi-empirical method is based on the semi-classical impact theory and includes the correction factors whose parameters can be determined by fitting the experimental broadening coefficients. The averaged energy difference method is based on matching the coupled energy state difference with a line broadening value. These approaches make it possible to obtain line widths for molecules of the type of asymmetric tops with an accuracy close to that of the modern theoretical and experimental methods. The main contribution to the sulfur dioxide line-broadening coefficients is given by the dipole-quadrupole interaction. We also take into account the quadrupole-quadrupole and polarization (both induction and dispersion) terms of intermolecular potential. The dependences of the broadening coefficients on vibrational and rotational quantum numbers are evaluated [3]. Computed line widths are compared with published data. The generated extensive line list can be useful for atmospheric, astrophysical applications and spectroscopic databases.

The work was partly supported by the Russian Foundation for Basic Research (Grants No. 17-52-16022).

1. Bykov A.D., N.N. Lavrentieva, L.N.Sinita. Semiempiric approach for the line broadening and shifting calculation // *Mol. Phys.* 2004. V. 102. P. 1653–1658.
2. Dudaryonok A.S., N.N. Lavrentieva, Q. Ma. The average energy difference method for calculation of line broadening of asymmetric tops // *Atm. Oceanic Optics*. 2015. V. 28, No 6. P. 403–409.
3. B.A.Voronin, S.S.Voronina, N.N. Lavrentieva et al. Estimation of carbon dioxide broadening and self-broadening coefficients of SO₂ lines // *Proc. SPIE*. 2018. V. 10833. P. 108330G-1–108330G-5, doi: 10.1117/12.2504465.

Систематизация графической информации по проблеме континуального поглощения и свойствам молекулярных комплексов

Лаврентьев Н.А. (lnick@iao.ru), Родимова О.Б., Фазлиев А.З.
Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, пл. Ак. Зуева 1, 634055 Томск, Россия

Анализ опубликованной спектроскопической информации показывает, что основными формами ее представления являются текстовая, табличная и графическая. Пропорции этих представлений различны для разных областей спектроскопии. Эта работа посвящена двум таким областям: поглощению континуума и свойствам слабосвязанных молекулярных комплексов. Для этих доменов представление информации используется более широко, чем табличное.

Настоящий доклад посвящен проблемам систематизации участков спектральных функций, уточняющих свойства графического континуального поглощения и атмосферных молекулярных комплексов. Эти свойства описываются спектральными функциями, приведенными на рисунках в публикациях по проблеме континуального поглощения и спектроскопии слабосвязанных молекулярных комплексов. Описана систематизация научных графиков, являющихся частью системы GrafOnto на портале W@DIS [1–3]. Основное внимание в работе уделяется анализу приведенных кривых на составных графиках.

Выделены основные первичные и цитированные графики для вышеупомянутых областей спектроскопии. Приведены статистические данные для молекул, смесей и слабосвязанных молекулярных комплексов, спектральных функций и их аргументов, а также примеры работы с элементарными и составными графиками и составных рисунками.

1. Akhlyostin A., Z. Apanovich, et al. The current status of the W@DIS information system // Proc. SPIE of 22nd Int. Symp. Atmos. and Ocean Optics: Atmos. Physics. 2016. V. 10035. 100350D.
2. Lavrentiev N.A., O.B. Rodimova, A.Z. Fazliev. Systematization of graphically plotted published spectral functions of weakly bound water complexes // Proc. SPIE of 22nd Int. Symp. Atmos. and Ocean Optics: Atmos. Physics. 2016. V. 10035. 100350C. Doi: 10.1117/12.2249159.
3. Lavrentiev N.A., O.B. Rodimova, A.Z. Fazliev, A.A. Vigasin. Systematization of published research graphics characterizing weakly bound molecular complexes with carbon dioxide // Proc. of 23rd Int. Symp. Atmos. and Ocean Optics: Atmos. Physics. 2017. V. 10466. 104660E. Doi: 10.1117/12.2289932.

Systematization of graphical information on the continuum absorption problem and the properties of molecular complexes

N.A. Lavrentiev (lnick@iao.ru), O.B. Rodimova, A.Z. Fazliev
V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics SB RAS, 1 Ac. Zuev sq., 634055 Tomsk, Russia

The analyse of published spectroscopic information shows that the main forms of its' representation are text, tabular and graphic. Proportions of these representations differ for various spectroscopy domains. This work is dedicated to two such domains: the continuum absorption and properties of weakly bound molecular complexes. For these domains the graphic information representation is used more widely than the tabular one.

The present report focuses on the problems of plots systematization of spectral functions, specifying the properties of continuum absorption and atmospheric molecular complexes. These properties are described by the spectral functions, depicted on figures in publications. They are a part of the GrafOnto system in the W@DIS portal [1–3]. The systematization of scientific plots is described. The main focus of the paper is the analysis of cited curves in composite plots. The primary cited plots for the aforementioned spectroscopy domains are emphasized. The statistics for substances, spectral functions and their arguments and the numbers of primitive and composite plots and composite figures are given.

1. Akhlyostin A., Z. Apanovich, et al. The current status of the W@DIS information system // Proc. SPIE of 22nd Int. Symp. Atmos. and Ocean Optics: Atmos. Physics. 2016. V. 10035. 100350D.
2. Lavrentiev N.A., O.B. Rodimova, A.Z. Fazliev. Systematization of graphically plotted published spectral functions of weakly bound water complexes // Proc. SPIE of 22nd Int. Symp. Atmos. and Ocean Optics: Atmos. Physics. 2016. V. 10035. 100350C. Doi: 10.1117/12.2249159.
3. Lavrentiev N.A., O.B. Rodimova, A.Z. Fazliev, A.A. Vigasin. Systematization of published research graphics characterizing weakly bound molecular complexes with carbon dioxide // Proc. of 23rd Int. Symp. Atmos. and Ocean Optics: Atmos. Physics. 2017. V. 10466. 104660E. Doi: 10.1117/12.2289932.

Исследование самоуширения линий молекулы CH₃I

Дударёнок А.С.¹ (dudaryon@iao.ru), Лаврентьева Н.Н.¹, Троицына Л.², Булдырева Ж.²,
Филиппов Н.Н.³

¹Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, пл. Ак. Зуева 1, 634021 Томск, Россия

²Университет Бургундия-Франш-Конте, Франция

³Санкт-Петербургский государственный университет, Университетская наб. 7/9, 199034 Санкт-Петербург, Россия

Исследования параметров контура линий йодметана (CH₃I) важны для физики атмосферы и астрофизики. Данная молекула оказывает значительное влияние на природный и атмосферный йод [1–3]: она является источником атомов йода, потенциальных разрушителей озона в земной атмосфере. Йодметан найден в атмосфере Марса [4]. Для атмосферного мониторинга данной молекулы требуются точные спектроскопические данные о коэффициентах уширения линии давлением основными составляющими атмосферы

(азотом и кислородом), а также самим йодметаном вместе с их температурными зависимостями.

В работе проведены вычисления коэффициентов самоуширения линий CH_3I полос перпендикулярного типа (ветви ^RP , ^PP , ^RQ , ^PQ , ^RR и ^PR). Вращательные квантовые числа имеют широкий диапазон: $0 \leq J \leq 70$, $0 \leq K \leq 20$. Исследуемый температурный интервал: 200–400 К. Вычисления выполнены двумя методами: полуэмпирическим методом [5], основанным на ударной полуклассической теории уширения и использующим эмпирический скорректированный поправочный коэффициент для функции эффективности и полуклассическим методом с точными классическими траекториями с добавлением близкодействующей части потенциала [6]. Сделаны сравнения расчетов с имеющимися в литературе данными.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ (грант № 17-52-16022, 19-03-00830), а также международного научного объединения LIA SAMIA «Spectroscopie d’Absorption de Molécules d’Intérêt Atmosphérique et planétologique: de l’innovation instrumentale à la modélisation globales et aux bases de données».

1. Barrie L.A., Bottenheim J.W., Hart W.R. Lower tropospheric measurements of halogens, nitrates, and sulphur oxides during polar sunrise experiment 1992 // *J. Geophys. Res.* 1994. V. 99. P. 25–313.
2. Zafiriou OC. Photochemistry of halogens in the marine atmosphere // *J. Geophys. Res.* 1974. V. 79, No 18. P. 2730–2732.
3. Boughdiri A., Manceron L., Maaroufi N. et al. Measurements of line intensities for some lines of methyl iodide in the ν_5 and $\nu_3+\nu_6$ bands // *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer.* 2018. V. 221. P. 147–154.
4. Horn D., McAfee J.M., Winer A.M. et al. The composition of the Martian atmosphere: Minor constituents // *Icarus.* 1972. V. 16. P. 543–556.
5. Bykov A.D., Lavrentieva N.N., Sinitsa L.N. Semi-empiric approach for the line broadening and shifting calculation // *Mol. Phys.* 2004. V. 102. P. 1653–1658.
6. Buldyreva J., Nguyen L. Extension of the exact trajectory model to the case of asymmetric tops and its application to infrared nitrogen-broadened linewidths of ethylene // *Phys. Rev.* 2008. V. A 77. 042720.

Investigation of CH_3I self-broadening

A.S. Dudaryonok¹ (dudaryon@iao.ru), N.N. Lavrentieva¹, L. Troitsyna², J. Buldyreva²,
N.N. Filippov³

¹V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics SB RAS, 1 Ak. Zuev sq., 634055 Tomsk, Russia

²Institut UTINAM, UMR CNRS 6213, Université Bourgogne Franche-Comté, 16 Route de Gray, 25030
Besançon cedex, France

³Saint-Petersburg State University, 7/9 Universitetskaya nab., 199034 Saint-Petersburg, Russia

Methyl iodine (CH_3I) plays an important role in the study of terrestrial and planetary atmospheres. This molecule has a significant impact on the natural and atmospheric iodine [1–3]: it is a source of iodine atoms that are a potential destroyer of ozone in the terrestrial atmosphere. Methyl iodine was found in the Martian atmosphere [4]. Remote sensing and radiative transfer modeling require therefore a precise knowledge of line-shape parameters broadening coefficients by the main atmospheric perturber N_2 as well as CH_3I , together with their temperature dependences.

We report calculated CH_3I self-broadening coefficients and associated temperature-dependence parameters in the perpendicular ν_6 band (^RP , ^PP , ^RQ , ^PQ , ^RR and ^PR sub-branches). Rotational quantum numbers vary in ranges $0 \leq J \leq 70$, $K \leq 20$. The temperature interval of 200–400 K is considered. These calculations were performed by two approaches: a semi-empirical method [5] based on the semi-classical impact theory and modified via correction factors to account for the real trajectory curvature, vibrational dependence and realistic scattering matrix and semi-classical approach with exact trajectories added with the atom-atomic potential [6]. Comparisons of calculations and measurements with other data available in the literature are presented and discussed.

This work has been supported by the RFBR (Russian Foundation for Basic Research) under grant numbers 17-52-16022, 19-03-00830 and by the LIA SAMIA (Laboratoire International Associé “Spectroscopie d’Absorption de Molécules d’Intérêt Atmosphérique et planétologique: de l’innovation instrumentale à la modélisation globales et aux bases de données”).

1. Barrie L.A., Bottenheim J.W., Hart W.R. Lower tropospheric measurements of halogens, nitrates, and sulphur oxides during polar sunrise experiment 1992 // J. Geophys. Res. 1994. V. 99. P. 25–313.
2. Zafiriou OC. Photochemistry of halogens in the marine atmosphere // J. Geophys. Res. 1974. V. 79, No 18. P. 2730–2732.
3. Boughdiri A., Manceron L., Maaroufi N. et al. Measurements of line intensities for some lines of methyl iodide in the ν_5 and $\nu_3+\nu_6$ bands // J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer. 2018. V. 221. P. 147–154.
4. Horn D., McAfee J.M., Winer A.M. et al. The composition of the Martian atmosphere: Minor constituents // Icarus. 1972. V. 16. P. 543–556.
5. Bykov A.D., Lavrentieva N.N., Sinitsa L.N. Semi-empiric approach for the line broadening and shifting calculation // Mol. Phys. 2004. V. 102. P. 1653–1658.
6. Buldyreva J., Nguyen L. Extension of the exact trajectory model to the case of asymmetric tops and its application to infrared nitrogen-broadened linewidths of ethylene // Phys. Rev. 2008. V. A 77. 042720.

Коэффициенты уширения линий OCS и H₂S давлением углекислого газа

Дударёнок А.С. (dudaryon@iao.ru), Лаврентьева Н.Н.

Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, пл. Ак. Зуева 1, 634021 Томск, Россия

Исследования уширения линий карбонил сульфида и сероводорода давлением углекислого газа важны при изучении атмосфер Марса и Венеры [1, 2]. В работе проведены вычисления полуширин линий OCS и H₂S и их температурных показателей в случае уширения углекислым газом для большого числа вращательных квантовых чисел. Исследуемый температурный интервал: 200–400 К. В работе применялся полуэмпирический метод [3], основанный на ударной полуклассической теории уширения и использующий скорректированный поправочный коэффициент, параметры которого находятся из сравнения с экспериментальными данными. В расчеты уширения линий включены электростатические диполь-квадрупольные и квадруполь-квадрупольные взаимодействия, а также индукционные и дисперсионные взаимодействия. В случае молекулы карбонил сульфида необходимые при вычислениях внутренней структуры энергетических уровней поглощающей молекулы спектроскопические постоянные для основного состояния ($B = 0.202856 \text{ cm}^{-1}$, $D = 4.341 \cdot 10^{-8} \text{ cm}^{-1}$) и для первого возбужденного колебательного состояния $\nu_1 = 1$ ($B = 0.202251 \text{ cm}^{-1}$, $D = 4.341 \cdot 10^{-8} \text{ cm}^{-1}$) были взяты из [4]. Используемые нами входные параметры – дипольный момент $\mu = 0.715 \text{ Д}$ (основное состояние), $\mu = 0.694 \text{ Д}$ ($\nu_1=1$) [5], квадрупольный момент $Q = 0.786 \text{ Д } \text{\AA}$ [6]. Параметры молекул сероводорода взяты из [7, 8]. Сделаны сравнения расчетов с имеющимися в литературе данными.

Работа выполнена при поддержке гранта Российский научный фонд (грант № 17-12-01204).

1. Horn D., McAfee J.M., Winer A.M. et al. The composition of the Martian atmosphere: Minor constituents // Icarus. 1972. V. 16. P. 543–556.
2. Wilquet V., Mahieux A., Vandaele A.C. et al. Line parameters for the 01111–00001 band of $^{12}\text{C}^{16}\text{O}^{18}\text{O}$ from SOIR measurements of the Venus atmosphere // J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer. 2008. V. 109. P. 895–905.
3. Bykov A.D., Lavrentieva N.N., Sinitsa L.N. Semi-empiric approach for the line broadening and shifting calculation // Mol. Phys. 2004. V. 102. P. 1653–1658.
4. Belafhal A., Fayt A., Guelachvili G. Fourier Transform Spectroscopy of Carbonyl Sulfide from 1800 to 3120 cm^{-1} : The Normal Species // J. Mol. Spectrosc. 1995. V. 174. P. 1–19.
5. Masudiki L.S., Lahaye J.G., Fayt A. Intracavity CO laser Stark spectroscopy of the ν_3 band of carbonyl sulfide // J. Mol. Spectrosc. 1991. V. 148. P. 281–302.
6. De Leeuw F.H., Dymanus A. Electric and magnetic properties of OCS measured by molecular-beam electric-resonance spectroscopy // Chem. Phys. Lett. 1970. V. 7. P. 288–292.
7. Belov S.P., Yamada K.M.T., Winniewisser G. et al. Rotational Spectrum of H₂S // J. Mol. Spectrosc. 1995. V. P. 380–390.
8. Azzam A.A.A., Lodi L., Yurchenko S., Tennyson J. The dipole moment surface for hydrogen sulfide H₂S // J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer. 2015. V. 161. P. 41–49.

CO₂-broadening coefficients of OCS and H₂S lines

A.S. Dudaryonok (dudaryon@iao.ru), N.N. Lavrentieva

V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics SB RAS, 1 Ak. Zuev sq., 634055 Tomsk, Russia

Studies of the broadening coefficients of carbonyl sulfide and hydrogen sulfide lines induced by carbon dioxide pressure are important for investigations of the Mars and Venus atmospheres [1, 2]. We report calculated OCS and H₂S line broadening coefficients induced by carbon dioxide as well as associated temperature-dependence parameters for a large range of rotational quantum numbers. The temperature range of 200–400 K was considered. In the work we applied the semi-empirical method [3] based on the semi-classical impact theory introducing additional parameters determined by fitting to experimental data. The electrostatic dipole-quadrupole, quadrupole-quadrupole interactions as well as induction and dispersion interactions are included in computations. In the case of the carbonyl sulfide molecule, the spectroscopic constants for the ground state ($B = 0.202856 \text{ cm}^{-1}$, $D = 4.341 \cdot 10^{-8} \text{ cm}^{-1}$) and $v_1 = 1$ for the first excited vibrational state ($B = 0.202251 \text{ cm}^{-1}$, $D = 4.341 \cdot 10^{-8} \text{ cm}^{-1}$) were taken from [4]; the dipole moment $\mu = 0.715 \text{ D}$ (ground state), $\mu = 0.694 \text{ D}$ ($v_1 = 1$) were from [5], the quadrupole moment $Q = 0.786 \text{ D Å}$ were from [6]. The spectroscopic parameters of hydrogen sulfide were taken from [7, 8]. Comparisons of calculations with literature data are presented.

The work was supported by the Russian Science Foundation (Grants No. 17-12-01204).

1. Horn D., McAfee J.M., Winer A.M. et al. The composition of the Martian atmosphere: Minor constituents // *Icarus*. 1972. V. 16. P. 543–556.
2. Wilquet V., Mahieux A., Vandaele A.C. et al. Line parameters for the 01111–00001 band of ¹²C¹⁶O¹⁸O from SOIR measurements of the Venus atmosphere // *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*. 2008. V. 109. P. 895–905.
3. Bykov A.D., Lavrentieva N.N., Sinitsa L.N. Semi-empiric approach for the line broadening and shifting calculation // *Mol. Phys.* 2004. V. 102. P. 1653–1658.
4. Belafhal A., Fayt A., Guelachvili G. Fourier Transform Spectroscopy of Carbonyl Sulfide from 1800 to 3120 cm⁻¹: The Normal Species // *J. Mol. Spectrosc.* 1995. V. 174. P. 1–19.
5. Masudiki L.S., Lahaye J.G., Fayt A. Intracavity CO laser Stark spectroscopy of the v_3 band of carbonyl sulfide // *J. Mol. Spectrosc.* 1991. V. 148. P. 281–302.
6. De Leeuw F.H., Dymanus A. Electric and magnetic properties of OCS measured by molecular-beam electric-resonance spectroscopy // *Chem. Phys. Lett.* 1970. V. 7. P. 288–292.
7. Belov S.P., Yamada K.M.T., Winniewisser G. et al. Rotational Spectrum of H₂S // *J. Mol. Spectrosc.* 1995. V. P. 380–390.
8. Azzam A.A.A., Lodi L., Yurchenko S., Tennyson J. The dipole moment surface for hydrogen sulfide H₂S // *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*. 2015. V. 161. P. 41–49.

Численная модель случайного поля оптической толщины слоистой облачности

Пригарин С.М.^{1,2} (sergeim.prigarin@gmail.com), Ян Ч.²

¹Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, пр. Ак. Лаврентьева 6, 630090 Новосибирск, Россия

²Новосибирский государственный университет, ул. Пирогова 2, 630090 Новосибирск, Россия

Разработана численная пространственная модель поля оптической толщины слоистой облачности, которая позволяет воспроизводить требуемые корреляционные функции и одномерные распределения. Численная модель основана на методе нелинейных преобразований гауссовских случайных функций [1]. Однородные гауссовские поля моделировались по схеме скользящего суммирования. Коэффициенты скользящего суммирования вычислялись по спектру случайного поля методом, предложенным в [2]. Модель настраивалась по данным измерений оптической толщины Arctic Stratus из [3]. Как показали вычислительные эксперименты, разработанная модель хорошо воспроизводит характеристики наблюдаемых случайных полей оптической толщины облачности.

1. Пригарин С.М. Методы численного моделирования случайных процессов и полей. Новосибирск: ИВМиМГ СО РАН. 2005.

2. Товстик Т.М. Моделирование однородного гауссовского поля // Тр. X Всесоюз. симп. “Моделирование представление и аппаратный анализ случайных процессов и полей”. Секция IV. – Л., 1978. С. 75–77.
3. Schäfer M., Bierwirth E., Ehrlich A. et al. Directional horizontal inhomogeneities of cloud optical thickness fields retrieved from ground-based and airborne spectral imaging // Atmos. Chem. Phys. 2017. V. 17. P. 2359–2372.

A numerical model for stratus optical thickness stochastic fields

S.M. Prigarin^{1,2} (sergeim.prigarin@gmail.com), Zh. Yang²

¹*Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS, 6 Lavrentyeva pr., 630090 Novosibirsk, Russia*

²*Novosibirsk State University, 2 Pirogova str., 630090 Novosibirsk, Russia*

To simulate random fields of the optical thickness for a stratus cloud, we have developed a numerical 2D model that reproduces correlation functions and one-dimensional distributions. The proposed numerical model is based on nonlinear transformations of Gaussian fields [1]. We use a moving average scheme to simulate homogeneous Gaussian random fields. To find the moving average coefficients, we have applied a method based on the spectrum computation, see [2]. The model developed was tuned by measurements of optical thickness for the Arctic Stratus [3]. According to the simulation results, the model presented can reproduce properties of the observed optical thickness fields with a high accuracy.

1. Ogorodnikov V.A, Prigarin S.M. Numerical Modelling of Random Processes and Fields: Algorithms and Applications. VSP, Utrecht, the Netherlands, 1996.
2. Tovstik T. M. Simulation of homogeneous Gaussian field // Proc. Symp. "Methods of Representation and Apparature Analysis of Random Processes and Fields". Leningrad. 1978. P. 75–77 (in Russian)
3. Schäfer M., Bierwirth E., Ehrlich A. et al. Directional horizontal inhomogeneities of cloud optical thickness fields retrieved from ground-based and airborne spectral imaging // Atmos. Chem. Phys. 2017. V. 17. P. 2359–2372.

СЕКЦИЯ 4. "ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ РАДИАЦИИ с ОБЛАКАМИ и АЭРОЗОЛЕМ"

Председатель: проф. Г.И. Горчаков (ИФА РАН, Москва, Россия)

Сопредседатели: д.ф.-м.н. А.Г. Петрушин (ИАТЕ, Обнинск, Россия), проф. Е.Ф. Михайлов (СПбГУ, СПб, Россия), Prof. P.W. Menzel (University of Wisconsin, USA)

SESSION 4. "RADIATION-CLOUD and RADIATION-AEROSOL INTERACTIONS"

Chairman: Prof. G.I. Gorchakov (IAP RAS, Moscow, Russia)

Co-chairmen: Prof. A.G. Petrushin (SPA "Typhoon", Obninsk, Russia), Prof. E.F. Mikhailov (SPbSU, SPb, Russia), Prof. P.W. Menzel (University of Wisconsin, USA)

Тонкодисперсный аэрозоль в эпоху потепления климата: тенденции, диагноз и прогноз, экстремальные события, радиационные эффекты, влияние на здоровье населения

Горчаков Г.И.¹ (gengor@ifaran.ru), Ситнов С.А.¹, Семутникова Е.Г.², Карпов А.В.¹,
Лезина Е.А.³, Гушин Р.А.^{1,4}, Даценко О.И.^{1,4}

¹Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Пыжевский пер. 3, 119017 Москва, Россия

²Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, физ. факультет, Ленинские горы 1,
119992 Москва, Россия

³Мосэкомониторинг, Новый Арбат 11, стр. 1, Москва, Россия

⁴МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, Россия

В середине XXI века глобальное потепление может составить 1.5° С, а в конце века 2° С, что, по-видимому, приведет к беспрецедентным изменениям в окружающей среде и в жизни общества [1], включая повышение уровня моря, резкую изменчивость погоды, необратимые изменения некоторых экосистем. Прогнозируется повышение пожароопасности в бореальных лесах и, как следствие, концентрации тонкодисперсного дымового аэрозоля [2]. В настоящее время Всемирная Организация Здравоохранения основным загрязнителем атмосферного воздуха считает тонкодисперсный аэрозоль, который совместно с газовыми примесями (озон, угарный газ, диоксид азота, сернистый газ и др.) и волнами тепла [3] приводит к увеличению смертности населения порядка 10 млн. в год.

Исследования тонкодисперсного или субмикронного атмосферного аэрозоля в Институте физики атмосферы выполняются более 60 лет. Мониторинг массовой концентрации тонкодисперсного аэрозоля M , которая близка к $PM_{2.5}$, осуществляется с 1985 г. [4]. Результаты мониторинга свидетельствуют о постепенном снижении уровня аэрозольного загрязнения атмосферы на европейской территории России. В связи с потеплением климата увеличивается вероятность крупномасштабных задымлений Северной Евразии и Северной Америки. Примером крупномасштабного задымления Северной Евразии может служить распространение в 2016 г. сибирской дымной мглы на территорию с площадью больше 16 млн км² [5]. На территории ряда стран часто образуются смоги: антропогенные, фотохимические и др. В частности, смоги регулярно возникают на Северной Китайской Равнине [5].

Дымная мгла и смоги радикально трансформируют радиационный режим атмосферы на больших территориях, которые можно охарактеризовать величиной аэрозольного радиационного форсинга на верхней и нижней границах атмосферы [5, 6]. Проанализированы пространственные и временные вариации аэрозольного радиационного форсинга над Евразией в июле 2016 г.

1. IPCC. Special Report «Global Warming of 1.5°C». 2018.

2. Ford B. et al. Future Fire Impacts on Smoke: Concentrations, Visibility and Health in Contiguous United States // GeoHealth. 2018. V. 2. P. 1–20.

3. Shaposhnikov D. et al. Mortality Related to Air Pollution with the Moscow Heat Wave and Wildfire of 2010 // Epidemiology. 2014. V. 25, No 3. P. 359–364.

4. Горчаков Г.И., Емиленко А.С., Копейкин В.М. и др. Академик А.М. Обухов и развитие исследований аэрозольного загрязнения воздушных бассейнов регионов и городов: Кисловодск-Москва-Пекин. Турбулентность, динамика атмосферы и климата. Москва: Физматкнига. 2018. С. 50–54.

5. Горчаков Г.И., Голицын Г.С., Ситнов С.А. и др. Крупномасштабные дымки Евразии в июле 2016 г. // Доклады академии наук. 2018. Т. 482. №2.
6. Gorchakov G.I., Sitnov S.A., Karpov A.V., et al. Large-scale hazes over Eurasia in July 2016: Siberian smoke haze evolution. IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 2019. V.231. 012019.

Fine aerosol in modern climate warming epoch: tendencies, diagnosis and prognosis, extreme events, radiative impact, influence on human health

G.I. Gorchakov¹ (gengor@ifaran.ru), S.A. Sitnov¹, E.G. Semoutnikova², A.V. Karpov¹,
E.A. Lezina³, R.A. Gushchin^{1,4}, O.I. Datsenko^{1,4}

¹A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics RAS, 3 Pyzhevsky pr., 119017 Moscow, Russia

²M.V. Lomonosov Moscow State University, Physics Faculty, 1 Leninsky gory, 119992 Moscow, Russia

³Mosecomonitoring, 11 New Arbat, Moscow, Russia

⁴MIREA – Russian Technological University, Moscow, Russia

Climate global warming may be as much as 1.5°C in the middle XXI century and 2.0°C at the end of this century that can bring to unprecedented modification in the environment and human activity [1] including sea-level rise, weather sharp variations, heat wave frequency and intensity enhancement, irreversible changes of some ecosystem. The rise in wildfires is prognosed, an increase of fine aerosol concentration in the atmosphere is predicted [2]. Now-days WMO takes care of the fine aerosol as the key harmful impurity of the atmospheric air which leads to mortality elevation approximately 10 mln/year in conjunction with gas impurities (ozone, carbon monoxide, nitrogen dioxide, sulfur dioxide) and heat waves [3].

Fine (submicron) aerosol investigations are carried out in A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics more than 60 years. The monitoring of submicron aerosol mass concentration M (which is close to PM_{2.5}) is realized from 1985 [4]. Monitoring results points to progressive reducing of aerosol air pollution at European part of Russia. Because of global climate warming, the probability of the large-scale hazes over Northern Eurasia and Northern America is risen. As an example of large scale haze over Northern Eurasia is considered Siberian smoke haze spreading in 2016 [5]. In some countries are frequently observed heavy smogs (anthropogenic, photochemical). Specifically, smogs are frequently occurred at Northern China Plain [5].

Smoke hazes and smogs transform drastically radiative regime of the atmosphere over large areas. Variations of atmospheric radiative regime are characterized by the aerosol radiative forcing at the top and the bottom of the atmosphere. Spatial and temporal aerosol radiative forcing variations over Eurasia in July 2016 are analyzed [5, 6].

1. IPCC. Special Report «Global Warming of 1.5°C». 2018.
2. Ford B. et al. Future Fire Impacts on Smoke: Concentrations, Visibility and Health in Contiguous United States // GeoHealth. 2018. V. 2. P. 1–20.
3. Shaposhnikov D. et al. Mortality Related to Air Pollution with the Moscow Heat Wave and Wildfire of 2010 // Epidemiology. 2014. V. 25, No 3. P. 359–364.
4. Gorchakov G.I., Emilenko A.S., Kopeikin V.M. et al. Academician A.M. Obukhov and aerosol air urban pollution in investigation development: Kislovodsk-Moscow-Beijing // Turbulence, atmosphere and climate dynamics. Moscow: Fizmatkniga. 2018. P. 50–54. (in Russian)
5. Gorchakov G.I., Golitsyn G.S., Sitnov S.A. et al. Large-Scale Haze over Eurasia in July 2016 // Doklady Earth Sciences. 2018. V. 482, No 1. P. 1212–1215.
6. Gorchakov G.I., Sitnov S.A., Karpov A.V. et al. Large-scale hazes over Eurasia in July 2016: Siberian smoke haze evolution // IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 2019. V.231. 012019.

Крупномасштабные дымки Евразии

Горчаков Г.И.¹ (gengor@ifaran.ru), Ситнов С.А.¹, Карпов А.В.¹, Копейкин В.М.¹,
Горчакова И.А.¹, Гушин Р.А.^{1,2}, Даценко О.И.^{1,2}, Пономарева Т.Я.³, Текарев Р.Р.⁴

¹Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Пыжевский пер. 3, 119017 Москва, Россия

²МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, Россия

³Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации, Б. Предтеченский пер. 11-13, 123242 Москва, Россия

⁴Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, физ. факультет, Ленинские горы 1, 119991 Москва, Россия

Значительные неопределенности радиационного режима над Евразией обусловлены спорадическими крупномасштабными дымками (дымная мгла, смоги, пыльная мгла) [1–4]. В частности, в июле 2016 г. наблюдалась уникальная по масштабам сибирская дымная мгла [1, 2]. Оценены пространственные масштабы, полная масса аэрозоля и содержание черного углерода в частицах крупномасштабных дымок, возникающих на территории России при пожарах в бореальных лесах. Содержание черного углерода определялось по данным измерений в приземном слое атмосферы и по данным мониторинга альбеда однократного рассеяния на станциях AERONET.

Проанализирована эволюция сибирской дымной мглы в июле 2016 г. Разработана методика определения горизонтальных крупномасштабных потоков дымового аэрозоля. С использованием данных спутникового зондирования оценены адвективные потоки дымового аэрозоля при дальнем переносе в Евразии. Обсуждаются процессы трансформации дымового аэрозоля при дальнем переносе («старение» дымового аэрозоля). По данным спутникового мониторинга аэрозольного индекса качественно охарактеризована динамика «старения» дымового аэрозоля в сибирской дымной мгле летом 2016 г.

Оценено влияние крупномасштабных задымлений, включая сибирскую дымную мглу 2016 г., на радиационный режим атмосферы. Получены оценки аэрозольных радиационных форсингов на верхней и нижней границах атмосферы в крупномасштабной дымной мгле и в смогах на Северной Китайской Равнине.

1. Горчаков Г.И., Голицын Г.С., Ситнов С.А. и др. Крупномасштабные дымки Евразии в июле 2016 г. // Доклады АН. 2018. Т. 482, № 2. С. 209–212.
2. Gorchakov G.I., Sitnov S.A., Karpov A.V. et al. Large-scale hazes over Eurasia in July 2016: Siberian smoke haze evolution // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 2019. V. 231, 012019.
3. Горчаков Г.И., Карпов А.В., Васильев А.В., Горчакова И.А. Коричневый и черный углерод в смогах мегаполисов // Оптика атмосферы и океана. 2017. Т. 30, № 01. С. 5–11.
4. Gorchakov G.I., Sitnov S.A., Sviridenkov M.A. et al. Satellite and ground-based monitoring of smoke in the atmosphere during the summer wildfires in European Russia in 2010 and Siberia in 2012 // Int. J. Remote Sens. 2014. V. 35, No 15. P. 5698–5721.

Large-scale hazes over Eurasia

G.I. Gorchakov¹ (gengor@ifaran.ru), S.A. Sitnov¹, A.V. Karpov¹, V.M. Kopeikin¹,
I.A. Gorchakova¹, R.A. Gushchin^{1,2}, O.I. Datsenko^{1,2}, T.Ya. Ponomaryova³, R.R. Tekarev⁴

¹A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics RAS, 3 Pyzhevskiy per., 119017 Moscow, Russia

²MIREA – Russian University of Technology, Moscow, Russia

³Hydrometeorological Research Center of Russia, 11-13 B. Predtechensky per., 123242 Moscow, Russia

⁴M.V.Lomonosov Moscow State University, Physical Faculty, 1 Leninsky gory, 119991 Moscow, Russia

Significant uncertainties of the radiative regime over Eurasia are conditioned to sporadic large-scale hazes (smoke haze, smog, dust haze) [1–4]. Particularly very large smoke haze was observed in July 2016 over Siberia [1, 2]. The spatial scales, total smoke mass, black carbon content in the aerosol particles of the hazes arising owing to the fires in boreal forest are estimated. Black carbon content was determined on the mass concentration measurement data in the surface layer of the atmosphere and the single scattering albedo monitoring data received at AERONET stations.

Siberian smoke haze evolution in 2016 were analyzed [2]. Horizontal large-scale smoke aerosol flux determination method was worked out. Using satellite monitoring data smoke aerosol

advective fluxes during large-range transport in Eurasia were evaluated. Smoke aerosol transformation processes during long-range transfer (smoke aerosol “aging”) are discussed. Using aerosol index data from OMI satellite instrument, smoke aerosol aging dynamics for Siberian smoke haze in summer 2016 is qualitatively characterized.

Impact of the large-scale aerosol hazes including Siberian smoke haze in July 2016 on the radiative regime of the atmosphere was evaluated. Assessments of the aerosol radiative forcing at the top and the bottom of the atmosphere for large-scale smoke hazes and smogs at Northern China Plain are presented.

1. Gorchakov G.I., Golitsyn G.S., Sitnov S.A. et al. Large-Scale Haze over Eurasia in July 2016 // *Doklady Earth Sciences*. 2018. V. 482, No 1. P. 1212–1215.
2. Gorchakov G.I., Sitnov S.A., Karpov A.V. et al. Large-scale hazes over Eurasia in July 2016: Siberian smoke haze evolution // *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. 2019. V. 231, 012019.
3. Gorchakov G.I., Karpov A.V., Vasiliev A.V. and Gorchakova I.A. Brown and black carbons in megacity smogs // *Atmos. Ocean. Opt.* 2017. V 30, No 3. P 248–254.
4. Gorchakov G.I., Sitnov S.A., Sviridenkov M.A. et al. Satellite and ground-based monitoring of smoke in the atmosphere during the summer wildfires in European Russia in 2010 and Siberia in 1212 // *Int. J. Remote Sens.* 2014. V. 35, No 15. P. 5698–5721.

Исследование микрофизической и электрической структуры кучево-дождевого облака с ливневыми осадками, наблюдавшегося 22 июля 2017 года

Попов В.Б. (qoower@gmail.com), Синькевич А.А. (sinkevich51@mail.ru),
Матросов С.Ю., Михайловский Ю.П., Довгалюк Ю.А., Веремей Н.Е.

Главная геофизическая обсерватория им. А.И. Воейкова, ул. Карбышева 7, 194021 Санкт-Петербург, Россия

С целью выявления взаимосвязей характеристик электрических разрядов с параметрами кучево-дождевого облака в процессе его развития вблизи Санкт-Петербурга анализируются результаты одновременных радиолокационных, радиометрических и грозопеленгационных измерений. Для анализа выбрано грозо-градовое кучево-дождевое облако, развивавшееся в районе г. Санкт-Петербурга 22 июля 2017 года. В этот день в Санкт-Петербурге прошел крупный град. Рассмотрены зависимости электрической активности облака от радиолокационных характеристик, а также характеристик, полученных из результатов измерений с помощью радиометра SEVIRI, установленного на спутнике «Meteosat».

Показано, что развитие облака происходило в условиях вертикальной термической неустойчивости. Запас энергии неустойчивости в слое развития конвекции составил 1348 Дж/кг, указывая на то, что в анализируемый день могли развиваться мощные конвективные облака. Первые разряды были зафиксированы на 70–80 мин жизни облака. В этот момент по радиолокационным данным из облака шли ливневые осадки, и в них присутствовали крупные капли и обводненные градины. На 190 минуте развития отмечался максимум в частоте разрядов. В этот момент из исследуемого облака шел град. Можно сделать вывод о том, что максимум в электрической активности облака (имеется в виду частота разрядов), наблюдается в период, когда облако достигло максимума в своем развитии, из него продолжают выпадать ливневые осадки, интенсивность которых начала снижаться, присутствует жидкая и ледяная фазы, продолжается рост геометрических размеров наковальни. Наличие разрядов свидетельствует о том, что напряженность электрического поля в облаке достигла пробойного значения. Частота разрядов является достаточно большой (7.9 мин^{-1}), что указывает на то, что в Сб происходят активные процессы электризации. Можно предположить, что существенный вклад в электризацию вносит механизм заряжения, связанный с разделением зарядов при контактах “кристаллы-крупы” в присутствии жидкой фракции. Учитывая столь высокую частоту разрядов и интенсивные осадки, значительный вклад в электризацию облака могут вносить коронные

разряды, здесь возможно коронирование с отдельных градовых частиц, крупных кристаллов, а также при сближении частиц осадков. На 140 минуте наблюдалась минимальная интенсивность электрических разрядов. Из приведенных данных следует, что в период максимальной молниевой активности и ее полного отсутствия, характеристики облаков близки между собой. Различия заключаются в следующем: на 140 минуте идет активное формирование града, он фиксируется на больших высотах, на 190 минуте град наблюдается лишь в нижней части облака; поток осадков на 190 минуте превосходит соответствующий на 140 минуте, что является следствием больших геометрических размеров облака. Последние молниевые разряды зафиксированы на 230 минуте. В этот момент в облаке имеется обширная область, где отмечаются достаточно интенсивные осадки, максимальное значение интенсивности равно 2.8 мм/час. Установлено, что частота разрядов хорошо коррелирует с объемами переохлажденной части облака с большими значениями отражаемости, при этом происходит увеличение частоты электрических разрядов примерно через 20 минут после достижения максимальных значений объемов переохлажденных частей облака с отражаемостями, превышающими 35–55 дБz. Максимальное значение потока осадков предшествует максимальной частоте молний.

Проведено численное моделирование развития конвективного облака. Использовались две численные нестационарные модели конвективного облака: полуторамерная и трехмерная. Обе модели показали, что гетерогенное замерзание облачных капель играет существенную роль в усилении образования осадков и в увеличении интенсивности генерации электрических зарядов.

Работа подготовлена при финансовой поддержке РФФИ, гранты: 17-05-00965_a, БРИКС_т 18-55-80020. Авторы выражают благодарность ООО “ИРАМ” за предоставленные данные, полученные с помощью ГПС Blitzortung. Работа подготовлена с использованием ресурсов суперкомпьютерного комплекса МГУ им. М. В. Ломоносова [1].

1. Воеводин Вл.В., Жуматий С.А., Соболев С.И. и др. Практика суперкомпьютера «Ломоносов». Москва: Изд. дом «Открытые системы». 2012. 7 с.

Investigation of the microphysical and electrical structure of Cb with heavy rainfall, observed on July 22, 2017

V.B. Popov (qoower@gmail.com), A.A. Sin'kevich (sinkevich51@mail.ru),
Yu.P. Mikhailovskii, S.Yu. Matrosov, Yu.A. Dovgalyuk, N.E. Veremei

Voikov Main Geophysical Observatory, 7 Karbysheva str., 194021 Saint-Petersburg, Russia

The results of simultaneous radar, radiometric, and lightning-detection measurements are analyzed to reveal the interrelations between the parameters of electric discharges and the radar, satellite and microphysical characteristics of a developing Cb observed near St. Petersburg. Big hail was observed in St. Petersburg at this day. The relations of the electrical activity of the cloud with radar characteristics, as well as characteristics obtained from SEVIRI radiometer (installed on Meteosat satellite) measurements, are considered.

It was shown that convective available potential energy was equal to 1348 J/kg, indicating that Cu cong and Cb could develop during the analyzed day. The first lightnings were recorded at 70–80 min of cloud life. Heavy rainfall, large raindrops and hailstones with liquid water shell were registered with the help of radar at this moment. Maximum frequency of electrical discharges was observed at 190 min. Hail was detected in the cloud. The maximum in the electrical activity of the cloud is observed during the period when the cloud reached the maximum in its development, heavy rainfall continued but its intensity began to decrease. Liquid and ice phases were registered in the Cb. The increase of the anvil sizes continued. The frequency of discharges was quite large (7.9 min^{-1}), indicating that active electrification processes occurred in Cb. It can be assumed that a significant contribution to the electrification is the result of charge separation due to “crystal-graupel” contacts in the presence of the liquid fraction. At the 140th minute the minimum intensity of electrical discharges took place. Differences in Cb structure on 140th and 190th min are as follows: on the 140th min there is an active formation of a hail, it is fixed at high altitudes; on the 190th min the

hail is observed only in the lower part of a cloud; the precipitation flux on 190th min exceeds the corresponding on the 140th min that is a consequence of the large geometrical sizes of the cloud. It is shown that the frequency of electric discharges has good correlation with geometrical volume of supercooled cloud region. An increase in the frequency of electric discharges occurred after 20 min from the time when supercooled cloud volume with reflectivity greater than 35–55 dBz reached maximum. Maximum precipitation flux was observed prior to the time of maximum frequency of lightning.

Numerical simulation of convective cloud development was performed. Two numerical non-stationary convective cloud models were used: one-and-half-dimensional and three-dimensional ones. Both models have shown that heterogeneous freezing of cloud droplets play significant role in the enhancement of precipitation formation and intensification of electric charges generation.

The work was prepared with financial support by the Russian Foundation for Basic Research, grants: 17-05-00965_a, BRICS_t 18-55-80020. The authors are grateful to “IRAM” for the provided data of Blitzortung lightning-detection network. The work was prepared using resources of supercomputer complex of M. V. Lomonosov Moscow State University [1].

1. Voevodin V.I., Zhumatiy S.A., Sobolev S.I., et al. Practice of a supercomputer "Lomonosov». Moscow: Москва: Publishing house "Open systems". 2012. 7 p. (in Russian)

Влияние летних природных пожаров в России на содержание черного углерода в атмосфере над Арктическим побережьем Евразии

Виноградова А.А.¹ (anvinograd@yandex.ru), Титкова Т.Б.², Васильева А.В.¹,
Иванова Ю.А.¹

¹Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Пыжевский пер. 3, 119017 Москва, Россия

²Институт географии РАН, Старомонетный пер. 29, 119017 Москва, Россия

Черный углерод (BC – black carbon), являющийся климатически значимой составляющей атмосферы, выбрасывается в воздух при неполном сгорании углеродсодержащих веществ на поверхности планеты. Зимой это мало меняющиеся антропогенные источники BC, летом к ним добавляются природные травяные и лесные пожары, эмиссии которых сильно варьируют в пространстве и во времени. В работе анализируются данные непрерывных измерений концентрации BC в приземном воздухе (далее – [BC]) (<ftp://ftp1.esrl.noaa.gov/psd3/arctic/tiksi/aerosol/aethalometer>) в районе арктической Международной обсерватории Тикси (Tiksi) в 2012–18 гг. [1]. Для анализа источников BC в арктических районах привлечены данные базы GFED (www.globalfire.gov) об эмиссиях BC от пожаров (помесечно) и базы EDGAR v.4.3.1 (<http://edgar.jrc.ec.europa.eu/overview.php?v=431>) об антропогенных эмиссиях.

Медианные значения [BC] составляют 160 и 20 нг/м³ в холодное и теплое время года, соответственно. Наиболее длительные эпизоды (1–2 суток) аномально высокой (> 1000 нг/м³) концентрации BC отмечены летом 2012, 2014, 2017 и 2018 годов. Превышение средней температуры приземного воздуха во время таких эпизодов по сравнению со средней температурой, рассчитанной для дней вне эпизодов (в пределах месяца), может достигать 3–10 градусов (при средней климатической температуре июля около 10°C) [1]. Анализ дальнего переноса воздушных масс (по обратным траекториям переноса воздуха – модель HYSPLIT на сайте www.arl.noaa.gov) показывает, что аномальные эпизоды связаны с летними эмиссиями от конкретных очагов лесных пожаров [2]. Прямые радиационные эффекты высоких концентраций BC в воздухе, рассчитанные с учетом изменений оптических свойств атмосферы во время эпизодов, изменяют радиационный баланс атмосферы [3], но не дают заметных долговременных температурных эффектов. Вычисленная значимая корреляция измеренных среднесуточных величин температуры и концентрации BC в приземной атмосфере в теплое время года может быть связана с адвекцией тепла при переносе воздушных масс из более южных (более загрязненных и теплых) районов, а также (вместе с дымовым аэрозолем) из районов природных пожаров.

Для сопоставления с другими территориями северного побережья Евразии привлечены данные реанализа MERRA2.0 (<https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/>) по концентрации ВС в приземном воздухе и содержанию его во всем столбе атмосферы в 2010–2018 гг. Эти данные (средние за соответствующие месяцы) для района Тикси хорошо соответствуют измеренным значениям [ВС]. Высокие значения содержания ВС летом в воздухе разных районов российской Арктики приходятся на разные годы, что объясняется межгодовыми вариациями как условий циркуляции атмосферы, так и пространственного распределения эмиссий ВС от пожаров.

Работа поддержана РФФИ (грант № 17-05-00245). Авторы благодарны Лаборатории воздушных ресурсов (ARL NOAA) за подготовку и возможность свободного использования материалов сайта.

1. Popovicheva O., Diapouli E., Makshtas A. et al. East Siberian Arctic background and black carbon polluted aerosols at HMO Tiksi // *Sci.Total Environ.* 2019. V. 655. P. 924–938.
2. Виноградова А.А., Т.Б. Титкова, Ю.А. Иванова. Эпизоды аномально высокой концентрации черного углерода в приземном воздухе в районе станции Тикси, Якутия // *Оптика атмосферы и океана.* 2018. Т. 31, № 10. С. 837–844.
3. Журавлева Т.Б., Насртдинов И.М., Виноградова А.А. Прямые радиационные эффекты дымового аэрозоля в районе ст. Тикси (Российская Арктика): предварительные результаты // *Оптика атмосферы и океана.* 2019. Т. 32. № 1. С. 29–38.

Effect of summer wildfires in Russia on the content of black carbon in the atmosphere over the Eurasian Arctic coast

A.A. Vinogradova¹ (anvinograd@yandex.ru), T.B. Titkova², A.V. Vasileva¹, Yu.A. Ivanova¹

¹A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics RAS, 3 Pyzhevskiy per., 119017 Moscow, Russia

²Institute of Geography RAS, 29 Staromonetnyi per., 119017 Moscow, Russia

Black carbon (BC) is climate important atmospheric component which is emitted into the air as a product of incomplete combustion of carbonaceous substances. In winter, there are only only little changing anthropogenic BC sources on Northern Eurasian territory. But, in summer, the natural wildfires are added with their BC emissions greatly varying in space and time. The results of continuous measurements of BC concentration in near surface air (the website <ftp://ftp1.esrl.noaa.gov/psd3/arctic/tiksi/aerosol/aethalometer>) for IMO Tiksi in 2012–18 years are presented in this report [1]. Data on BC emissions from anthropogenic sources (<http://edgar.jrc.ec.europa.eu/overview.php?v=431>) and wildfires (www.globalfire.gov) were used for our analysis.

Median values of BC concentration are 160 and 20 ng/m³ in cold and warm seasons, respectively. Episodes of high BC concentrations are rare, and their duration does not exceed two days. The longest episodes (longer than 1 day) of abnormally high (> 1000 ng/m³) BC concentration were in summertime of 2012, 2014, 2017, and 2018. The excess of surface air temperature during such episode in comparison with the average temperature for days out of episode (in a month) can reach 3–10 degrees (whereas an average climatic July temperature for Tiksi region is about 10°C) [1]. Analysis of long-range transport of air masses (with backward air transport trajectories from HYSPLIT model – www.arl.noaa.gov) shows that abnormal episodes are associated with air (and BC) transport from real wildfires [2]. Direct radiation effects of high BC concentration in the air, calculated taking into account the special optical atmospheric properties during the episodes, change the radiation balance of the atmosphere [3], but do not give noticeable long-term temperature effects. The significant correlation between measured daily air temperature and BC concentration in the surface atmosphere during the warm season may be associated with heat advection by air masses from more southern (more polluted and warm) territories, as well as from the areas of wildfires.

The data of reanalysis MERRA2.0 (<https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/>) on the BC surface concentration and BC column content in the atmosphere were involved for comparison between the different territories of the Northern Eurasian coast in 2010–2018. For the Tiksi area these data (monthly ones) correspond well to measured BC concentrations. High values of BC content in the atmosphere in summer in different areas of the Russian Arctic fall on different years

due to interannual variations in both atmospheric circulation and the spatial distribution of BC emissions from fires.

The work was supported by RFBR (grant No. 17-05-00245). The authors thank Air Resources Laboratory (ARL NOAA) for organizing website materials and opening them for free use.

1. Popovicheva O., Diapouli E, Makshtas A. et al. East Siberian Arctic background and black carbon polluted aerosols at HMO Tiksi // *Sci. Total Environ.* 2019. V. 655. P. 924–938.
2. Vinogradova A. A., Titkova T. B., Ivanova Yu. A. Episodes with Anomalously High Black Carbon Concentration in Near-Surface Air in the Region of Tiksi Station, Yakutiya // *Optika Atmosperi i Oceana.* 2019. V. 32. No. 1. P. 94–102 (in Russian).
3. Zhuravleva T.B., Nasrtdinov I.M., Vinogradova A.A. Direct radiative effects of smoke aerosol in the region of Tiksi (Russian Arctic) // *Optika Atmosperi i Oceana.* 2019. V. 32, No. 1. P. 29–38 (in Russian).

Ориентация кристаллических частиц перистых облаков и радиационные характеристики атмосферы

Самохвалов И.В.¹ (lidar@mail.tsu.ru), Брюханов И.Д.¹, Чередыко Н.Н.²,
Зуев С.В.² (zuev@imces.ru)

¹*Национальный исследовательский Томский государственный университет, пр. Ленина 36, 634050
Томск, Россия*

²*Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, пр. Академический 10/3,
Томск, Россия*

С неадекватностью учета роли атмосферного аэрозоля и характеристик облачности в изменениях климата связывают наибольшую неопределенность моделирования и прогноза климатической системы Земли [1–3]. Недостаточно внимания уделяется изучению влияния микроструктуры перистой облачности на суммарную солнечную радиацию. Исследования климаторегулирующей роли перистых облаков, в основном, представлены теоретическим моделированием с учетом идеализированных облачных макрофизических и микрофизических параметров, а также ряда приближений радиационного переноса в атмосфере [4]. В отличие от капельных облаков, точное описание размеров частиц в кристаллических или смешанных облаках затруднительно. С этой целью, как правило, вводится понятие «эффективного радиуса» частиц, основанное на равенстве какого-либо одного из свойств разных по форме частиц и некоторой модельной сферы. Предложены разные способы приравнивания характерных размеров реальных частиц к радиусам модельных сферических частиц. Несмотря на фундаментальное значение исследований закономерностей влияния разных форм облачности на поток солнечного излучения в проблеме изменения климата, регулярные измерения микрофизических характеристик облаков, необходимые для задания их начальных значений при интегрировании по времени входящих в модели уравнений переноса водности и ледности, отсутствуют. Кроме того, не принимается во внимание ориентация кристаллических частиц в перистых облаках, что может вносить серьезные погрешности в определении радиационных характеристик атмосферы при наличии облаков верхнего яруса.

Результаты комплексных экспериментов на уникальном высотном поляризационном лидаре [5] в лаборатории лазерного зондирования НИ ТГУ показывают, что поток суммарной солнечной радиации, измеряемой у поверхности Земли, заметно отличается для облаков верхнего яруса, состоящих из хаотически ориентированных частиц льда, и облаков с существенной ориентацией кристаллов в горизонтальной плоскости. При сравнительно одинаковой оптической толще облаков различие это может быть в 20 раз. Установлено, что облака с аномальным обратным рассеянием ("зеркальные") наблюдаются достаточно часто и могут составлять до 30% всех наблюдений облаков верхнего яруса. Поэтому данный эффект необходимо особо учитывать в климатических моделях при вычислении потоков радиации в облачной атмосфере.

Работа выполнена при поддержке Программы «Научный фонд им. Д.И. Менделеева НИ ТГУ».

1. Кондратьев К.Я. Неопределенности данных наблюдений и численного моделирования климата // Метеорология и гидрология. 2004. № 4. С. 93–119.
2. Kim D., and Ramanathan V. Solar radiation budget and radiative forcing due to aerosols and clouds // J. Geophys. Res. 2008. V. 113. D00A12, doi:10.1029/2007JD008434.
3. Heymsfield A.J., Krdmer M., Luebke A. et al. Cirrus clouds // American Meteorological Society. Meteorological Monographs. 2017. V. 58. doi: 10.1175/amsmonographs-d-16-0010.1.
4. Sassen K., Campbell J.R. A Midlatitude Cirrus Cloud Climatology from the Facility for Atmospheric Remote Sensing. Part I: Macrophysical and Synoptic Properties // J. Atmosph. Sc. 2001. V. 58. P. 481–496.
5. Samokhvalov I.V., Zuev. S.V., Bryukhanova V.V., Bryukhanov I.D. et al. Monitoring cirrus clouds over Tomsk and measurements of solar radiation in the atmospheric surface layer // Proc. SPIE. 2018. V. 10833, 24th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics, 108335I (4 pp.); DOI: 10.1117/12.2504516.

Orientation of crystalline particles in cirrus and characteristics of atmospheric radiation

I.V. Samokhvalov¹ (lidar@mail.tsu.ru), I.D. Bryukhanov¹, N.N. Chered'ko²,
S.V. Zuev² (zuev@imces.ru)

¹National Research Tomsk State University, 36 Lenina Pr., 634050 Tomsk, Russia

²Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems SB RAS, 10/3 Akademicheskoy ave., 634055 Tomsk, Russia

The greatest uncertainty in modeling and forecasting the Earth's climate system is related with the inadequacy of taking into account the role of atmospheric aerosol and cloudiness characteristics in climate change [1–3]. Not enough attention is paid to the study of effect of the cirrus microstructure on total solar radiation. Studies of the climate-regulating role of cirrus are mainly presented by theoretical modeling with taking into account idealized cloud macrophysical and microphysical parameters, as well as a number of approximations of radiative transfer in the atmosphere [4]. Unlike drip clouds, an accurate description of particle sizes in crystalline or mixed clouds is difficult. For this purpose, as a rule, the concept of effective radius of particles based on the equality of any property of particles with different shapes and some model sphere is introduced. Different methods of equating the characteristic dimensions of real particles with the radii of model spherical particles are proposed. Despite the fundamental importance of studying the patterns of the effect of various forms of clouds on the solar radiation flux in the problem of climate change, there are no regular measurements of the microphysical characteristics of clouds that are required to specify their initial values when integrating over time the water and ice transmission equations. In addition, the orientation of crystalline particles in cirrus is not taken into account, which can introduce serious errors in determining the radiation characteristics of the atmosphere in the presence of high-level clouds.

The results of complex experiments on the unique high-altitude polarization lidar [5] developed at the Laboratory of Laser Sensing at the NR TSU show that the total solar radiation flux measured at the Earth's surface is noticeably different for high-level clouds consisting of randomly oriented ice particles and clouds with a preferred orientation of crystals in the horizontal plane. When the optical depth of clouds is relatively identical, the difference can be 20 times. It has been established that clouds with anomalous backscattering (mirror clouds) are observed quite often and can account for up to 30% of all observations of high-level clouds. Therefore, this effect should be especially taken into account in climate models in calculations of radiation fluxes in a cloudy atmosphere.

This work was supported in part by the Tomsk State University Academic D. I. Mendeleev Fund Program.

1. Kondratyev K.Ya. Uncertainties of the data of observations and numerical modeling of climate // Meteorolog. Hidrolog. 2004. No. 4. P. 93–119 (in Russian).
2. Kim D., and Ramanathan V. Solar radiation budget and radiative forcing due to aerosols and clouds // J. Geophys. Res. 2008. V. 113. D00A12, doi:10.1029/2007JD008434.
3. Heymsfield A.J., Krdmer M., Luebke A. et al. Cirrus clouds // American Meteorological Society. Meteorological Monographs. 2017. V. 58. doi: 10.1175/amsmonographs-d-16-0010.1.

4. Sassen K., Campbell J.R. A Midlatitude Cirrus Cloud Climatology from the Facility for Atmospheric Remote Sensing. Part I: Macrophysical and Synoptic Properties // J. Atmosph. Sc. 2001. V. 58. P. 481–496.
5. Samokhvalov I.V., Zuev. S.V., Bryukhanova V.V., Bryukhanov I.D. et al. Monitoring cirrus clouds over Tomsk and measurements of solar radiation in the atmospheric surface layer // Proc. SPIE. 2018. V. 10833, 24th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics, 108335I (4 pp.); DOI: 10.1117/12.2504516.

Оптические и микрофизические характеристики перистых облаков по данным лазерного поляризационного зондирования в Томске

Брюханов И.Д. (plyton@mail.tsu.ru), Самохвалов И.В.

Национальный исследовательский Томский государственный университет, пр. Ленина 36, 634050 Томск, Россия

Перистые облака в средних широтах Земли формируются на высотах 8–12 км под тропопаузой. В видимом диапазоне длин волн они прозрачны (имеют малую оптическую толщину в вертикальном направлении), но имеют большую горизонтальную протяженность. Как правило, такие облака состоят из кристаллических частиц с различными размерами и формами. Пространственная ориентация кристаллов льда оказывает существенное влияние на пропускание и рассеяние солнечной радиации перистыми облаками [1]. Поэтому такие облака являются важным климатообразующим фактором. Часто кристаллы в них принимают горизонтальную ориентацию. Такие облака называют «зеркальными» [2], поскольку коэффициент обратного рассеяния (при зондировании в направлении «зенит») в подобных облаках очень высок. На наш взгляд, отсутствие учета в климатических моделях ориентации кристаллов в облаках является причиной неточностей прогнозов погоды и климатических изменений на Земле. Представляет интерес выявление факторов, влияющих на формирование «зеркальных» облаков.

Систематические исследования облаков верхнего яруса (ОВЯ) проводятся на высотном поляризационном лидаре Национального исследовательского Томского государственного университета (НИ ТГУ) с 2009 г. Благодаря оригинальным техническим решениям, реализованным в лидаре, удаётся оперативно определять все 16 элементов матрицы обратного света (МОРС) облака [3, 4]. По структуре и соотношению элементов МОРС делаются оценки параметров микроструктуры кристаллических ОВЯ [5]. Кроме того, методика обработки лидарных данных позволяет учесть вклад многократного рассеяния [6] и по его поляризационным характеристикам получить дополнительную информацию о микроструктуре аэрозольных образований.

В докладе приводятся результаты лидарных исследований перистых облаков с аномальным обратным рассеянием [7]. Описывается методика определения оптических и геометрических характеристик облаков. Экспериментальные данные сопоставляются с метеорологической обстановкой над лидаром на высотах расположения перистых облаков, а также с результатами численного моделирования МОРС в рамках приближения физической оптики [8]. Приводятся оценки повторяемости метеорологических характеристик, при которых регистрировались «зеркальные» перистые облака.

Работа выполнена при поддержке Программы «Научный фонд им. Д.И. Менделеева НИ ТГУ».

1. Кондратьев К.Я. Неопределенности данных наблюдений и численного моделирования климата // Метеорология и гидрология. 2004. № 4. С. 93–119.
2. Platt C.M.R. Some microphysical properties of an ice cloud from lidar observation of horizontally oriented crystals // J. Appl. Meteorol. 1978. Vol. 17. P. 1220–1224.
3. Самохвалов И.В., Кауль Б.В., Насонов С.В., Животенюк И.В., Брюханов И.Д. Матрица обратного рассеяния света зеркально отражающих слоев облаков верхнего яруса, образованных кристаллическими частицами, преимущественно ориентированными в горизонтальной плоскости // Оптика атмосферы и океана. 2012. Т. 25, № 5. С. 403–411.
4. Samokhvalov I.V., Bryukhanov I.D., Nasonov S.V. et al. Investigation of the optical characteristics of cirrus clouds with anomalous backscattering // Russ. Phys. J. 2013. Vol. 55, No. 8. P. 925–929.

5. Kaul B.V., Samokhvalov I.V., and Volkov S.N. Investigating particle orientation in cirrus clouds by measuring backscattering phase matrices with lidar // Appl. Opt. 2004. Vol. 43, No. 36. P. 6620–6628.
6. Doroshkevich A.A., Bryukhanova V.V. On the effect of cloud microstructure on the polarization characteristics of double scattering lidar return // Proc. SPIE. 2015. Vol. 9680. 968053 (5 pp.); doi: 10.1117/12.2206001.
7. Samokhvalov I.V., Zuev S.V., Bryukhanova V.V. et al. Study of influence of ice crystals orientation in cirrus on solar radiation transmission // Proc. SPIE. 2018. Vol. 10786. 1078611 (7 pp.); doi: 10.1117/12.2325713.
8. Самохвалов И.В., Брюханов И.Д., Шишко В.А. и др. Оценка микрофизических характеристик конденсационных следов самолётов по данным поляризационного лидара: теория и эксперимент // Оптика атмосферы и океана. 2019. Т. 32, № 3. С. 193–201.

Optical and microphysical characteristics of cirrus based on the data of laser polarization sensing in Tomsk

I.D. Bryukhanov (plyton@mail.tsu.ru), I.V. Samokhvalov
National Research Tomsk State University, 36 Lenina Pr., 634050 Tomsk, Russia

In the middle latitudes of the Earth, cirrus clouds are formed at altitudes from 8 to 12 km under the tropopause. In the visible range of wavelengths, they are transparent (have a small optical thickness in the vertical direction), but have a large horizontal extent. As a rule, such clouds consist of crystalline particles with different sizes and shapes. The spatial orientation of ice crystals has a significant effect on the transmission and scattering of solar radiation by cirrus [1]. Thus, such clouds are an important climate-forming factor. Often crystals in them take a horizontal orientation. Such clouds are called *mirror* clouds [2], since the backscatter coefficient (during sensing in the *zenith* direction) in such clouds is very high. In our opinion, the lack of consideration of the orientation of cloud crystals in climatic models is the cause of inaccuracies in Earth's weather and climate forecasts. It is of interest to identify the factors affecting the formation of *mirror* clouds.

Systematic studies of high-level clouds (HLCs) are performed with the high-altitude polarization lidar developed at the National Research Tomsk State University (NR TSU) since 2009. Original technical solutions implemented in the lidar allow all 16 elements of the backscattering phase matrix (BSPM) of the cloud to be identified quickly [3, 4]. The microstructure parameters of crystalline HLCs are estimated based on the structure and relationships of elements of their BSPMs [5]. In addition, the method of processing lidar data allows the contribution of multiple scattering [6] to be taken into account and additional information on the microstructure of aerosol formations to be obtained based on their polarization characteristics.

In the present report, the results of lidar studies of cirrus with anomalous backscatter [7] are presented. The method for determining optical and geometric characteristics of clouds are described. The experimental data were compared with the meteorological situation over the lidar at the altitudes of cirrus, as well as with the results of numerical simulation of BSPMs in the framework of the physical optics approximation [8]. The frequency of occurrence of meteorological characteristics, in which *mirror* cirrus were observed, was estimated.

This work was supported in part by the Tomsk State University Academic D. I. Mendeleev Fund Program.

1. Kondratyev K.Ya. Uncertainties in observational data and numerical climate modelling // Meteorolog. Gidrol. 2004. No. 4. P. 93–119 (in Russian).
2. Platt C.M.R. Some microphysical properties of an ice cloud from lidar observation of horizontally oriented crystals // J. Appl. Meteorol. 1978. Vol. 17. P. 1220–1224.
3. Samokhvalov I.V., Kaul B.V., Nasonov S.V., Zhivotenyuk I.V., Bryukhanov I.D. Backscattering matrix of mirror-reflecting layers of clouds of the upper layer formed by crystalline particles, mainly oriented in the horizontal plane // Opt. Atm. Okeana. 2012. Vol. 25, No. 5. P. 403–411 (in Russian).
4. Samokhvalov I.V., Bryukhanov I.D., Nasonov S.V. et al. Investigation of the optical characteristics of cirrus clouds with anomalous backscattering // Russ. Phys. J. 2013. Vol. 55, No. 8. P. 925–929.
5. Kaul B.V., Samokhvalov I.V., and Volkov S.N. Investigating particle orientation in cirrus clouds by measuring backscattering phase matrices with lidar // Appl. Opt. 2004. Vol. 43, No. 36. P. 6620–6628.
6. Doroshkevich A.A., Bryukhanova V.V. On the effect of cloud microstructure on the polarization characteristics of double scattering lidar return // Proc. SPIE. 2015. Vol. 9680. 968053 (5 pp.); doi: 10.1117/12.2206001.

7. Samokhvalov I.V., Zuev S.V., Bryukhanova V.V. et al. Study of influence of ice crystals orientation in cirrus on solar radiation transmission // Proc. SPIE. 2018. Vol. 10786. 1078611 (7 pp.); doi: 10.1117/12.2325713.
8. Samokhvalov I.V., Bryukhanov I.D., Shishko V.A. et al. Evaluation of microphysical characteristics of condensation traces of aircraft according to polarization lidar: theory and experiment // Opt. Atm. Okeana. 2019. Vol. 32, No. 3. P. 193–201 (in Russian).

Характеристики поля оптического излучения молний в условиях ограниченной облачности

Скачков М.В.¹ (skachm@mail.ru), Бусыгин В.П.² (adikbu@yandex.ru)

¹*Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н.Л. Духова, Суцеская ул. 22, 127055 Москва, Россия*

²*12 Центральный научно-исследовательский институт МО РФ, Весенняя ул. 26, 141307 Моск. обл., Сергиев Посад-7, Россия*

Одно из основных направлений исследования природы образования гроз, типов и характеристик молниевых разрядов связано с анализом материалов совместной регистрации радиочастотных и оптических сигналов. При идентификации молниевых разрядов и разрешении отдельных оптических импульсов в рамках вспышек, а также для оценки времени задержки пиковых значений оптических сигналов относительно радиочастотных, очень важно иметь представление о пропускании и искажении формы исходных импульсов в атмосфере Земли при различных условиях наземных измерений оптического излучения молний.

В работе изучается зависимость характеристик поля оптического излучения молний от метеорологических параметров облачности. Рассматриваются различные модели облачного слоя (бесконечный слой, полуограниченный слой, усеченный цилиндр, нормальное случайное стационарное поле), эффекты расположения границы слоя относительно точки приема излучения и направления ориентации приемника, вариации значений коэффициента ослабления излучения и медианы импульсной характеристики атмосферы в условиях переменной облачности на расстояниях до 50 км от молниевых разрядов. Проводится анализ надоблачной и подоблачной составляющих оптических сигналов обратных ударов «земля-облако». Здесь под импульсной характеристикой атмосферы, $\text{см}^{-2}\text{с}^{-1}$, понимается энергетическая плотность потока рассеянного излучения от δ -импульсного источника единичной энергии в телесный угол приемника. Коэффициент ослабления излучения, см^{-2} , – интеграл от плотности потока по времени. Надоблачная составляющая оптического сигнала – плотность потока рассеянного излучения, приходящего в приемник из надоблачного пространства, подоблачная составляющая включает оставшееся рассеянное излучение, распространяющееся от источника, оставаясь в границах подоблачного и облачного слоев.

Исследование выполняется в рамках решения уравнения переноса в трехмерной сферической модели атмосферы Земли с помощью метода Монте-Карло. Для увеличения эффективности расчетов дополнительно применяется метод расщепления траекторий частиц при их приближении к точке наблюдения. Это значительно снижает трудоемкость алгоритма при моделировании переноса излучения на большие расстояния и через оптически толстые слои облачности. Пакет программ, реализующий методику расчета, ориентирован на использование многопроцессорного кластера. Распараллеливание алгоритма осуществляется по группам независимых испытаний с использованием интерфейса MPI.

В результате расчетов получено, что с приближением к приемнику грозового фронта, перпендикулярного направлению на источник, характеристики поля оптического излучения меняются от предельных значений, характерных для безоблачной атмосферы, до значений, соответствующих случаю сплошной облачности. Дальнейшее смещение фронта за приемником слабо влияет на амплитуду и форму оптического сигнала для полусферического приемника или приемника, направленного на источник. Аналогичная картина перестройки поля оптического излучения наблюдается при вращении границы облачного слоя

относительно источника. Вариациям амплитудных значений в условиях переменной облачности в наибольшей степени подвержена надоблачная составляющая оптического сигнала. Среднеквадратичные отклонения этих значений при фиксированном расстоянии от источника до точки приема сигнала меняются от единиц до десятков процентов с увеличением среднего диаметра облаков от 0.5 до 5 км, что на порядок больше среднеквадратичных отклонений амплитудных значений подоблачной составляющей оптического сигнала.

Characteristics of the field of lightning optical radiation in a limited cloudiness

M.V. Skachkov¹ (skachm@mail.ru), V.P. Busygin² (adikbu@yandex.ru)

¹*N.L. Dukhov All-Russia Research Institute of Automatics, 22 Sushchevskaya str., 127055 Moscow, Russia*

²*12th Central Research Institute of the Ministry of Defence of the Russian Federation, 2b Vesennaya str., 141307 Moscow Reg., Sergiyev Posad-7, Russia*

One of the main directions of studying the nature of formation of thunderstorms, types and characteristics of lightning discharges is associated with the analysis of materials of radio-frequency and optical signal co-registration. When identifying lightning discharges and determining separate optical impulses within flashes as well as for evaluating the delay time of peak values of optical signals with respect to radio-frequency ones, it is very important to have an idea of transmission and distortion of initial impulses in the Earth's atmosphere under various conditions of ground-based measurements of optical radiation of lightnings.

This work studies the dependence of characteristics of the field of lightning optical radiation on meteorological parameters of cloudiness. Various models of a cloud layer (infinite layer, semi-bounded layer, truncated cylinder, normal random stationary field), effects of the location of a layer boundary with respect to the radiation reception point and the direction of the receiver orientation, variations of values of a radiation attenuation coefficient and a median of impulse characteristic of the atmosphere in a partial cloudiness at distances up to 50 km from the lightning discharge are considered. The analysis of above cloudy and subcloudy components of optical signals of the backstrokes "earth-cloud" is carried out. Impulse characteristic of the atmosphere ($\text{cm}^2\text{sec}^{-1}$) is understood as an energy density of scattered radiation flux from a δ -impulse source of singular energy to a solid angle of the receiver. Radiation attenuation coefficient (cm^{-2}) is an integral of flux density with respect to time. Above cloudy component of optical signal is a density of scattered radiation flux coming to the receiver from the above cloudy space. Subcloudy component includes the remaining scattered radiation extending from a source, staying within boundaries of subcloudy and cloudy layers.

The study is carried out in the framework of solving the transfer equation in a three-dimensional spherical model of the Earth's atmosphere by the Monte Carlo method. To increase effectiveness of calculations the method of splitting of particle trajectories at their approach to an observation point is additionally applied. It considerably reduces time-consuming nature of the algorithm when modeling the long-range transfer of radiation and transfer of radiation through optically thick layers of a cloudiness. The software package realizing the calculation procedure is focused on using the multiprocessor cluster. The parallelizing of the algorithm is carried out on groups of independent tests with the use of the MPI interface.

The results of calculations are as follows: by approaching the receiver of the storm front, perpendicular to the direction to a source, characteristics of the optical radiation field change from the limit values, typical for the cloudless atmosphere, to the values corresponding to a case of a continuous cloudiness. Further shift of the front behind the receiver poorly influences the amplitude and form of an optical signal for the hemispherical receiver or the receiver directed to a source. The similar reorganization of the optical radiation field is observed at rotation of border of a cloud layer with respect to a source. The above cloudy component of an optical signal is most subject to variations of amplitude values in a partial cloudiness. Standard deviations of these values at the

fixed distance from a source to a point of reception of a signal change from ones to tens of percent with increase of average diameter of clouds from 0.5 to 5 km which is many times more than standard deviation of amplitude values of a subcloudy component of an optical signal.

Результаты исследований микродисперсной фракции аэрозоля в атмосфере прибрежной зоны озера Байкал

Сунграпова И.П. (ip.sungrapova@mail.ru), Заяханов А.С., Жамсуева Г.С., Цыдыпов В.В.
Институт физического материаловедения СО РАН, ул. Сахьяновой 6, 670047 Улан-Удэ, Россия

В работе представлены результаты экспериментального исследования суточной изменчивости параметров микродисперсного аэрозоля в регионе оз. Байкал. Измерения концентрации и распределения размеров атмосферных наночастиц проводились на юго-восточном побережье оз. Байкал (на ст. Боярск) с помощью диффузионного спектрометра аэрозолей (ДСА), отбор проб осуществлялся каждые 4 мин на высоте 2 м выше уровня Земли. Синхронно проводились измерения метеорологических параметров атмосферы с использованием акустического метеорологического комплекса (АМК-03).

Выявлено, что для суточного хода общей счетной концентрации аэрозоля Байкальского региона характерны повышенные концентрации аэрозольных частиц в дневные и вечерние часы. В утренние и дневные часы наблюдается рост числа частиц нуклеационной моды за счет усиления бризовой циркуляции в этот период, способствующих переносу антропогенных примесей с акватории озера и активизации фотохимических реакций между примесными газами. В вечерние часы увеличение счетной концентрации микродисперсного аэрозоля связано с формированием инверсии температуры и накоплением примесей в приземном слое атмосферы. Выявлено, что изменчивость временного хода общей счетной концентраций аэрозоля в окружающей среде зависит от метеорологических условий, определяемых текущей скоростью и направлением ветра, температурными инверсиями и влажностью окружающего воздуха. В суточной динамике спектров размеров микродисперсного аэрозоля в период экспериментов выделяются аэрозоли нуклеационной моды частиц ($d < 0.01$ мкм), имеющие органическое происхождение, и аэрозольные частицы моды Айткена ($0.01 < d < 0.08$ мкм), возникающие из-за роста нуклеационной моды частиц, а также при производстве первичных источников горения, таких как транспортные средства.

Проведен сравнительный анализ суточной изменчивости общей счетной концентрации аэрозоля для местностей с разной степенью и характером антропогенной нагрузки: г. Улан-Удэ и оз. Байкал. Обнаружено, что в г. Улан-Удэ общая счетная концентрация в 9.97 раза больше, чем в атмосфере ст. Боярск. Показано, что в городских условиях увеличение концентрации аэрозольных частиц диаметром 50.4–63.4 нм связано с активным ростом частиц антропогенного происхождения. В Улан-Удэ, где основной вклад микродисперсных частиц вносит автотранспорт, в спектрах распределения частиц практически не наблюдается нуклеационная мода аэрозоля, в отличие от полученных результатов на оз. Байкал.

Работа выполнена в рамках госзадания №0336-2019-0007, часть работ по проведению измерений микродисперсного аэрозоля проведена при частичной финансовой поддержке РФФИ (грант № 18-35-00143 мол_а).

The results of investigation of ultrafine aerosols in the atmosphere of the Baikal Coastal Zone

I.P. Sungrapova (ip.sungrapova@mail.ru), A.S. Zayakhanov, G.S. Zhamsueva,
V.V. Tsydypov
Institute of Physical Materials Science SB RAS, 6 Sakhyanovoy st, 670047 Ulan-Ude, Russia

The article presents the experimental results of diurnal variability of parameters of ultrafine aerosol in Baikal region. Concentration and particle size distribution were measured on the

southeastern coast of Lake Baikal (scientific station "Boyarsk") with a diffuse aerosol spectrometer (DAS). Aerosol was sampled at an altitude of 2 m above the ground, every 4 minutes. The measurements of meteorological variables using the AMK-03 acoustic meteorological complex were carried out simultaneously.

The diurnal variations of the total number density of ultrafine aerosol are characterized by increased concentrations of aerosol in the afternoon and evening hours. In the morning and afternoon, the number of nucleation-mode particles ($d < 0.01 \mu\text{m}$) increases because of the breeze circulation intensification, which promotes transport of anthropogenic admixtures from the lake and activation of photochemical reactions between gaseous impurities. In the evening, the elevated concentrations of ultrafine particle aerosols are related with the formation of temperature inversion and accumulation of impurities in the surface layer of the atmosphere. The temporal variability of total number densities depends on meteorological conditions, such as wind speed and direction, temperature inversion and ambient humidity. In the atmosphere of the coastal zone of Lake Baikal, aerosols of nucleation-mode particles, mainly organic origin, and aerosols of the Aitken mode ($0.01 < d < 0.08 \mu\text{m}$) are distinguished in the spectrum of particle size distribution. The Aitken mode occurs from growth of nucleation-mode particles, also in the production of primary combustion sources such as vehicles.

The comparative analysis of diurnal variations of aerosol total number density for areas with different degree and nature of anthropogenic load (Ulan-Ude and the Lake Baikal) was carried out. It is established that in Ulan-Ude the concentration of total content of ultrafine aerosol is 9.97 times more than in the atmosphere of Boyarsk station. The concentration of aerosol within the $0.05\text{--}0.063 \mu\text{m}$ size range was increased in the urban atmosphere. It was connected with the active increase of anthropogenic aerosol. In Ulan-Ude, motor vehicles make the main contribution to the formation of micro-disperse particles. In the spectrum of particle size distribution, the nucleation mode aerosol was practically not observed in contrast to the results obtained on the Lake Baikal.

The work was supported by the state assignment №0336-2019-0007, part of the work on the measurement of ultrafine aerosol was partly supported by the Russian Foundation for Basic Research (grant no. № 18-35-00143 - mol_a)

Сезонная изменчивость атмосферного аэрозоля Центральной Сибири

Михайлов Е.Ф. (eugene.mikhailov@spbu.ru), Власенко С.С., Иванова О.А.,
Небосько Е.Ю., Рышкевич Т.И.

*Санкт-Петербургский государственный университет, физ. фак., Университетская наб. 7/9, 199034
Санкт-Петербург, Россия*

Представлены результаты аэрозольных измерений, выполненных на Сибирской фоновой станции атмосферного мониторинга ZOTTO (61°N ; 89°E) за период с 2010 по 2017 гг. [1, 2]. Получены данные по массовой концентрации, химическому составу и конденсационным свойствам аэрозольных частиц. Результаты измерений анализировались совместно с 4D-лагранжиан моделью HYSPLIT, с использованием глобальных метеополей NCEP/NCAR (National Center for Environmental Prediction (NCEP)) and the National Center for Atmospheric Research (NCAR)) (разрешение по горизонтали 2.5° и 17 уровней по вертикали). Информация о пожарах получена с помощью спутникового спектро-радиометра MODIS.

Совместный анализ данных позволил идентифицировать источники атмосферных частиц и выделить их сезонную изменчивость. Установлено, что Центральная Сибирь находится под постоянной антропогенной нагрузкой. В среднем частота событий, соответствующая фоновым концентрациям частиц, не превышает 11% в зимний период и 4% в летний сезон. В частности, показано, что факельное сжигание природного газа в нефтедобывающих районах Западной Сибири приводит к существенному увеличению в атмосфере концентрации климатически активных элементарного и органического углерода:

на расстоянии от источников порядка 1500 км концентрация углеродсодержащих компонентов превышает фоновые значения в ~40 раз. Таким образом, факельное сжигание в сибирском регионе является одним из мощнейших источников элементарного углерода, а его перенос в Арктический бассейн может вносить существенный вклад в наблюдаемые климатические изменения в этом регионе.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант №18-17-00076).

1. Mikhailov, E. F., Mironova, S., Mironov, G. et al. Long-term measurements (2010–2014) of carbonaceous aerosol and carbon monoxide at the Zotino Tall Tower Observatory (ZOTTO) in central Siberia // *Atmos. Chem. Phys.* 2017. V. 17. P. 14365–14392.
2. Konovalov, I. B., Lvova, D. A., Beekmann, M. et al. Estimation of black carbon emissions from Siberian fires using satellite observations of absorption and extinction optical depths // *Atmos. Chem. Phys.* 2018. V. 18. P. 14889–14924.

Seasonal variability of atmospheric aerosol in Central Siberia

E.F. Mikhailov (eugene.mikhailov@spbu.ru), S.S. Vlasenko, O.A. Ivanova, E.Yu. Nebosko, T.I. Ryshkevich

Saint-Petersburg State University, Physics Faculty, 7/9 Universitetskaya nab., 199034 Saint-Petersburg, Russia

The results of measurements of aerosol mass concentrations including the carbon-containing fraction, obtained at the Siberian background station of atmospheric monitoring ZOTTO (61° N; 89° E) for the period from 2010 to 2017 are presented. The data for their chemical composition and condensation properties were analyzed in combination with the 4D-Lagrangian HYSPLIT model using the NCEP/NCAR meteorological archive data (National Center for Environmental Prediction (NCEP)) and the National Center for Atmospheric Research (NCAR) (horizontal resolution 2.5° and 17 vertical levels). Data on fires were obtained using a MODIS satellite spectral radiometer.

The sources of atmospheric particles and their seasonal variability were identified by a joint analysis of the data. It is shown that Central Siberia is under the constant anthropogenic impact. On average, the event frequency corresponding to the background particle concentrations does not exceed 11% in the winter season and 4% in the summer season. Particularly, it is shown that flaring of natural gas in oil-producing areas of Western Siberia leads to a significant increase in the concentration of climatically active elemental and organic carbon in the atmosphere: at a distance from sources with a radius of about 1500 km the concentration of carbon-containing components exceeds background values by ~ 40 times. Thus, the flaring in the Siberian region is one of the most powerful sources of elemental carbon, and its transfer to the Arctic Basin can make a significant contribution to the observed climatic changes in this region.

This work was supported by the Russian Science Foundation, RSF (grant № 18-17-00076).

1. Mikhailov, E. F., Mironova, S., Mironov, G. et al. Long-term measurements (2010–2014) of carbonaceous aerosol and carbon monoxide at the Zotino Tall Tower Observatory (ZOTTO) in central Siberia // *Atmos. Chem. Phys.* 2017. V. 17. P. 14365–14392.
2. Konovalov, I. B., Lvova, D. A., Beekmann, M. et al. Estimation of black carbon emissions from Siberian fires using satellite observations of absorption and extinction optical depths // *Atmos. Chem. Phys.* 2018. V. 18. P. 14889–14924.

Вариации содержания черного углерода в Арктике

Копейкин В.М.¹ (koreikin@ifaran.ru), Шевченко В.П.², Малафеев Г.В.², Новигатский А.Н.², Панкратова Н.В.¹, Пономарева Т.Я.³, Скороход А.И.¹, Штабкин Ю.А.¹

¹Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Пыжевский пер. 3, 119017 Москва, Россия

²Институт океанологии им. П.П. Шишова Российской академии наук, Нахимовский пр. 36, 117218 Москва, Россия

³Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации, Б. Предтеченский пер. 11-13, 123242 Москва, Россия

Вариации содержания черного углерода (BC) в приводном слое атмосферы получены в 5 рейсах научно-исследовательских кораблей в период 2017–2018 гг. В докладе представлены результаты исследования вариаций концентрации черного углерода над

водной поверхностью Норвежского, Баренцева, Карского, Восточно-Сибирского морей и моря Лаптевых, а также Балтийского, Белого, Северного морей и Северной Атлантики, в период с 30 июня по 29 сентября 2017 г. и с 24 июня по 18 сентября 2018 г. в 68–69 и 71–73 рейсах научно-исследовательского судна «Академик Мстислав Келдыш». Пробы отбирали прокачкой воздуха в течение 4–6 часов через кварцевые фильтры на высоте 10 м над уровнем моря при встречном ветре для исключения попадания на фильтры дыма из трубы судна. В дальнейшем содержание черного углерода определяли в лабораторных условиях аэталометрическим методом.

Средняя концентрация сажи в летне-осенний период в Норвежском, Баренцевом, Карском морях, море Лаптевых и Восточно-Сибирском море, соответственно составляет 95, 63, 43, 17, 62 нг/м³, в Балтийском, Белом, Северном морях – 141, 53, 74 нг/м³ и 47 нг/м³ в Северной Атлантике. Средние концентрации ВС над водной поверхностью летнего и осеннего периодов 2017–2018 гг. Баренцева, Карского, Восточно-Сибирского морей и моря Лаптевых близки – 46 и 54 нг/м³, соответственно.

Проведен анализ вариаций концентрации сажи с использованием 2-суточных обратных траекторий переноса воздушных масс. Обратные траектории переноса воздушных масс и транспортируемых ими частиц черного углерода в точки отбора проб рассчитывали с помощью модели HYSPLIT (Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory) на сайте <http://www.arl.noaa.gov/ready.html>. Проведенные исследования показывают низкие значения концентраций черного углерода (< 50 нг/м³) вдоль маршрута экспедиции тогда, когда воздушные массы поступали из фоновых районов Северной Атлантики и Арктики. Высокие концентрации черного углерода (100–200 нг/м³ и выше) характерны для участков с активным судоходством (Юго-Восточная Балтика, Северное море) и вблизи портов, а также при поступлении воздушных масс из индустриально развитых районов Европы в Юго-Восточной Балтике, а также из районов нефтегазовых месторождений, на которых проводят сжигание попутного газа (Северное, Норвежское и Карское моря).

Данные 2017–2018 гг. о содержании черного углерода в приводном слое атмосферы сравниваются с результатами, полученными в 10 рейсах научно-исследовательских кораблей в период 2011–2016 гг.

Variations of the black carbon in the Arctic region

V.M. Kopeikin¹ (kopeikin@ifaran.ru), V.P. Shevchenko², G.V. Malafeev²,
A.N. Novigatsky², N.V. Pankratova¹, T.Ya. Ponomareva³, A.I. Skorohod¹, Yu.A. Shtabkin¹

¹A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics RAS, 3 Pyzhevsky per., 119017 Moscow, Russia

²P.P. Shirshov Institute of Oceanology RAS, 36 Nakhimovsky pr., 117997 Moscow, Russia

³Hydrometeorological Research Center of Russia, 11-13 B. Predtechensky per., 123242 Moscow, Russia

Variations of the black carbon (BC) content in the marine boundary layer were obtained in 5 voyages of research ships in the period 2017–2018. The paper presents the results of a study of variations in the black carbon concentrations over the water surface of the Norwegian, Barents, Kara, East Siberian and Laptev seas, as well as the Baltic, White, North Seas and North Atlantic, from June 30 to September 29, 2017 and from June 24 to September 18, 2018 in 68–69 and 71–73 voyages of research vessel “Academik Mstislav Keldysh”. Samples were taken by pumping air for 4–6 hours through quartz filters at an altitude of 10 m above sea level in a headwind to prevent smoke of the vessel from entering the filters. Subsequently the black carbon content was determined in the laboratory by the aetalometric method.

The average soot concentration in the summer-autumn period in the Norwegian, Barents, Kara, Laptev and East Siberian Seas is 95, 63, 43, 17, 62 ng/m³, in the Baltic, White, and North Seas – 141, 53, 87 ng/m³ and 47 ng/m³ in the North Atlantic. The average BC concentration over the water surface of the summer and autumn periods of 2017–2018 in the Barents, Kara, East Siberian seas and the Laptev seas are close – 46 and 54 ng/m³, respectively.

The analysis of the variations of soot concentration using 2-day reverse trajectories of the transfer of air masses was carried out. The backward trajectories of the transfer of air masses and black carbon particles transported by them to the sampling points were calculated using the HYSPLIT (Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory) model on the site <http://www.arl.noaa.gov/ready.html>. The conducted studies show low black carbon concentrations ($< 50 \text{ ng/m}^3$) along the route of the expedition when air masses come from background regions of the North Atlantic and the Arctic. High concentrations of black carbon ($100\text{--}200 \text{ ng/m}^3$ and higher) are characteristic of areas with active navigation (the South-Eastern Baltic, North Sea) and near ports, as well as with the arrival of air masses from industrialized areas of Europe in the South-Eastern Baltic, as well as from areas of oil and gas fields, which carry out the flaring of associated gas (North, Norwegian and Kara Sea).

The data of 2017–2018 on the black carbon content in the atmospheric marine boundary layer are compared with the results obtained on 10 cruises of research vessels in the period 2011–2016.

Моделирование переноса частиц алевритовой фракции в ветропесчаном потоке

Карпов А.В.¹ (karpov@ifaran.ru), Горчаков Г.И.¹, Гушин Р.А.^{1,2}, Даценко О.И.^{1,2}

¹Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Пыжевский пер. 3, 119017 Москва, Россия

²⁴МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, Россия

Опустыненные территории поставляют в атмосферу много пылевого аэрозоля, который заметно влияет на радиационный режим атмосферы. Процессы в ветропесчаном потоке, определяющие вынос в атмосферу песчаной фракции, алевритовой и минеральной пыли изучены недостаточно. Разработана модель динамики сальтирующих частиц алевритовой фракции (10–100 мкм) [1] с учетом аэродинамической силы, подъемной силы и силы Сэфмана [2]. Определены диапазоны изменчивости параметров для разных режимов сальтации с учетом результатов измерений профилей скорости и концентрации частиц в ветропесчаном потоке на опустыненных территориях. Выполнены расчеты траекторий сальтирующих алевритовых частиц для различных значений размера частиц, скорости и направления вылета сальтирующих частиц с подстилающей поверхности, динамической скорости и параметра шероховатости. Получены зависимости высоты и дальности сальтации от основных параметров динамики сальтации.

Проанализированы изменения коэффициента скольжения сальтирующих частиц в процессе переноса [3]. Оценено влияние динамических параметров на среднее значение коэффициента скольжения. Полученные оценки сопоставлены с опубликованными результатами для сальтации песчаной фракции ветропесчаного потока и баллистическим режимом сальтации. Установлены условия, при которых на перенос сальтирующих алевритовых частиц заметно влияют подъемная сила и сила Сэфмана [2].

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 19-05-00758).

1. Горчаков Г.И., Бунтов Д.В., Карпов А.В. и др. Алевритовая фракция ветропесчанного потока // Труды XXIV Межд. Симп. “Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы”. Томск: Изд. ИОА СО РАН. 2018. Эл. ресурс. С. С304–С307.
2. Горчаков Г.И., Карпов А.В., Копейкин В.М. и др. Влияние силы Сэфмана, подъемной силы и электрической силы на перенос частиц в ветропесчаном потоке // Доклады АН. 2016. Т. 467, № 3. С. 336–341.
3. Карпов А.В., Гушин Р.А., Даценко О.И. Анализ вариаций скорости переноса сальтирующих песчинок // Оптика атмосферы и океана. 2017. Т. 30, № 3. С. 227–232.

Simulation of saltating aleurite particle dynamics

A.V. Karpov¹ (karpov@ifaran.ru), G.I. Gorchakov¹, R.A. Gushchin^{1,2}, O.I. Datsenko^{1,2}

¹A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics RAS, 3 Pyzhevsky per., 119017 Moscow, Russia

²MIREA – Russian Technological University, Moscow, Russia

Desertified areas deliver into atmosphere a great deal dust aerosol which influences appreciably on the radiative regime of the atmosphere. Processes in the windsand flux over desertified areas that determine the uplift of sand, aleurite grains and minerals dust in the atmosphere are studied insufficiently. The dynamic model of saltating aleurite particles (10–100 μm) [1] is worked out that takes into account aerodynamic force, lifting force and Saffman force [2]. Saltating parameter variability range was reetermined bearing in mind measurement results of the particle velocity and concentration profiles in the windsand flux at desertified areas. Wind velocity profile parameters were determined for the variations saltation regimes. Calculations of saltating aleurite particle trajectory were carried out for different size particles taking off from the underlying surface considering variations of the wind velocity and initial velocity of particles. Saltation height and distance dependences depending on basic parameters of saltation dynamics were received.

Variations of saltating particle sliding coefficient during the transfer are studied [3]. The influence of dynamic parameters on the average value of the sliding coefficient was estimated. Assessments received were compared with published results for the sand particle saltation in the windsand flux and with ballistic saltation regime. Conditions are ascertained under which the lifting force and Saffman force influence appreciable upon the saltating aleurite particle transport [2].

This work is supported by RFRR (grant № 19-05-00758).

1. Gorchakov G.I., Buntov D.V., Karpov A.V. et al. The aleuritic fraction of wind-flowed sand // Proc. of XXIV International Symposium “Atmospheric and Ocean Optics. Physics of the Atmosphere”. Tomsk: Publ. House of IAO SB RAS. 2018. Electronic resource. P. C304-C307 (in Russian).
2. Gorchakov G.I., Karpov A.V., Kopeikin V.M. et al. Influence of the Saffman force, lift force, and electric force on sand grain transport in a windsand flow // Dokl. Earth Sci. 2016. V. 467, No 1. P. 314–319.
3. Karpov A.V., Gushchin R.A., Datsenko O. I. Analysis of Variations in the Saltating Sand Grain Transport Velocity // Atm. Oceanic Optics. 2017. V. 30, No 5. P. 456–461.

Конденсационная активность аэрозоля в различных атмосферно-оптических ситуациях

Терпугова С.А. (swet@iao.ru), Полькин Вас.В., Чернов Д.Г., Яушева Е.П., Козлов В.С.,
Полькин В.В.

Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, пл. Ак. Зюева 1, 634055 Томск, Россия

По данным многолетних измерений зависимости аэрозольного коэффициента рассеяния от относительной влажности воздуха в приземном слое атмосферы на окраине г. Томска анализируется изменчивость параметра конденсационной активности и типа гигрограмм в зависимости от типа «аэрозольной погоды». Для каждого сезона были выделены четыре массива, характеризующиеся различным состоянием аэрозоля: «фон», «дымка», «городской смог» и «дымовая мгла», различающиеся по уровню концентраций аэрозоля и сажи. Рассмотрены особенности конденсационной активности аэрозоля при каждом типе замутнения. В частности, показано, что фазовые переходы при увлажнении наблюдаются при значениях коэффициента рассеяния $\leq 100 \text{ Мм}^{-1}$. В более замутненных ситуациях (смог и дымовая мгла) фазовые переходы отсутствуют.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского Научного Фонда, грант № 19-77-20092.

Aerosol condensation activity under different atmospheric-optical conditions

S.A. Terpugova, Vas.V. Polkin, D.G. Chernov, E.P. Yausheva, V.S. Kozlov, V.V. Polkin
V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics SB RAS, 1 Ac. Zuev sq., 634055 Tomsk, Russia

Variability of the parameter of aerosol condensation activity and the type of a hygrogram depending on “aerosol weather” is analyzed on the basis of the data of long-term measurements of the aerosol scattering coefficient as function of relative humidity of air in the near-ground atmospheric layer at the vicinity of the city of Tomsk. Four data arrays characterized by different aerosol state were selected for each season: “background”, “haze”, “smog”, and “smoke haze”. The arrays differ in the level of concentrations of aerosol and soot. The peculiarities of aerosol condensation activity in each type of haze are considered. In particular, it is shown that phase transitions during humidification are observed only at the values of the aerosol scattering coefficient $\leq 100 \text{ Mm}^{-1}$, and are absent in more turbid situations (“smog” and “smoke haze”).

The work was supported by Russian Science Foundation under grant No. 19-77-20092.

Формирование и эволюция новых частиц в большом изолированном объеме

Романов Н.П.¹ (vernik@rpatyphoon.ru), Ераньков В.Г.¹, Палей А.А.²

¹НПО «Тайфун», ул. Победы 4, 249038 Обнинск, Россия

²Государственный океанографический институт им. Н.Н. Зубова, Кропоткинский пер. 6, 119034 Москва, Россия

В докладе сообщается об обнаружении факта практически обязательного появления новых частиц (NP – new particles) нанометрового диапазона после очистки уличного воздуха от аэрозолей. Это явление было обнаружено и исследовано в Большой Аэрозольной Камере (БАК) НПО “Тайфун” объемом 3200 м^3 в условиях полной темноты и отсутствия источников ионизирующих излучений при заполнении ее пропущенным через высокоэффективный аэрофильтр класса HEPA13 внешним воздухом. Оно состоит в том, что практически всегда в течение 0.5–1 часа после окончания процесса заполнения начинают фиксироваться новые частицы с размерами выше нижнего порога (15 нм) используемого прибора SMPS фирмы TSI. Примерно через сутки эти частицы формируют узкие колоколообразного вида спектры со счетной концентрацией до 104 см^{-3} и массовой концентрацией до 0.6 мкг/м^3 . В последующие несколько суток (до 5 и более) спектры NP эволюционируют за счет Броуновской коагуляции при сохранении асимптотической формы, которая для летне-осенних условий характеризуется относительной дисперсией $rb \sim 0.28$ ($rb = \text{relative breath}$) и относительной асимметрией $ras = 2$ ($ras = \text{skewness}/rb$). Значение $ras = 2$ определяет аналитическое описание спектров в виде гамма-распределения. При дополнительной очистке воздуха с NP при помощи внутреннего HEPA13 фильтра концентрация аэрозоля в БАК доводится до нескольких частиц в см^3 , которая остается таковой в течение недели и более. Эта ситуация показывает, что на описанном выше этапе происходит полное преобразование конверсионных газов, которые проходят через внешний H13 фильтр, в аэрозольную компоненту. Отсюда следует также вывод, что измеренная изложенным выше способом массовая концентрация NP определяет и массовую концентрацию конверсионных газов, имеющую место в момент заполнения БАК.

Для подтверждения роли формирования NP из постоянно возобновляемых конверсионных газов была исследована эволюция атмосферных аэрозольных спектров при изоляции в БАК нефильтрованной воздушной массы. При этом оказалось, что примерно через 10 часов в спектре аэрозоля исчезает часть с размерами менее $\approx 20 \text{ нм}$, а через несколько суток формируется асимптотическая колоколообразная форма спектров с $rb \approx 0.4$ – 0.5 и $ras = 2$ – 3 . Примерно через 5 суток модальный диаметр становится примерно равным 150 нм , а исходная форма спектра для частиц размерами более 200 нм сохраняется. Из

результатов этого исследования делается вывод о том, что частицы больше 200 нм имеют время жизни не менее 5-ти суток, а частицы менее 15 нм – не более 10-ти часов.

Изложенные выше закономерности формирования НР и эволюции спектров существующих аэрозолей могут дать существенную информацию для познания процессов формирования атмосферных аэрозолей, ответственных за формирование облаков и осадков. Они должны также учитываться в разработке технологий очистки жилых и производственных помещений.

The formation and evolution of new particles in a large isolated volume

N.P. Romanov¹ (vernik@rpatyphoon.ru), V.G. Erankov¹, A.A. Paley²

¹Research and Production Association «Typhoon», Pobedy str. 4, 249038 Obninsk, Russia

²N.N. Zubov State Oceanographic Institute, 6 Kropotkinsky per., 119034 Moscow, Russia

The report refers to the discovery of the appearance of new particles (NP) of nanometer range after purification of street air from aerosols. This phenomenon was detected and investigated in Big Aerosol Chamber (BAC) of RPA "Typhoon" with a volume of 3200 m³, in total darkness and the absence of sources of ionizing radiation when filling it with external air passed through a highly efficient HEPA13 class air filter. New particles with sizes above the lower measurement threshold (15 nm) of the used SMPS (TSI) device begin to register within 0.5–1 hour after the end of the cleaning process. After about a day, these particles form narrow bell-like spectrum of size distribution with a calculated concentration of up to 104 cm⁻³ and a mass concentration of up to 0.6 µg/m³. In the next few days (5 and more), the NP spectra evolve due to Brownian coagulation while maintaining the asymptotic form, which for summer-autumn conditions is characterized by relative breadth (coefficient of variation) $rb \sim 0.28$ and relative asymmetry $ras \approx 2$ ($ras = skewness/rb$). The spectrum characterized by the value $ras = 2$ corresponds to the gamma distribution. After re-cleaning the air from the emerging NP with the help of an internal HEPA13 filter, the aerosol concentration in the BAC is reduced to several particles in cm³, and remains so for a week or more. This situation shows that at the stage described above, the conversion gases that pass through the external H13 filter are fully converted into an aerosol component. Therefore, the mass concentration of NP measured by the above method also determines the mass concentration of conversion gases that takes place at the time of filling the BAC.

To confirm the role of NP formation from constantly renewable conversion gases, the evolution of atmospheric aerosol spectrum was investigated in the case of isolation of unfiltered air mass into the BAC. At the same time, it has been found that after about 10 hours in the aerosol spectrum the part with sizes less than 20 nm disappears, and in a few days an asymptotic bell-like shape with $rb \approx 0.4-0.5$ and $ras = 2-3$ is formed. After about 5 days, the modal diameter becomes approximately 150 nm, and the initial shape of the spectrum for particles larger than 200 nm is preserved. It is concluded that particles greater than 200 nm have a lifetime of at least 5 days, and particles less than 15 nm – no more than 10 hours.

The considered regularities of particle formation and evolution of spectra of existing aerosols can provide essential information for the knowledge of the processes of formation of atmospheric aerosols, from which clouds and precipitation are subsequently formed. They should also be taken into account in the development of residential and industrial air purification technologies.

Совместное восстановление микрофизических характеристик аэрозоля по данным зондирования многочастотным лидаром

Самойлова С.В. (ssv@seversk.tomsknet.ru), Пеннер И.Э., Коханенко Г.П., Балин Ю.С.

Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, пл. Ак. Зueva 1, 634055 Томск, Россия

С апреля 2006 года в Томске (56° N, 85° E) проводятся регулярные лидарные измерения в рамках проекта CIS-LiNet. Измерения позволяют оценивать вертикальные профили

параметров тропосферного аэрозоля – коэффициентов ослабления (355, 532 нм; только темное время суток) и обратного рассеяния (355, 532, 1064 нм; любое время суток), а также деполяризационного отношения (532 нм; любое время суток). Спектральный набор оптических параметров и уровень погрешностей их оценивания дают возможность определить вертикальное изменение микрофизических характеристик аэрозоля, комплексного показателя преломления, CRI и $m = m_{real} + i \cdot m_{image}$, и функции распределения аэрозольных частиц по размерам, SDF или $U(r)$. Для оценки CRI+SDF существует две серьезные проблемы: 1) смещение SDF для грубодисперсной фракции даже при известном CRI; 2) неоднозначность m даже при известной $U(r)$. Восстановление SDF сводится к обращению системы линейных алгебраических уравнений, решение которой требует аккуратного выбора матрицы регуляризации [1]. Вторая проблема обусловлена нелинейной связью показателя преломления и с оптическими коэффициентами, и с $U(r)$. В общем виде решение сводится к прямой минимизации функционала невязки на всей плоскости физически обоснованных значений (m_{real} , m_{image}). Для лидара вторая проблема проявляется в ограниченной области поглощения, при $0.015 \leq m_{image} \leq 0.035$, когда для обеих составляющих CRI есть вероятность значимых ошибок, что может привести, в частности, к деформации параметров SDF. Совмещение нескольких, различных по набору оптических коэффициентов, функционалов сужает область допустимых значений m и дает более точную оценку микрофизических характеристик [2].

В настоящем исследовании представлены результаты интерпретации 66 ночных сеансов лидарных измерений. Для Западной Сибири тип воздушной массы в верхней части PBL (выше верхней границы слоя перемешивания, т.н. «слой вовлечения») и свободной тропосфере (СТ) определяются дальним горизонтальным переносом из различных географических регионов. Высокие значения северо-западного (из Северной Европы и Атлантики, 75% PBL, 49% СТ) и низкие значения юго-западного (из Южной Европы и Средиземного моря, 9% PBL, 32% СТ) направлений проявляются и для лидарного отношения, и для параметров Ангстрема, и для вклада мелкодисперсной фракции в суммарную объемную концентрацию частиц. Средний радиус мелких частиц и мнимая часть показателя преломления, напротив, возрастают при изменении направления с севера на юг. Ниже верхней границы слоя перемешивания PBL обусловлен сочетанием двух механизмов: 1) оседанием «принесенного» аэрозоля в любое время суток; 2) утренним подъемом + дневным/вечерним перемешиванием «местного» аэрозоля в светлое время суток. Очевидно, что вертикальное распределение CRI подлежит дальнейшему изучению и поиску связи с процессами, определяющими состав аэрозоля на различных высотах.

Работа выполнена при частичной поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, грант No 18-55-81001.

1. Samoilova S.V., Sviridenkov M.A., and Penner I.E. Retrieval of the particle size distribution function from the data of lidar sensing under the assumption of known refractive index // Appl. Opt. 2016. V. 55, No 28. P. 8022–8029.
2. Samoilova S.V., Penner I.E., Kokhanenko G.P., and Balin Y.S. Simultaneous reconstruction of two microphysical aerosol characteristics from the lidar data // JQSRT. 2019. V. 222–223. P. 35–44.

Joint retrieval of the aerosol microphysical characteristics from data of multi-wavelength lidar sensing

S.V. Samoilova (ssv@seversk.tomsknet.ru), I.E. Penner, G.P. Kokhanenko, Yu.S. Balin
V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics SB RAS, 1 Ac. Zuev sq., 634055 Tomsk, Russia

Regular lidar measurements in the frameworks of the CIS-LiNet project are carried out in Tomsk (56° N, 85° E) since April 2006. The measurements allow estimating the vertical profiles of the tropospheric aerosol parameters, such as extinction coefficients (355 and 532 nm, only nighttime) and backscattering coefficients (355, 532, and 1064 nm, round-the-clock), as well as depolarization ratio (532 nm, round-the-clock). The spectral set of the optical parameters and the levels of the errors in their estimating make it possible to determine vertical variations of the aerosol

microphysical characteristics, complex refractive index, CRI, or $m = m_{real} + i \cdot m_{image}$, and the aerosol size distribution function, SDF or $U(r)$. There are two major bottlenecks in determining CRI + SDF: 1) a biased retrieval of SDF parameters for the coarse fraction even in the cases of a known refractive index and 2) an uncertainty in reconstructing m even for a known $U(r)$. The solution of the first problem provides an accurate selection of the regularization method for the SDF retrieval [1]. An estimation of the refractive index is a more complicated problem, because the relationship between CRI and both optical coefficients and SDF is not linear. In general form, the solution is reduced to direct minimization of the discrepancy functional at the whole plane of physically justified values (m_{real} , m_{image}). The second problem for the lidar shows itself in a limited area of absorption at $0.015 \leq m_{image} \leq 0.035$, when there is a probability of significant errors in both components of CRI. It can lead, in particular, to deformation of the SDF parameters. Combination of several functionals of different set of optical coefficients narrows the range of permissible values of m and gives a more accurate estimate of the microphysical characteristics [2].

Here we present the results of interpretation of 66 séances of nighttime lidar measurements. The type of air mass in Western Siberia in the upper part of PBL (above the upper boundary of mixing layer, so-called “engagement layer”) and the free troposphere (FT) are determined by remote horizontal transfer from different geographical regions. High values for the north-west (from Northern Europe and Atlantic, 75% PBL, 49% FT) and low values for the south-west (from Southern Europe and Mediterranean Sea, 9% PBL, 32% FT) directions are observed both for the lidar ratio, for the Ångström exponent, and for the contribution of fine fraction into the total volume concentration of particles. On the contrary, the mean radius of fine particles and the imaginary part of the refractive index increase at the change of direction from north to south. PBL under the upper boundary of mixing layer is caused by combination of two mechanisms: 1) sedimentation of “transferred” aerosol round-the-clock; and 2) lift before noon and mixing in the afternoon of the “local” aerosol only in the daylight time. Obviously, vertical distribution of CRI is subject for further study and search for relations with the processes determining the aerosol composition at different altitudes.

The work was supported in part by Russian Foundation for Basic Research under grant No 18–55–81001.

1. Samoilova S.V., Sviridenkov M.A., and Penner I.E. Retrieval of the particle size distribution function from the data of lidar sensing under the assumption of known refractive index // *Appl. Opt.* 2016. V. 55, No 28. P. 8022–8029.
2. Samoilova S.V., Penner I.E., Kokhanenko G.P., and Balin Y.S. Simultaneous reconstruction of two microphysical aerosol characteristics from the lidar data // *JQSRT*. 2019. V. 222–223. P. 35–44.

Изменчивость параметров Ангстрема для коэффициентов аэрозольного ослабления, поглощения и рассеяния в видимой и ближней ИК области спектра по данным измерений на Аэрозольных станциях ИОА СО РАН в 1997–2018 гг.

Яушева Е.П. (helen@iao.ru), Козлов В.С., Ужегов В.Н.

Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, пл. Ак. Зюева 1, 634055 Томск, Россия

Особенности временной изменчивости концентраций субмикронного аэрозоля и поглощающего вещества (Black Carbon и Brown Carbon) в частицах в условиях фоновой и задымленной лесными пожарами атмосферы являются в последние десятилетия предметом тщательного изучения в различных географических районах. Актуальность задачи возрастает, поскольку Black Carbon по радиационно-климатическому воздействию сопоставим с основным парниковым газом CO₂. Большое внимание уделяется изучению изменчивости параметров Ангстрема для аэрозольного ослабления, рассеяния и поглощения в УФ-ближнем ИК диапазонах спектра с целью разработки методик определения вклада в поглощающее аэрозольное вещество черного и коричневого углерода, эмитируемых природными и антропогенными процессами горения биомассы и углеводородных топлив.

Круглосуточные измерения спектрального пропускания атмосферы на горизонтальной трассе длиной 1 км проводились трассовым измерителем прозрачности атмосферы на Аэрозольной станции ИОА СО РАН (в пригородном районе г.Томска) в теплый период года с марта по октябрь в 1997–2018 гг. Массив коэффициентов аэрозольного ослабления $\beta(\lambda)$ получен для диапазона длин волн $\lambda = 0.45\text{--}3.9$ мкм. Из всего массива данных был выделен подмассив, соответствующий дымовым ситуациям (более 1000 реализаций). Для описания изменчивости спектральной зависимости коэффициентов аэрозольного ослабления выбрано выражение: $\beta(\lambda) = \beta_0 + \beta_1 \lambda^{-\alpha}$. Получены средние за весь период наблюдений эмпирические параметры β_0 , β_1 и α_{ex} в зависимости от метеорологической дальности видимости $S_m = 3.9/\beta(0.55)$. Для задымленной атмосферы при уменьшении величины S_m от 10 до 1 км параметр β_0 , связанный с ослаблением оптического излучения грубодисперсным аэрозолем, увеличивался от 0.06 до 0.5 км⁻¹. Параметр β_1 , зависящий от ослабления радиации субмикронным аэрозолем, на длине волны 1 мкм варьировал в пределах 0.005 ÷ 0.03 км⁻¹. Параметр Ангстрема α_{ex} , показывающий изменения функции распределения субмикронного аэрозоля по размерам, менялся от 1.45 до 2.3. Для относительно чистой атмосферы при уменьшении величины S_m от 50 до 5 км параметр β_0 изменялся в диапазоне 0.045 ÷ 0.3 км⁻¹, параметр β_1 – 0.018 ÷ 0.25 км⁻¹, а параметр α_{ex} – 1.40 ÷ 1.53.

По данным мониторинговых измерений на Аэрозольной станции в 2010–2018 гг. коэффициентов аэрозольного поглощения, измеряемых аэталометром МДА на $\lambda = 0.46, 0.53$ и 0.63 мкм, исследована сезонная динамика среднемесячных значений параметра Ангстрема α_{abs} для аэрозольного поглощения. Текущие данные Аэрозольной станции доступны по сети Internet (<http://aerosol.iao.ru/>). Среднемесячные значения α_{abs} варьируют от 1 в зимний период до 2.6 – в летний. Область зимних значений $\alpha_{abs} \sim 0.9\text{--}1.2$ соответствует поглощению сажевыми частицами высокотемпературного горения топлив. Летний рост α_{abs} до $\sim 2\text{--}2.6$ обусловлен увеличением содержания в аэрозоле Brown Carbon, интенсивно генерируемого при низкотемпературном горении (тлении) биомассы. Установлено, что максимумы α_{abs} в мае–октябре соответствуют поступлению шлейфов дымов сибирских лесных пожаров.

На основе мониторинговых измерений коэффициента рассеяния нефелометром ФАН-М на $\lambda = 0.46, 0.53, 0.59$ и 0.63 мкм в 2015–2018 гг. в обсерватории «Фоновой», расположенной в фоновых условиях в 60 км западнее г. Томска, сделаны оценки сезонной и межгодовой изменчивости параметра Ангстрема α_{sc} для коэффициентов аэрозольного рассеяния.

Работа выполнена при поддержке Российского Научного Фонда (грант № 19-77-20109).

The variability of the Angstrom exponent for aerosol coefficients of extinction, absorption and scattering in the visible and near IR spectral regions according to measurements at Aerosol stations of the IAO SB RAS in 1997–2018

E.P. Yausheva (helen@iao.ru), V.S. Kozlov, V.N. Uzhegov
V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics SB RAS, 1 Ac. Zuev sq., 634055 Tomsk, Russia

The peculiarities of temporal variability of concentrations of submicron aerosol and its absorbing substance (Black Carbon and Brown Carbon) in particles under conditions of the background and smoke-filled with forest fires atmospheres have been the subject of careful study in various geographical areas in recent decades. The urgency of the task is increasing as Black Carbon is comparable to the main greenhouse gas CO₂ in the radiation-climatic impact. Much attention is paid to studying the variability of Angstrom exponent for the aerosol coefficients of extinction, absorption and scattering in the spectral range from UV to near IR for the purpose of development of techniques for determining the contribution to the absorbing matter of aerosol due to the black and brown carbon emitted by natural and anthropogenic processes of the biomass and hydrocarbon fuels burning.

The round-the-clock measurements of spectral transmittance of the atmosphere on the horizontal track 1 km long carried out by the route measuring instrument of transparency of the

atmosphere at the Aerosol Station of the IAO SB RAS (in a suburban area of Tomsk) during the warm period of year from March to October in 1997–2018. An array of aerosol extinction coefficients $\beta(\lambda)$ is obtained for the wavelength range $\lambda = 0.45\text{--}3.9\text{ }\mu\text{m}$. A subarray corresponding to the smoke situations (more than 1000 realizations) was selected from the entire data array. The expression $\beta(\lambda) = \beta_0 + \beta_1 \lambda^{-\alpha}$ was chosen to describe the variability of spectral dependence of aerosol extinction coefficients. The empirical parameters β_0 , β_1 and α_{ex} , depending on the meteorological visibility range $S_m = 3.9/\beta(0.55)$, have been received for the whole period of observation. For the smoke-filled atmosphere while decreasing the value of S_m from 10 to 1 km, the parameter β_0 , associated with extinction of optical radiation by a coarse aerosol, increased from 0.06 to 0.5 km^{-1} . The parameter β_1 , depending on the extinction of radiation by submicron aerosol at a wavelength of 1 μm , varied within $0.005 \div 0.03\text{ km}^{-1}$. The angstrom exponent α_{ex} , connected with changes of the submicron aerosol size distribution, varied from 1.45 to 2.3. For relatively clean atmosphere, with decrease of S_m from 50 to 5 km the parameter β_0 changed in the range $0.045 \div 0.3\text{ km}^{-1}$, the parameter $\beta_1 = 0.018 \div 0.25\text{ km}^{-1}$ and the parameter $\alpha_{ex} = 1.40 \div 1.53$.

According to the monitoring measurements of the aerosol absorption coefficients at the Aerosol Station in 2010–2018, registered by the MDA aetalmeter at $\lambda = 0.46, 0.53$ and $0.63\text{ }\mu\text{m}$, the seasonal and interannual dynamics of the monthly mean values of the Angstrom exponent α_{abs} for aerosol absorption were investigated. The current data of the Aerosol Station are available on the Internet (<http://aerosol.iao.ru/>). Monthly mean values α_{abs} range from 1 in winter to 2.6 in summer. The area of winter values $\alpha_{abs} \sim 0.9\text{--}1.2$ corresponds to the absorption by the black carbon particles of high-temperature flame combustion of fuels. The summer growth of α_{abs} up to 2–2.6 is connected with an increase of the content of Brown Carbon aerosol, which is intensively generated during low-temperature burning (smoldering) of forest combustible biomass. It had been established that maxima of α_{abs} in May–October correspond to the entry of smoke plumes from Siberian forest fires.

Based on the monitoring measurements of the submicron aerosol scattering coefficient by nephelometer FAN-M at $\lambda = 0.46, 0.53, 0.59$ and $0.63\text{ }\mu\text{m}$ in 2015–2018 at the observatory "Fonovaya", located in the background area 60 km west of Tomsk, the detailed estimates are made of the seasonal and interannual variability of the Angstrom exponent α_{sc} for aerosol scattering.

This work was supported by the Russian Science Foundation (grant № 19-77-20109).

Исследование аэрозольно-радиационных характеристик атмосферы по данным наземного и спутникового мониторинга над Азиатской территорией России

Плахина И.Н. (inna@ifaran.ru), Репина И.А.

Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Пыжевский пер. 3, 119017 Москва, Россия

В докладе представлены результаты анализа вариаций годовых, сезонных, и суточных значений аэрозольной оптической толщины атмосферы (АОТ) в поствулканический период 1999–2016 гг.: рассмотрены наблюдения наземной сети АЭРОНЕТ (<http://aeronet.gsfc.nasa.gov>) и спутниковые данные Terra/MODIS (<http://modis.gsfc.nasa.gov>). Основа эмпирического массива – База Данных (БД) [1]. БД предназначена для выполнения работ по оценке и анализу временных изменений АОТ на территории РФ, оценки сопоставимости разных видов мониторинга АОТ и сформирована нами в рамках проекта РФФИ № 15-05-05803 « Исследование согласованности данных наземного и спутникового мониторинга прозрачности, аэрозольной оптической толщины атмосферы на территории России».

Статистические оценки временных изменений АОТ, а также сопоставимости вариаций наземных и спутниковых данных проведены для 4-х станций наблюдения БД на АТР: Екатеринбург, Иркутск, Якутск и Усурийск, расположенных в диапазоне от 43 до 62 градусов по широте и в диапазоне изменения долготы от 56 до 132 градусов. Кроме того,

были привлечены данные измерений на полярной гидрометеорологической обсерватории Тикси (71.69° с.ш., 128.87° в.д.), входящей в международную сеть станций мониторинга климата Арктики IASOA. Приходящее к земной поверхности солнечное излучение, являющееся важным фактором формирования и изменения климата и характеризующееся как «global dimming» и «global brightening» (уменьшение и увеличение приходящей радиации), оценивалось и анализировалось по данным реанализов NCEP/DOE AMIP-II Reanalysis для регионов, соответствующих сетке наземных станций наблюдения. Привлечены также архивные данные по радиационному балансу рассмотренных регионов.

1. БД "Аэрозольная оптическая толщина атмосферы по спутниковым и наземным наблюдениям". 2018. Свидетельство о государственной регистрации № 2018620215 в Федеральной службе по интеллектуальной собственности.

Investigation of the aerosol-radiation characteristics of the atmosphere using ground-based and satellite monitoring over the Asian territory of Russia

I.N. Plakhina (inna@ifaran.ru), I.A. Repina

A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics RAS, 3 Pyzhevsky per., 119017 Moscow, Russia

The report presents results of the analysis of variations in annual, seasonal, and daily values of the aerosol optical thickness of the atmosphere (AOT) during the post-volcanic period of 1999–2016. Observations of ground-based AERONET network (AEROSOL ROBOTIC NETWORK), (<http://aeronet.gsfc.nasa.gov>) and Terra/MODIS satellite data (<http://modis.gsfc.nasa.gov>) were used. The basis of the empirical array is a Database (DB) [1]. The Database is designed to perform the assessment and analysis of AOT temporary changes in the territory of the Russian Federation, assessing the comparability of different types of AOT monitoring. It was formed in the framework of the RFBR project No. 15-05-05803 "The study of the consistency of data from ground-based and satellite monitoring of the atmosphere, aerosol optical thickness of the atmosphere the territory of Russia".

Statistical estimates of the AOT time changes, as well as the comparability of ground and satellite data variations were carried out for four DB observation stations on the ATR: Yekaterinburg, Irkutsk, Yakutsk and Ussuriysk located in the range from 43 to 62 degrees in latitude and in the range of longitude variation from 56 up to 132 degrees. In addition, we used measurements at the Tiksi polar hydrometeorological observatory (71.69° N, 128.87° E), which is part of the international network of climate monitoring stations in the Arctic IASOA. Solar radiation coming to the earth's surface, which is an important factor in the climate formation and change and which is characterized as "global dimming" and "global brightening" (a decrease and increase in incoming radiation), was estimated and analyzed according to the AMEP-II Reanalysis for regions corresponding to the grid of ground observation stations. Archival data on the radiation balance of the regions examined were also attracted.

1. DB "Aerosol optical thickness of the atmosphere by satellite and ground observations". 2018. State Registration Certificate № 2018620215 in the Federal Service for Intellectual Property.

Возможное влияние переноса черного углерода от лесных пожаров на изменение альbedo поверхности и баланс коротковолновой радиации в Арктическом регионе

Гинзбург В.А. (veronika.ginzburg@gmail.com), Кострыкин С.В., Корнева И.А., Бардин М.Ю., Коротков В.Н., Черненко А., Полумиева П.Д., Лытов В.М., Зеленова М.С.
Институт глобального климата и экологии им. Ю.А. Израэля, ул. Глебовская 20Б, 107258 Москва

Целью данной работы является оценка возможного влияния переноса черного углерода от лесных пожаров в России на изменение альbedo и радиационного баланса поверхности в Арктическом регионе. В работе рассмотрены основные механизмы влияния черного

углерода на климат Арктики, такие как поглощение приходящей коротковолновой радиации в столбе атмосферы и изменение альbedo снега и льда. Проанализированы основные источники антропогенных выбросов черного углерода и выбросы от лесных пожаров на территории России, выделены регионы и источники, от которых возможное влияние переноса черного углерода может быть существенным для арктического региона. Показано, что основное влияние на арктический регион могут оказывать выбросы черного углерода от стационарного сжигания топлива, морского транспорта, внедорожных транспортных средств и сжигания на факелах попутного нефтяного газа. Существенный вклад вносят также выбросы от лесных пожаров.

С помощью климатической модели ИВМ и однослойной радиационной модели проведена оценка влияния черного углерода на изменение альbedo и радиационного баланса снежно-ледовой поверхности. Показано, что после крупных лесных пожаров поглощение коротковолновой радиации в столбе атмосферы в Арктике может увеличиваться на 3–5%, а суммарное влияние антропогенных источников черного углерода на уменьшение альbedo снежной поверхности в арктическом регионе составляет 1–2 %.

Проведена проверка гипотезы о связи экстремальных лесных пожаров на территории России и особенно резкого уменьшения площади арктического льда в 2005, 2007 и 2012 гг. По данным мониторинга лесных пожаров, ни в 2005, ни в 2007 году на территории РФ не было зафиксировано крупных пожаров. В 2012 г. такие пожары были в Амурской области, республике Саха (Якутия) и в Красноярском крае, однако анализ меридиональной составляющей атмосферного переноса в летние месяцы 2012 года, показал, что условия атмосферной циркуляции не благоприятствовали переносу черного углерода на север, т.к. в полосе долгот от 80 до 150° в.д., где наблюдались пожары, ветер имел преимущественно выраженную составляющую, направленную к югу. Таким образом, роль черного углерода, по крайней мере, от лесных пожаров на территории России в быстром сокращении ледяного покрова Арктики преувеличена.

Possible impact of black carbon atmospheric transport from forest fires on albedo and short-wave radiation balance in the Arctic region

V.A. Ginzburg (veronika.ginzburg@gmail.com), S.V. Kostykin, I.A. Korneva, M.Yu. Bardin, A. Cherenkov, V.N. Korotkov, P.D. Polumieva, V.M. Lytov, M.S. Zelenova
Yu.A. Izrael Institute of Global Climate and Ecology, 20b Glebovskaya str., 107258 Moscow, Russia

The aim of this work is to assess the possible impact of black carbon atmospheric transport from forest fires in Russia on albedo and short-wave radiation balance in the Arctic region. Main mechanisms of black carbon influence on radiation balance and climate in Arctic, such as the absorption of incoming short-wave radiation in the atmospheric column and changes in the albedo of snow and ice, are reviewed in this study. The main sources of anthropogenic black carbon emissions and emissions from forest fires in Russia are analyzed. Also, the regions and sources from which the possible impact of black carbon transport can be significant for the Arctic region are identified. It is shown that the main impact on the Arctic region can have black carbon emissions from stationary combustion of fuel, marine transport, off-road vehicles and flaring associated petroleum gas. Emissions from forest fires also make a significant contribution.

The influence of black carbon on the change of albedo and the radiation balance of the snow-ice surface was estimated using the climate model of INM and the single-layer radiation model. It is shown that after large forest fires, the absorption of short-wave radiation in the atmosphere column in the Arctic can increase by 3–5%, and the total effect of anthropogenic sources of black carbon on the reduction of albedo of the snow surface in the Arctic region is 1–2%.

The hypothesis of the influence of extreme forest fires in Russia on rapid reduction of the Arctic ice area in 2005, 2007, 2012 was tested. According to the monitoring of forest fires, there were no intensive fires neither in 2005 nor in 2007 in the territory of the Russian Federation. In 2012 there were intensive fires in the Amur region, the Republic of Sakha (Yakutia) and the

Krasnoyarsk territory. However, the analysis of the meridional component of the atmospheric transport in the summer months of 2012, has shown that the conditions of the atmospheric circulation is not conducive to the transport of black carbon to the North. Thus, the role of black carbon, at least from forest fires in Russia in the rapid reduction of the Arctic ice cover is overestimated.

Программное обеспечение для быстрого вычисления индикатрис рассеяния и визуализации оптических явлений в атмосферной облачности

Заковряшин А.В.¹ (andrey.z.1993@mail.ru), Пригарин С.М.^{1,2}

¹Новосибирский государственный университет, ул. Пирогова 2, 630090 Новосибирск, Россия

²Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, пр. Ак. Лаврентьева, 6, 630090 Новосибирск, Россия

Целью данной работы является создание численных алгоритмов и программного обеспечения для вычисления индикатрис рассеяния видимого излучения в полидисперсных средах, состоящих из сферических частиц, а также исследование влияния распределения капель воды на облачные индикатрисы рассеяния на основе математического моделирования. Такие оптические явления, как радуги, глории и венцы, возникают в результате рассеяния солнечного света на каплях воды. При однократном рассеянии солнечного света данные оптические явления могут быть описаны индикатрисой рассеяния [1], которая вычисляется на основе теории Ми [2].

Разработанное программное обеспечение позволяет вычислять индикатрисы рассеяния для облаков и туманов с произвольным распределением капель воды, а также на их основе строить изображения соответствующих оптических явлений [3]. Для получения более реалистичных изображений оптических явлений используется стохастическое моделирование методом Монте-Карло угловых распределений излучения, рассеянного облачным слоем, с учётом многократного рассеяния.

1. Deirmendjian D. Electromagnetic Scattering on Spherical Polydispersions. New York: American Elsevier, 1969.
2. Mie G. Beiträge zur Optik trüber Medien, speziell kolloidaler Metallösungen // Ann. Phys. 1908. V. 330. 377–445.
3. Prigarin S.M., Kablukova E.G., Rozhenko S.A., Zakovryashin A.V. Monte Carlo simulation of halos, glories, coronas and multiple scattering of light // Proc. SPIE. 2017. V. 10466. 104661K.

Fast software for computing phase functions and visualization of optical phenomena in atmospheric clouds

A.V. Zakovryashin¹ (andrey.z.1993@mail.ru), S.M. Prigarin^{1,2}

¹Novosibirsk State University, 2 Pirogova str., 630090 Novosibirsk, Russia

²Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS, 6 Ak. Lavrentjev pr., 630090 Novosibirsk, Russia

This study is aimed at developing numerical algorithms and fast software for calculating the phase functions of visible radiation in polydisperse media consisting of spherical particles, as well as at studying the influence of distribution of water drops on the cloud phase functions based on mathematical modeling. Such optical phenomena as rainbows, glories and coronas arise due to the nature of the light scattering by water drops. The single scattering of light in clouds is described by the phase function [1], which can be calculated based on the Mie theory [2].

The software developed allows one to compute the phase functions for clouds and fogs with an arbitrary distribution of water drops, and, also, makes possible to perform the computer visualization of the corresponding optical phenomena with the use of the calculated phase functions [3]. To obtain the realistic images of halos, glories and coronas, we have applied Monte Carlo

stochastic simulation of the angular distributions of the radiation scattered by a cloud layer, taking into account the multiple scattering.

1. Deirmendjian D. Electromagnetic Scattering on Spherical Polydispersions. New York: American Elsevier. 1969.
2. Mie G. Beiträge zur Optik trüber Medien, speziell kolloidaler Metallösungen // Ann. Phys. 1908. V. 330. 377–445.
3. Prigarin S.M., Kablukova E.G., Rozhenko S.A., Zakovryashin A.V. Monte Carlo simulation of halos, glories, coronas and multiple scattering of light // Proc. SPIE. 2017. V. 10466. 104661K.

Локальные эффекты длинноволнового аэрозольного поглощения в период дымной мглы в московском регионе летом 2010 г.

Горчакова И.А.¹ (Gorchakova@ifaran.ru), Мохов И.И.^{1,2}

¹Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Пыжевский пер. 3, 119017 Москва, Россия

²Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, физ. факультет, Ленинские горы 1, 119991 Москва, Россия

Крупномасштабные задымления в связи с лесным и торфянным пожарами сильно влияют на режим солнечной и тепловой радиации в атмосфере [1–3]. Получены оценки длинноволнового аэрозольного радиационного форсинга на поверхности и на верхней границе безоблачной атмосферы для дымной мглы 2010 г. в московском регионе. Потоки тепловой инфракрасной радиации в атмосфере рассчитывались с использованием интегральной функции пропускания и полуэмпирической модели аэрозоля, адаптированной к условиям задымления московского региона. При расчетах интегральной функции пропускания учитывается поглощение углекислым газом, водяным паром, озоном и аэрозолем [4, 5].

В случае оптически плотной дымной мглы радиационный форсинг тепловой радиации на нижней границе атмосферы превышал 30 Вт/м^2 , что существенно меньше соответствующего форсинга для коротковолновой солнечной радиации. На верхней границе атмосферы радиационный форсинг тепловой радиации был порядка 1 Вт/м^2 . Скорость нагревания приповерхностного слоя дымового аэрозоля, обусловленного длинноволновым поглощением, в период наибольшего задымления атмосферы достигала 0.2 С/час (при высоте верхней границы приземного дымового слоя 400 м). Оценена чувствительность радиационных форсингов к вариациям аэрозольной оптической толщины (длина волны 550 нм) и к вариациям интегрального коэффициента поглощения аэрозоля.

1. Мохов И.И., Горчакова И.А. Радиационный и температурный эффекты летних пожаров 2002 г. в московском регионе // Доклады АН. 2005. Т. 400, № 4. С. 528–531.
2. Горчакова И.А., Мохов И.И. Радиационный и температурный эффекты дымового аэрозоля в московском регионе 2010 г. // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2012. Т. 48, № 5. С. 558–565.
3. Горчакова И.А., Мохов И.И., Аникин П.П., Емиленко А.С. Радиационный и температурный эффекты длинноволнового поглощения дымового аэрозоля при пожарах в московском регионе летом 2010 г. // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2018. Т. 54, № 2. С. 175–183.
4. Feigelson E.M., Fomin B.A., Gorchakova I.A. et al. Calculation of longwave radiation fluxes in atmospheres // J. Geophys. Res. 1991. V. 96, No D5. P. 8985–9001.
5. Gorchakova I.A., Mokhov I.I., Tarasova T.A., Fomin B.A. Effect of clouds on radiative transfer in the atmosphere from the data of the 1999 Winter Zvenigorod Experiment // Izv. Atmos. Ocean. Phys. 2001. V. 37, No 1. P. 134–141.

Local effects of long-wave aerosol absorption in the period of smoky haze in the Moscow region in the summer of 2010

I.A. Gorchakova¹ (Gorchakova@ifaran.ru), I.I. Mokhov^{1,2}

¹A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics RAS, 3 Pyzhevsky pr., 119017 Moscow, Russia

²M.V. Lomonosov Moscow State University, Physics Faculty, 1 Leninskie Gory, 119991 Moscow, Russia

Large-scale smoke hazes effect strongly solar shortwave and long-wave radiation transfer [1–3]. Long-wave fluxes and long-wave aerosol radiative forcing at the top and bottom of the

atmosphere were determined for the smoke haze of 2010 in Moscow region. Integral function of the atmosphere transmission and semiempirical aerosol model adapted to Moscow smoke haze conditions were used for thermal radiation flux determination. Atmospheric gas (carbon dioxide, water vapour, ozone) and aerosol absorptions were taken into consideration when calculating the integral transmission function [4, 5].

In the case of optically dense haze, the thermal radiative forcing at the bottom of the atmosphere range up to 30 W/m^2 that are essentially less the radiative forcing for shortwave radiation. Long-wave forcing at the top of the atmosphere was only 1 W/m^2 approximately. Near-surface 10-meter smoke layer rate heating caused by long-wave absorption reached $0.2^\circ/\text{hour}$ during maximal smoke haze intensity in the case when smoke surface layer upper boundary height was equal 400 m. Radiative forcing sensitivity to the aerosol optical depth (the wave length of 550 nm) and integral aerosol absorption coefficient variations were estimated.

1. Mokhov I.I., Gorchakova I.A. Radiation and temperature effect of summer firers in 2002 in the Moscow region // Dokl. Earth Sci. 2005. V. 400, No 1. P. 160–163.
2. Gorchakova I.A., Mokhov I.I. The Radiative and Thermal Effects of Smoke Aerosol over the Region of Moscow during the summer Fires of 2010 // Izv. Atmos. Ocean. Phys. 2012. V. 48, No 5. P. 496–503.
3. Gorchakova I.A., Mokhov I.I., Anikin P.P., Emilenko A.S. Radiative and Thermal Impacts of Smoke Aerosol Long wave absorption during Fires in the Moscow Region in summer 2010 // Izv. Atmos. Ocean. Phys. 2018. V. 54, No 2. P. 154–161.
4. Feigelson E.M., Fomin B.A., Gorchakova I.A. et al. Calculation of longwave radiation fluxes in atmospheres // J. Geophys. Res. 1991. V. 96, No D5. P. 8985–9001.
5. Gorchakova I.A., Mokhov I.I., Tarasova T.A., Fomin B.A. Effect of clouds on radiative transfer in the atmosphere from the data of the 1999 Winter Zvenigorod Experiment // Izv. Atmos. Ocean. Phys. 2001. V. 37, No 1. P. 134–141.

Извержения вулканов и стратосферные аэрозольные слои как радиационно-активные факторы возмущения климата Земли

Сушкевич Т.А. (tamaras@keldysh.ru), Стрелков С.А., Максакова С.В.

Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, Миусская пл. 4, 125047 Москва, Россия

Цель настоящей работы – обратить внимание на класс больших задач аэрокосмического дистанционного зондирования и глобального мониторинга климата и эволюции Земли, связанных с необходимостью не только оперативного, но и непрерывного глобального мониторинга потенциально активных вулканов и последствий их извержения [1]. Речь идет о сопряженных задачах экологии, климата, дистанционного зондирования и глобального мониторинга Земли из космоса и радиационного форсинга на окружающую среду и глобальный климат, связанных с возникновением и релаксацией стратосферных аэрозольных слоев как радиационно-активных факторов возмущения радиационного поля Земли.

В 2018 году отметили 55-летний юбилей важных научных открытий, положивших начало атмосферно-оптическим космическим исследованиям [2, 3], а именно:

– ПЕРВОЕ инструментальное оптическое исследование земной атмосферы из космоса с пилотируемого космического корабля – проект ИФА АН СССР и МИЭиА МАП с участием «Института Келдыша»;

– ПЕРВЫЙ научный эксперимент по дистанционному зондированию атмосферы Земли из космоса (ДЗЗ) – проект ИФА АН СССР при участии «Института Келдыша»;

– ПЕРВЫЙ в мировой практике научный эксперимент, проведенный человеком в космосе с борта пилотируемого космического корабля, – проект ИФА АН СССР при участии «Института Келдыша»;

– полет в космос ПЕРВЫХ «космических экспериментаторов»: летчика-космонавта № 5 Валерия Федоровича Быковского (14–19 июня 1963 г. на ПКК «Восток-5», приземлился 19.06.1963 в 11 часов 06 минут, затем ПКК «Союз-22», «Союз-31»/«Союз-29») и летчика-космонавта № 6 Валентины Владимировны Николаевой-Терешковой (16–19 июня 1963 г. на

ПКС «Восток-6», приземлилась 19.06.1963 в 8 часов 20 минут) – ПЕРВОЙ женщины-космонавта. Обучали космонавтов Анатолий Борисович Сандомирский (МИЭА МАП) и Александр Константинович Городецкий (ИФА АН СССР);

– обнаружение ВПЕРВЫЕ из космоса стратосферных аэрозольных слоев и обоснование их вулканического происхождения.

Начало работы автора по сопряженным задачам о природе аэрозольных загрязнений атмосферы (экологии) и их влиянии на динамику изменения климата совпало с началом 21 сентября 2017 г. активности вулкана Агунг на острове Бали, который напомнил о пионерских работах 55-летней давности, связанных с этим же вулканом. Последствия извержения вулкана Агунг в 2017 г. ещё предстоит оценить. В настоящей работе представлены подходы и результаты исследований последствий длительного извержения вулкана Агунг с 18 февраля 1963 года по 27 января 1964 года. Климатологи и метеорологи зафиксировали, что температура Земли в 1963 году снизилась на 0.4 градуса по Цельсию.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проектов 18-01-00609, 17-01-00220).

1. Асатуров М.Л., Будыко М.И. и др. Вулканы, стратосферный аэрозоль и климат Земли. Л.: Гидрометеиздат. 1986. 256 с.
2. Сушкевич Т.А. К истории первого научного эксперимента по дистанционному зондированию Земли на пилотируемом космическом корабле // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2008. Вып. 5. Том 1. С. 315–322.
3. К 55-летию открытия стратосферных аэрозольных слоев из космоса: вулканы и проблемы климата (Посвящается 65-летию ИПМ имени М.В.Келдыша и его достижениям в пилотируемой космонавтике) // Препринт ИПМ им. М.В. Келдыша. 2018. № 125. 32 с.

Volcanic eruptions and stratospheric aerosol layers as radiation-active factors of the Earth's climate disturbance

T.A. Sushkevich (tamaras@keldysh.ru), S.A. Strelkov, S.V. Maksakova
M.V. Keldysh Institute of Applied Mathematics RAS, 4 Miusskaya sq., 125047 Moscow, Russia

The purpose of this work is to draw attention to the class of large problems of aerospace remote sensing and global monitoring of the climate and evolution of the Earth, associated with the need for not only operational, but also continuous global monitoring of potentially active volcanoes and the consequences of their eruption [1]. We are talking about the related problems of ecology, climate, remote sensing and global monitoring of the Earth from space and radiation forcing on the environment and global climate associated with the emergence and relaxation of stratospheric aerosol layers as radiation-active disturbances of the Earth's radiation field.

In 2018, we celebrated the 55th anniversary of some important scientific discoveries, which laid the foundation for atmospheric-optical space research [2, 3], namely:

– the FIRST instrumental optical study of the Earth's atmosphere from space from a manned spacecraft is a project of the Institute of Atmospheric Physics of the USSR Academy of Sciences and MIEiA MAP with the participation of Keldysh Institute;

– the FIRST scientific experiment on remote sensing of the Earth's atmosphere from space – a project of the Institute of Atmospheric Physics of the USSR Academy of Sciences with the participation of Keldysh Institute;

– the FIRST in the world practice a scientific experiment conducted by a man in space from a manned spacecraft – the project of the Institute of Atmospheric Physics of the USSR Academy of Sciences with the participation of Keldysh Institute;

– the flight into space of the FIRST "space experimenters": pilot-cosmonaut No. 5 Valery Fedorovich Bykovsky (June 14–19, 1963 at the Vostok-5 spacecraft, landed on 06.19.1963 at 11 hours 06 minutes, then the "Soyuz -22", "Soyuz-31"/"Soyuz-29") and pilot-cosmonaut number 6 Valentina Vladimirovna Nikolaeva-Tereshkova (June 16–19, 1963 at the "Vostok-6", landed 06.19.1963 at 8 o'clock 20 minutes) – FIRST female astronaut. Anatoly Borisovich Sandomirsky (MIEAA MAP) and Alexander Konstantinovich Gorodetsky (IFA of the USSR Academy of Sciences) were trained cosmonauts;

– the discovery of stratospheric aerosol layers from space FOR THE FIRST TIME and substantiation of their volcanic origin.

The beginning of the author's work on the related problems of the nature of aerosol pollution of the atmosphere (ecology) and their impact on climate change dynamics coincided with the beginning on September 21, 2017 of the activity of the Agung volcano in Bali, which recalled the pioneering work 55 years ago associated with the same volcano. The consequences of the eruption of the Agung volcano in 2017 have yet to be assessed. This work presents the approaches and results of studying the effects of the prolonged eruption of Agung volcano from February 18, 1963 to January 27, 1964. Climatologists and meteorologists recorded that the temperature of the Earth in 1963 decreased by 0.4 degrees Celsius.

The reported study was funded partially by RFBR according to the research projects 18-01-00609, 17-01-00220.

1. Asaturov M.L., Budyko M.I. et al.. Volcanoes, stratospheric aerosol and Earth's climate. Leningrad: Hydrometeoizdat. 1986. 256 p.
2. Sushkevich, T.A. On the history of the first scientific experiment on remote sensing of the Earth on a manned spacecraft // Modern problems of remote sensing of the Earth from space. 2008. Issue 5. Volume 1. P. 315–322 (in Russian).
3. To the 55th anniversary of the discovery of stratospheric aerosol layers from space: volcanoes and climate problems (Dedicated to the 65th anniversary of the Keldysh Institute of Applied Mathematics and its achievements in manned cosmonautics) // Preprint KIAM RAS. 2018. N 125. 32 p.

Черный углерод в приземной атмосфере в районе Печоро-Илычского природного биосферного заповедника

Виноградова А.А.¹ (anvinograd@yandex.ru), Копейкин В.М.¹, Васильева А.В.¹,
Смирнов Н.С.², Иванова Ю.А.¹

¹Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Пыжевский пер. 3, 119017 Москва, Россия
²Печоро-Илычский государственный природный биосферный заповедник, ул. Ланиной 8, 69436 п. Якша, Троицко-Печорский р-н, респ. Коми, Россия

В России в труднодоступных удаленных районах почти нет станций, где проводился бы круглогодичный мониторинг содержания в атмосфере черного углерода (black carbon – BC). Однако BC является важным климатообразующим фактором, влияющим на радиационный атмосферный баланс. В сентябре 2017 года был начат непрерывный мониторинг концентрации BC в приземном воздухе на территории Печоро-Илычского природного биосферного заповедника вблизи пос. Якша, республика Коми – примерные координаты пункта наблюдений 62° с.ш., 57° в.д. Отбор проб атмосферного аэрозоля производится на перхлорвиниловые фильтры каждый день, длительность экспозиции фильтра одни сутки. Измерения содержания BC в образцах и пересчет в концентрацию BC в воздухе производятся по поглощению видимого света на специальном оборудовании в ИФА им. А.М. Обухова в Москве [1]. В данной работе представлены результаты таких непрерывных наблюдений с октября 2017 г. по сентябрь 2018 г.

В холодную половину года средние значения концентрации BC в приземном воздухе (плюс-минус стандартное отклонение) составляют (296 ± 172) нг/м³ и (175 ± 82) нг/м³ в поселке Якша и вне его, соответственно. Таким образом, можно предположить, что локальные источники самого поселка обеспечивают примерно 120 нг BC в кубометре воздуха [2]. Анализ траекторий переноса воздушных масс (ВМ) к пункту наблюдений показывает наиболее вероятные удаленные источники BC в воздухе в районе заповедника. Рассматривались обратные траектории переноса ВМ, рассчитанные с помощью модели HYSPLIT и данным реанализа NOAA на сайте (<http://www.arl.noaa.gov>). Учитывались антропогенные эмиссии BC в атмосферу (EDGAR v.4.3.1 для 2010) и эмиссии от природных пожаров (база данных GFED – помесечно). Антропогенные эмиссии мало меняются год от года, тогда как эмиссии от пожаров характеризуются сильными межгодовыми, внутригодовыми и пространственными вариациями. Наиболее значимые для изучаемого

района антропогенные источники ВС в воздухе расположены не далее 500 км – это индустриальные центры, города и транспорт центрального Урала, Пермского края, Удмуртии и республики Коми, а также предприятия и установки нефте- и газодобычи, расположенные в ЯНАО и ХМАО. Также рассматривалось влияние летних пожаров 2018 года на содержание ВС в изучаемом воздухе.

Средние (по месяцам) значения концентрации ВС в воздухе в районе заповедника хорошо соответствуют спутниковым данным, обобщенным на сайте (<https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/>) по данным реанализа MERRA2.0. Это показывает разумность полученных результатов и может служить косвенной интеркалибровкой данных измерений и спутниковой информации.

Работа выполнялась при частичной поддержке РФФИ (грант № 17-05-00245).

1. Копейкин В.М., Емиленко А.С., Исаков А.А. и др. Изменчивость сажевого и субмикронного аэрозоля в Московском регионе в 2014–2016 гг. // *Оптика атмосферы и океана*. 2018. Т. 31, № 1. С. 5–10.
2. Виноградова А.А., Копейкин В.М., Смирнов Н.С. и др. Черный углерод в приземном воздухе в районе Печоро-Ильчского заповедника: измерения и источники // *Оптика атмосферы и океана*. 2019. Т. 32. № 6, в печати.

Black carbon in near-surface atmosphere in the region of Pechora–Ilych nature biosphere reserve

A.A. Vinogradova¹ (anvinograd@yandex.ru), V.M. Kopeikin¹, A.V. Vasileva¹,
N.S. Smirnov², Yu.A. Ivanova¹

¹*A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics RAS, 3 Pyzhevskiy per., 119017 Moscow, Russia*

²*Pechora-Ilych Nature Biosphere Reserve, Yaksha, Russia*

There are almost no points where monitoring of black carbon (BC) in the atmosphere has been carried out all year around in remote hard-to-reach Russian regions. However, BC is essential atmospheric component affecting radiative balance and climate. In September 2017 the continuous monitoring of black carbon (BC) concentration in surface air was started on the territory of Pechora-Ilych Nature Biosphere Reserve (PINBR, 62° N, 57° E) near Yaksha settlement (Komi Republic). Sampling on perchlorovinyl filters is taken every day, one sample daily. Measurements of BC content in the samples on visible light absorption and computing BC concentrations in air are carried out in Moscow [1]. In this work we present the results of these observations during the year from October 2017 to September 2018. In cold season (October–March) the mean values of BC concentrations ($\pm$ SDs) are (296 ± 172) ng/m³ and (175 ± 82) ng/m³ in Yaksha settlement and out of it, respectively. So, we can assume that the local Yaksha's contribution is about 120 ngBC/m³ in near surface atmosphere. Trajectories of air mass transport to observation point (computed by HYSPLIT model with the help of the site <http://arl.noaa.gov>) show the main sources of BC in the region of the PINBR. We analyzed anthropogenic (based on EDGAR data v.4.3.1 for 2010) and wildfire (from database GFED) BC sources. Anthropogenic emissions are almost stable through a year and year by year in comparison with fire ones which are very variable in time and through the territory. The main anthropogenic BC sources for the area around PINBR are located at distances less than 500 km. Those are industrial centers of the Central Urals, gas and oil production areas of Yamalo-Nenets and Khanty-Mansiysk Autonomous Okrugs, towns and settlements of Perm region, Udmurtia, and Komi Republic. The points of wildfires were also identified as the sources of BC in PINBR air in summer.

We also considered the BC surface concentrations, presented as the monthly BC ranges on the site (<https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/>) from MERRA2.0 reanalysis. Monthly averaged BC concentrations from measurements are in good agreement with the scales of satellite data. This confirms the reliability of both results, and may be also regarded as their inter-calibration.

This work was supported by Russian Foundation for Basic Research (grant no. 17-05-00245).

1. Kopeikin V.M., Emilenko A.S., Isakov A.A. et al. Variability of Soot and Fine Aerosol in the Moscow Region in 2014–2016 // *Atmos. Ocean. Opt.* 2018. V. 31. No. 3. P. 243–249.
2. Vinogradova A.A. et al. Black Carbon in the Near Surface Air in the Region of Pechora–Ilych Nature Reserve: Measurements and Sources // *Atmos. Ocean. Opt.* 2019. V. 32. (In Russian) In press.

Мониторинг состояния прозрачности атмосферы над центральной частью Якутии по данным солнечного фотометра CIMEL CE-318 за период 2004–2017 гг.

Васильев М.С. (m.s.vasiliev@ikfia.ysn.ru), Николашкин С.В.

*Институт космических исследований и аэронавтики им. Ю.Г. Шафера СО РАН, пр. Ленина 31,
677980 Якутск, Россия*

Лесные пожары носят характер чрезвычайных ситуаций, связанных с изменением состава и свойств атмосферы. Значительные изменения прозрачности атмосферы в ходе очагов горения лесного массива зависят от наличия дымового аэрозоля. В настоящей работе приводятся результаты мониторинга аэрозольной оптической толщи (АОТ) над центральной частью Якутии по данным солнечного фотометра CIMEL CE-318. По данным АОТ проведена классификация прозрачности атмосферы за период 2004–2017 гг. Мониторинг АОТ проводился солнечным фотометром CIMEL CE-318 (координаты прибора: 61.662 N; 129.367 E). Были использованы данные АОТ уровня 2 на длине волны $\lambda = 500$ нм (<https://aeronet.gsfc.nasa.gov/>). Информация об очагах горения лесного массива на территории Якутии и соседних регионах получена на основе данных системы FIRMS (<https://earthdata.nasa.gov/data/near-real-time-data/firms/active-fire-data>). Пространственный и временной анализ траектории распространения воздушных масс осуществлен с помощью модели HYSPLIT (<http://ready.arl.noaa.gov/HYSPLIT.php>).

Классификация прозрачности атмосферы состоит из трех классов: I класс – «чистая» атмосфера (значения АОТ меньше 1-го квартиля выборки измерений); II класс – «типичная» атмосфера (значения АОТ находятся между 1-м и 3-м квартилями указанной выборки, что соответствует 50% всех возможных состояний прозрачности атмосферы); III класс – замутненная «грязная» атмосфера (АОТ превышает значение 3-го квартиля). Использование средних значений АОТ, зависящих от максимальных значений в выборке, не является корректным. Классификация прозрачности атмосферы, применяемая в работе, позволяет полнее характеризовать наблюдаемые изменения АОТ.

Установлено, что ежегодно дни со значениями АОТ, относящимися к III классу прозрачности атмосферы («грязная» атмосфера) за рассматриваемый период находились в пределах 25–30% общего числа дней измерения АОТ.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации бюджетной темы П.16.1.7. 0375-2018-0004 (номер государственной регистрации № АААА-А17-117021450054-8).

Monitoring the state of transparency of the atmosphere over the central part of Yakutia according to CIMEL CE-318 sun-sky photometer data for 2004–2017

M.S. Vasiliev (m.s.vasiliev@ikfia.ysn.ru), S.V. Nikolashkin

*Yu.G. Shafer Institute of Cosmophysical Research and Aeronomy of SB RAS, Lenin Ave. 31, 677980 Yakutsk,
Russia*

Forest fires are in the nature of emergency situations associated with changes in the composition and properties of the atmosphere. Significant changes in the transparency of the atmosphere during the foci of burning of the forest massif depend on the presence of smoke aerosol. This paper presents the results of monitoring an aerosol optical depth (AOD) over the central part of Yakutia according to the CIMEL CE-318 solar photometer. According to the AOD, atmospheric transparency has been classified for the period 2004–2017. AOD was monitored with a CIMEL CE-318 sun-sky photometer (instrument coordinates: 61.662 N; 129.367 E). AOD data of level 2 were used at a wavelength of $\lambda = 500$ nm (<https://aeronet.gsfc.nasa.gov/>). The information on the zones of forest fires in Yakutia was obtained from the FIRMS (Fire Information for Resource Management System; <https://earthdata.nasa.gov/data/near-real-time-data/firms>) data. The temporal

and spatial analysis of air mass trajectories was performed using the web-service for the HYSPLIT model runs (<http://ready.arl.noaa.gov/HYSPLIT.php>).

The classification of atmospheric transparency consists of three classes: Class I – «clean» atmosphere (AOD values less than 1 quartile of the measurement sample); Class II – «typical» atmosphere (AOD values are between the 1st and 3rd quartiles of this sample, which corresponds to 50% of all possible atmospheric transparency states); Class III – turbid «dirty» atmosphere (AOD exceeds the value of the 3rd quartile). The use of AOD average values depending on the maximum values in the sample is not correct. The classification of atmospheric transparency used in the work makes it possible to more fully characterize the observed changes in AOD.

It was established that annually the days with AOD values belonging to the III class of atmospheric transparency («dirty» atmosphere) for the period under consideration were within 25–30% of the total number of AOD measurement days.

The work was carried out with the financial support of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation of budgetary subject II.16.1.7 0375-2018-0004 (number of state registration No. AAAA-A17-117021450054-8).

Учет зависимости поглощающих и гигроскопических свойств атмосферного аэрозоля от размера частиц при моделировании влияния влажности на его оптические характеристики

Терпугова С.А. (swet@iao.ru), Зенкова П.Н., Панченко М.В., Полькин В.В.
Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, пл. Ак. Зюева 1, 634055 Томск, Россия

В докладе представлены результаты моделирования оптического отклика поглощающего аэрозоля на изменение относительной влажности воздуха. Распределение по размерам при нулевой относительной влажности задавалось в виде логнормального распределения с параметрами, характерными для средних летних условий Западной Сибири. Внутри непоглощающей аэрозольной фракции помещалась фракция поглощающих частиц. Она также предполагалась логнормальной, и ее параметры оценивались по данным аэталометрических измерений спектра размеров поглощающего вещества с диффузионной батареей в качестве селектора частиц [1]. Для моделирования увлажнения применялось описание размерной зависимости фактора конденсационного роста при помощи формулы А.Г. Лактионова [2], параметры формулы варьировались.

Для сформированных таким образом распределений при нескольких значениях относительной влажности вычислялись коэффициенты рассеяния под углом 45° и ослабления в видимой области спектра. По полученным значениям определялся параметр конденсационной активности [3], который затем сравнивался с экспериментальными данными. В докладе исследуются пределы вариаций параметра конденсационной активности при различных параметрах формулы Лактионова.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Программы Президиума РАН № 51 «Изменение климата: причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования».

1. Козлов В.С., Шмаргунов В.П., Панченко М.В. и др. Сезонная изменчивость распределения сажи по размерам в атмосферном аэрозоле // Изв. ВУЗов. Физика. 2015. № 12. С. 122–127.
2. Лактионов А.Г. Равновесная гетерогенная конденсация. Л.: Гидрометеиздат. 1988. 160 с.
3. Hanel, G. The properties of atmospheric aerosol particles as function of relative humidity at the thermodynamic equilibrium with surrounding moist air // Adv. Geophys. 1976. V. 19. P. 73–188.

Considering the size-resolved absorbing and hygroscopic properties of atmospheric aerosol when modeling the effect of humidity on its optical characteristics

S.A. Terpugova (swet@iao.ru), P.N. Zenkova, M.V. Panchenko, V.V. Polkin
V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics SB RAS, 1 Ac. Zuev sq., 634055 Tomsk, Russia

The paper presents the results of modeling the optical response of absorbing aerosol to the change of the relative humidity of air. The size distribution of dry particles (at zero humidity) was set in the form of lognormal distribution with the parameters characteristic for mean summer conditions in Western Siberia. An absorbing particle fraction was placed inside the non-absorbing fraction. It was also set as lognormal distribution, and its parameters were estimated using the data of aethalometric measurements of the size spectrum of absorbing substance using a diffuse battery as a device for selecting the particles size [1]. To simulate humidification, the size dependence of the condensation growth was described by the Laktionov's formula [2], the parameters of the formula varied.

Then the scattering coefficients at the angle of 45° and the extinction coefficients in the visible wavelength range were calculated at several values of relative humidity. The parameters of condensation activity (Hanel parameter [3]) was determined using the obtained optical coefficients. Then it was compared with the experimental data. The range of variations of the parameter of condensation activity at different sets of the parameters of Laktionov's formula are studied in this paper.

The work was supported in part by the Program of the Presidium of the Russian Academy of Sciences No. 51 "Climate change: reasons, risks, subsequences, problems of adaptation and regulation".

1. Kozlov V.S., Shmargunov V.P., Panchenko M.V. et al. Seasonal variability of Black Carbon size distribution in the atmospheric aerosol // *Rus. Physics J.* 2016. V. 58. P. 1804–1810.
2. Laktionov A.G. Equilibrium heterogeneous condensation. Leningrad: Gidrometeoizdat. 1988. 166 p. (in Russian)
3. Hanel, G. The properties of atmospheric aerosol particles as function of relative humidity at the thermodynamic equilibrium with surrounding moist air // *Adv. Geophys.* 1976. V. 19. P. 73–188.

Вариации концентраций аэрозоля, озона и оксидов азота в Подмоскowie

Исаков А.А. (a.a.isakov@mail.ru), Аникин П.П., Тихонов А.В.

Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Пыжевский пер. 3, 119017 Москва, Россия

В предлагаемой работе рассматриваются данные измерений на Звенигородской научной станции некоторых атмосферных характеристик – массовой концентрации приземного аэрозоля, озона и соединений азота – и их возможные связи с метеорологическими явлениями. Анализируемые данные получены с помощью модернизированного серийного фотометра ФАН и стационарного поста Мосэкомониторинга. Ранее мы уже показывали, что существует высокая корреляция между данными ФАНа и приборов РМ10 поста Мосэкомониторинга. По приборам этого поста оценивалась метеорологическая ситуация. Для анализа данных мы привлекли методы скользящего среднего, вэйвлетный анализ Морле и обратнотраекторный анализ. Расчет обратных траекторий воздушных масс выполнялся с помощью стандартной программы HYSPLIT. Располагая двадцативосьмилетним рядом данных по массовой концентрации M , мы могли анализировать как многолетние тренды величины M , так и аномальные эпизоды длительностью в несколько месяцев [1].

Анализу одного из таких эпизодов посвящена данная работа. Мы рассмотрим временной отрезок июля–сентября 2018 года. После длительного перерыва вновь летом 2018 отчетливо проявились квазипериодические колебания величины M с периодом семь недель. Появление высоких значений величины M в летние месяцы – редкое явление, и на

протяжении всех последних лет измерения M регистрировались лишь единичные кратковременные эпизоды. В начале 2018 года вплоть до июня преобладали относительно короткопериодные, с периодом около 5 и 20 суток, квазипериодические колебания. В июне происходит резкая смена – в июне максимальные величины M составляют 10–15 мкг/м³, а минимальные – устойчиво на уровне 5 мкг/м³, к началу июля в 2–3 раза возрастает в максимумах уровень M . В середине августа на короткое время, около трех суток, направление переноса воздушных масс сменяется на западное, и этому моменту соответствует локальный минимум величины M . Для всего ряда 2018 года величины M было построено скользящее среднее (по 20 точкам). Его развертка показала, что именно с начала июля вплоть до октября просматриваются три периода отчетливых семинедельных колебания. Сходные вариации продемонстрировала величина приземной концентрации окислов азота NO_x – максимальные значения их регистрировались в моменты высокого давления.

В вариациях приземной концентрации озона аномалий не наблюдалось, лишь в середине июля отмечен небольшой максимум. В середине августа вместе с кратковременным изменением направления переноса на западный произошло падение концентрации озона. Сходную картину вариаций показал вейвлетный анализ величины M . Особенности эпизода июля–октября подтвердил анализ обратных траекторий. Рассчитаны были трехсуточные обратные траектории. На протяжении всего периода максимальных значений M преобладал перенос воздушных масс либо с Арктики, либо со среднего Предуралья, либо из аридной зоны нижнего Поволжья и отсутствовал перенос с запада. Рост атмосферного давления сопровождался ростом величины M для скользящего среднего, падение давления соответствовало уменьшению M . К ноябрю возобладал западно-северозападный перенос с Балтики, при этом прекратились вариации с периодом семь недель, они сменились более короткими, трехнедельными.

1. Исаков А.А., Груздев А.Н., Тихонов А.В. О долгопериодных вариациях оптических микрофизических параметров приземного аэрозоля // Оптика атмосферы и океана. 2005. Т. 18, № 05–06. С. 393–399.

Concentration variations of aerosol, ozone and nitrogen oxides in the Moscow region

A.A. Isakov (a.a.isakov@mail.ru), P.P. Anikin, A.V. Tikhonov

A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics RAS, 3 Pyzhevsky pr., 119017 Moscow, Russia

In this paper we consider the measurement data at Zvenigorod scientific station of some atmospheric characteristics – the mass concentration of surface aerosol, ozone and nitrogen compounds and their possible connections with meteorological phenomena. Analyzed data obtained with the upgraded serial photometer FAN and a stationary post of Mosecomonitoring. Previously, we have shown that there is a high correlation between the data of the Fan and PM10 devices of the Mosecomonitoring station. The meteorological situation was assessed by the instruments of this station. For data analysis we drew methods saltadere average, wavelet Morlaix and operatory analysis. The inverse trajectories of air masses were calculated using the standard HYSPLIT program. Having twenty-eight-year series of data on the M mass concentration, we were able to analyze both long-term trends in the M value and anomalous episodes lasting several months [1].

This work is devoted to the analysis of one of such episodes. We consider the time period of July–September 2018. In the summer of 2018, after a long break again, quasi-periodic fluctuations in the M value with a period of seven weeks were clearly manifested. The appearance of high M values in the summer months is rare and only a few short-term episodes have been recorded during the last years. In early 2018, until June, relatively short-period, with a period of about 5 and twenty days, quasi-periodic oscillations prevailed. In June, there is a sharp change – in June, the maximum M values are 10–15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, and the minimum ones are stable at the level of 5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$; by the beginning of July the M level in maxima increases by 2–3 times. In mid-August, for a short time, about three days, the direction of air mass transfer is replaced by the Western one and this moment

corresponds to the local minimum value of M . For the whole series of 2018, a moving average was built (20 points). Its scan showed that three periods of distinct seven-week quasi-harmonic oscillations were observed from the beginning of July until October. The value of the surface concentration of nitrogen oxides NO_x demonstrated similar variations – their maximum values were recorded at moments of high pressure. No anomalies were observed in variations of ground-level ozone concentration, only a small maximum was revealed in mid-July. In mid-August, together with a short-term change in the direction of transport to the West, ozone concentrations dropped. A similar picture of the variations was shown by the wavelet analysis of the magnitude M of the July–October episode singularity, which was confirmed by the analysis of the inverse trajectories. Three-day back trajectories were designed. Throughout the entire period of M maximum values, the transfer of air masses either from the Arctic or from the middle Urals or from the arid zone of the lower Volga region prevailed and there was no transfer from the West. The increase in atmospheric pressure was accompanied by an increase in the M value for the moving average, the pressure drop corresponded to a decrease value. By November, West-northwest transfer from Baltic prevailed, at the same time variations with the period of seven weeks stopped, they were replaced shorter, three-week ones.

1. Isakov A.A., Gruzdev A.N., Tikhonov A.V. Long-term variations of Optical and microphysical parameters of surface aerosol // *Atm. and Ocean. Optics*. 2005. Vol. 18, N o 05–06. P. 393–399 (in Russian).

Влияние континуального поглощения паров воды на радиационные процессы в длинноволновом диапазоне спектра в регионе Нижнего Поволжья

Фирсов К.М.¹ (fkm@volsu.ru), Чеснокова Т.Ю.², Размолов А.А.¹

¹*Волгоградский государственный университет, Университетский пр. 100, 400062 Волгоград, Россия*

²*Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, пл. Ак. Зюева 1, 634055 Томск, Россия*

В настоящее время в задачах моделирования климата значительные неопределенности вносят водяной пар и аэрозоль, которые играют ключевую роль в радиационных процессах, а также при фазовых переходах, включая процессы образования облаков. Проведенные нами расчеты потоков длинноволнового излучения с различными версиями спектроскопической базы данных HITRAN показали, что различия между нисходящими потоками на нижней границе атмосферы для лета умеренных широт не превышали 0.1 Вт/м^2 , а для восходящих потоков на верхней границе атмосферы – не более 0.6 Вт/м^2 . Эти оценки позволяют сделать вывод о том, что современные спектроскопические базы данных обеспечивают высокую точность расчета широкополосных потоков. Однако в случае континуального поглощения парами воды ситуация существенно иная. Чувствительность радиационных потоков в микро- и макро-окнах прозрачности атмосферы к погрешностям в коэффициентах континуального поглощения значительно более сильная в сравнении с селективным поглощением. Это обусловлено тем, что в полосах поглощения наблюдается эффект насыщения, тогда как континуальное поглощение, хотя и является относительно малым, но не насыщено, представляет собою медленно меняющуюся функцию частоты и дает вклад в достаточно широких спектральных интервалах. В работе [1] рассматривалось радиационное воздействие континуального поглощения паров воды в видимом и ближнем ИК диапазонах спектра для двух моделей континуума: CKD, используемой в климатических моделях, и CAVIAR, полученной на основе последних экспериментальных исследований. В случае безоблачной атмосферы осредненное по Земному шару поглощение атмосферой обусловленное континуумом по модели CKD составило 1.5 Вт/м^2 (2% от интегрального поглощения), а по модели CAVIAR соответственно 2.8 Вт/м^2 (3.5%) [1].

В длинноволновом диапазоне спектра ($\lambda \geq 3 \text{ мкм}$) вклад континуального поглощения существенно больше, нежели в коротковолновом диапазоне спектра, и может достигать несколько десятков Вт/м^2 . Более того, мгновенный радиационный форсинг в результате удвоения концентрации CO_2 составляет величину $0.5\text{--}3 \text{ Вт/м}^2$ в нисходящем потоке

излучения на нижней границе атмосферы. Континуальное поглощение парами воды экранирует 15 мкм полосу CO₂, что и обуславливает эти вариации вышеуказанного форсинга. Поэтому к моделям континуального поглощения, входящим в радиационный блок климатической региональной модели RegCM 4.5, предъявляются высокие требования. В RegCM 4.5 также использовалась модель континуума СКД. Данная модель континуума многократно подвергалась ревизии и к настоящему времени достаточно широко используется версия этой модели МТСКД2.5. Однако и эта версия дает заметные расхождения коэффициентов поглощения с экспериментальными данными [2] в окне 8–12 мкм. Поэтому мы на основе данных [2] разработали модель континуума для области 8–12 мкм, а для других диапазонов спектра использовали МТСКД2.5.

Для оценки возможных вариаций длинноволновых потоков и вклада континуума водяного пара мы использовали 2 набора метеорологических данных для летних и зимних условий региона Нижнего Поволжья. Эти наборы были получены из данных реанализа и содержали вертикальные профили давления, температуры, влажности и малые газовые составляющие.

Исследование было поддержано Российским фондом фундаментальных исследований (№ 18-45-340002 p_a), администрацией Волгоградского региона и Программой фундаментальных научных исследований РАН (проект № АААА-А17-117021310148-7).

1. Radel G., Shine K.P., Ptashnik I.V. Global radiative and climate effect of the water vapour continuum at visible and near-infrared wavelengths // *Quart. J. Roy. Met. Soc.* 2015. V. 141. P. 727–738.
2. Baranov Yu.I., Lafferty W.J., Ma Q., Tipping R.H. Water-vapor continuum absorption in the 800–1250 cm⁻¹ spectral region at temperatures from 311 to 363 K // *J.Q.S.R.T.* 2008. V. 109. P. 2291–2302.

Impact of water vapor continuum absorption on the longwave radiative processes in Lower Volga region

K.M. Firsov¹ (fkm.volsu@mail.ru), T.Yu. Chesnokova², A.A. Razmolov¹

¹*Volgograd State University, 100 Universitetsky pr., 400062 Volgograd, Russia*

²*V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics SB RAS, 1 Ac. Zuev sq., 634055 Tomsk, Russia*

At present time, the significant sources of uncertainties in climate modeling problems are water vapor and aerosol which play a key role in the radiative processes and phase transformation, including clouds formation. Our calculations of longwave radiative fluxes with use of different versions of the HITRAN spectroscopic database have shown that the difference in downward fluxes at the atmosphere bottom for mid-latitude summer does not exceed 0.1 W/m², and 0.6 W/m² in upward fluxes at the atmosphere top. These estimations show that modern spectroscopic databases provide high accuracy of the broadband fluxes simulation. However, the situation is different in the case of water vapor continuum absorption. The sensitivity of the radiative fluxes to errors of the continual absorption in macro and micro windows of the atmospheric transparency is stronger in comparison with selective absorption. It is caused by saturation effect observed in absorption bands, whereas the continual absorption is relatively small, but the continuum is not saturated and slowly changed with wavenumber, and contributes in broad spectral intervals. The radiative forcing of water vapor continuum absorption in the visible and near infrared spectral regions is considered in [1] for two continuum models: CKD, used in climate models, and CAVIAR, obtained on basis of recent experimental data. The global-mean clear-sky atmospheric absorption is enhanced by 1.5 W/m² (about 2%) for CKD and 2.8 W/m² (about 3.5%) for CAVIAR, relative to a no-continuum case[1].

The continuum absorption contribution in the longwave spectral region ($\lambda \geq 3 \mu\text{m}$) is significantly more than in the shortwave spectral region and it can reach several tens W/m². Moreover, the instantaneous radiative forcing due to the atmospheric CO₂ doubling is 0.5–3 W/m² in the downward flux at the atmosphere bottom. The water vapor continuum absorption screens the CO₂ 15μm band that causes such variations of the radiative forcing. Therefore, high accuracy of the continuum models included in radiative block of regional climatic model RegCM 4.5 is required. The CKD model is used in the RegCM 4.5. This model is updated many times, and now, the

MT_CKD2.5 version is widely used. However, this version gives significant difference of absorption coefficients from the experimental data [2] in the 8–12 μm window. And so, we have developed a continuum model on basis of data [2] in the 8–12 μm spectral region, and the MT_CKD2.5 was used in other spectral regions.

In order to estimate possible variations of longwave fluxes, and water vapor continuum contribution to the fluxes, we used two samplings of meteorological data for summer and winter conditions of Lower Volga region. The samplings are obtained from reanalysis data and contain vertical profiles of pressure, temperature, humidity and small gaseous constituents.

The research was supported by Russian Foundation for Basic Research (№ 18-45-340002 p_a), Administration of Volgograd Region, and Program of Fundamental Scientific Research of Russian Academy of Science, (project № AAAA-A17-117021310148-7).

1. Radel G., Shine K.P., Ptashnik I.V. Global radiative and climate effect of the water vapour continuum at visible and near-infrared wavelengths // Quart. J. Roy. Met. Soc. 2015. V. 141. P. 727–738.
2. Baranov Yu.I., Lafferty W.J., Ma Q., Tipping R.H. Water-vapor continuum absorption in the 800–1250 cm^{-1} spectral region at temperatures from 311 to 363 K // J.Q.S.R.T. 2008. V. 109. P. 2291–2302.

Параметризация основных микрофизических и оптических характеристик однородных облачных слоев смешанного фазового состава в зависимости от температуры воздуха

Петрушин А.Г. (petrushin-2005@mail.ru)

Обнинский институт атомной энергетики, филиал МИФИ, Студгородок 1, 249040 Обнинск, Калужская обл., Россия

Рассчитывались основные оптические характеристики рассеяния излучения (средний косинус индикатрисы рассеяния излучения, альbedo однократного рассеяния) частицами в однородных по объему облачных слоях смешанного фазового состава для отдельных длин волн в диапазоне от 0.6 до 10.6 μm . При этом использовались измененные, предложенные нами ранее модели микроструктуры капельной фракции указанного облака и методики расчета оптических характеристик ледяных кристаллов с правильными формами (пластинками и столбиками) и размерами, превышающими длину волны падающего излучения [1].

Рассмотрен возможный механизм трансформации микроструктуры капельной фракции указанного облачного слоя при изменении температуры воздуха в облачной среде T . Считая определяющим процессом, влияющим на рост переохлажденных капель, процесс Бержерона-Финдайзена, предполагается, что в диапазоне T от 232 К до 273 К площадь поверхности водных капель линейно уменьшается с уменьшением T . При этом изменение доли водности облачного слоя в зависимости от T удовлетворительно согласуется с аналогичными данными [2]. В работе приводятся рассчитанные значения альbedo однократного рассеяния и средних косинусов индикатрисы рассеяния излучения и обсуждаются их зависимости от T . Для отдельных длин волн в инфракрасном диапазоне выполнены аппроксимации вышеуказанных оптических зависимостей.

1. Петрушин А.Г. О параметризации основных оптических и радиационных характеристик однородных облачных слоев смешанного фазового состава // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2016. Т. 52, № 3. С. 293–299.
2. Sundqvist H. Inclusion of ice phase of hydrometeors in cloud parameterization for mesoscale and largescale models // Beitr. Phys. Atm. 1993. V. 66. P. 445–453.

Parameterization of the main microphysical and optical characteristics of homogeneous cloud layers of mixed phase composition depending on the air temperature

A.G. Petrushin (petrushin-2005@mail.ru)

*National Research Nuclear University "MEPhI", Obninsk Department, 1 Studgorodok, 249040 Obninsk
Kaluga reg., Russia*

The main optical characteristics of radiation scattering (asymmetry parameter of the optical scattering phase function, single-scattering albedo) by particles in homogeneous cloud layers of mixed phase composition were calculated for individual wavelengths in the range from 0.6 to 10.6 μm . In this case, the modified microstructure of the droplet fraction of the indicated cloud and the methods for calculating the optical characteristics of ice crystals with regular shapes (plates and prisms) and sizes exceeding the wavelength of the incident radiation were used [1].

A possible mechanism for the transformation of the microstructure of the droplet fraction of the specified cloud layer when the air temperature in the cloud environment T changes is examined. Considering Berzherona-Findayzen process by the defining process influencing growth of the supercooled droplets, it is assumed that in the range T from 232 K to 273 K the surface area of the water drops decreases linearly with decreasing T . In this case, the change in the proportion of the water content of the cloud layer depending on T is in satisfactory agreement with similar data [2]. The paper presents calculated values of single scattering albedo and asymmetry parameter of the optical scattering phase function, and their dependences on T are discussed. For individual wavelengths in the infrared range, approximations of the above optical dependences are performed.

1. Petrushin A.G. On the parametrization of the main optical and radiation characteristics of homogeneous cloud layers of mixed phase composition. *Izv. RAS, Physics of Atmosphere and Ocean*. 2016, V. 52, No 3. P. 293–299 (in Russian).
2. Sundqvist H. Inclusion of ice phase of hydrometeors in cloud parameterization for mesoscale and largescale models // *Beitr. Phys. Atm.* 1993. V. 66. P. 445–453.

Корреляционные связи аэрозольного ослабления, рассеяния и поглощения оптического излучения в приземной атмосфере в условиях ледяного тумана

Яушева Е.П. (helen@iao.ru), Ужегов В.Н., Козлов В.С., Полькин Вас.В.,
Шмаргунов В.П.

V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics SB RAS, 1 Ac. Zuev sq., 634055 Tomsk, Russia

В последние десятилетия в связи с проблемами изменения климата возросла актуальность комплексных исследований характеристик ослабления, рассеяния и поглощения излучения атмосферным аэрозолем. Корректное описание изменений радиационных характеристик и радиационного баланса в атмосфере нуждается как в изучении особенностей, обусловленных разными типами аэрозольных образований (дымки, туманы, шлейфы дымов лесных пожаров и др.), так и в учете специфики их отличия для разных климатических зон (Арктика, Субарктика, бореальные леса и др.). В феврале 2019 г. в атмосфере г. Томска пришедшая арктическая воздушная масса при снижении температуры воздуха до -25°C привела к образованию оптически плотного ледяного тумана (9 суток), в котором коэффициенты аэрозольного ослабления в видимой области часто превышали 1 км^{-1} . Выполненные исследования представляют интерес для регионов Российской Субарктики и Арктики, в которых образование ледяных туманов может происходить неоднократно в течение длительной морозной зимы.

В работе проведено сопоставление спектральных коэффициентов аэрозольного ослабления $\beta_{\text{ex}}(\lambda)$ в диапазоне длин волн 0.50–3.9 мкм, полученных из измерений спектрального пропускания атмосферы на горизонтальной трассе длиной 1 км, с характеристиками светорассеяния и поглощения, измеряемыми в видимой области спектра в

локальном объеме воздуха. Коэффициенты рассеяния $\beta_{sc}(\varphi)$ в диапазоне углов $\varphi = 1.2\text{--}20^\circ$ измерялись ореольным фотометром на длине волны 0.65 мкм, а под углом 45° на длине волны 0.51 мкм – нефелометром типа ФАН. Массовая концентрация M_{BC} поглощающего аэрозольного вещества (сажа) в субмикронных частицах измерялась на трех длинах волн в диапазоне 0.46–0.63 мкм с помощью аэталометра МДА. Круглосуточные почасовые измерения оптических и метеорологических параметров проводились на Аэрозольной станции ИОА СО РАН (восточная окраина г. Томска).

Массив одновременно измеренных оптических характеристик содержал 191 часовую реализацию. Метеорологическая дальность видимости варьировала от 11 до 1.5 км. Изменения метеопараметров составили: 1) температура воздуха от -25 до -38°C ; 2) относительная влажность $47 \div 79\%$; 3) парциальное давление паров воды $0.2 \div 0.6$ мб. Массовая концентрация сажи изменялась от 0.3 до 37 мкг/м³. Относительное содержание поглощающего вещества в сухих субмикронных частицах – от 3 до 11%. Статистическое сопоставление данных трассовых и локальных измерений проводилось отдельно для аэрозольных компонент ослабления радиации, обусловленных субмикронным (радиус частиц <0.8 мкм) и грубодисперсным аэрозолем (>0.8 мкм). Для грубодисперсных частиц оценена статистическая связь между параметрами $\beta_{ex}(2.2 \text{ мкм})$ и $\beta_{sc}(1.2^\circ)$. Для субмикронных частиц – между $\Delta\beta_{ex} = \beta_{ex}(0.55 \text{ мкм}) - \beta_{ex}(2.2 \text{ мкм})$ и $\beta_{sc}(45^\circ)$. Оценена корреляционная связь коэффициента аэрозольного поглощения (как разности между коэффициентами ослабления $\Delta\beta$ и рассеяния) с M_{BC} . Показано, что в ледяном тумане долевого вклад поглощения в ослабление излучения для грубодисперсного аэрозоля составил $5 \pm 4\%$, однако для субмикронного аэрозоля он возрастает до $20 \pm 12\%$.

Работа выполнена при поддержке Российского Научного Фонда (грант № 19-77-20109).

Correlation of aerosol extinction, scattering and absorption coefficients of optical radiation in a surface atmosphere in an icy fog

E.P. Yausheva (helen@iao.ru), V.N. Uzhegov, V.S. Kozlov, Vas.V. Pol'kin,
V.P. Shmargunov

V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics SB RAS, 1 Ac. Zuev sq., 634055 Tomsk, Russia

In recent decades, due to the problems of climate change, the relevance of complex studies of the attenuation, scattering and absorption of radiation by atmospheric aerosol had increased. Correct description of changes in radiation characteristics and radiation balance in the atmosphere requires both the study of the features caused by different types of aerosol formations (haze, fogs, smoke plumes of forest fires, etc.), and the specifics of their differences for different climatic zones (Arctic, Subarctic, boreal forests, etc.). In February 2019 in the surface atmosphere of the city of Tomsk, the incoming arctic air mass with a decrease of air temperature to -25°C led to the formation of an optically dense ice fog (9 days), in which the coefficients of aerosol extinction in the visible spectral region often exceeded 1 km^{-1} . Optical data in these conditions are of interest for the regions of the Russian Subarctic and the Arctic, in which the formation of ice fogs can occur repeatedly during a long frosty winter.

In the work the comparison the spectral coefficients of the aerosol extinction $\beta_{ex}(\lambda)$ in the wavelength range 0.50–3.9 μm obtained from measurements of the spectral transmittance of the atmosphere on a horizontal path of 1 km long with the scattering and absorption characteristics measured in the visible region of the spectrum in the local air volume. The scattering coefficients $\beta_{sc}(\varphi)$ were measured by a halo photometer in the range of angles $\varphi = 1.2 - 20^\circ$ at a wavelength of 0.65 μm , and they were measured by a FAN type nephelometer at an angle of 45° at a wavelength of 0.51 μm . The mass concentration of absorbing aerosol matter M_{BC} (Black Carbon) in submicron particles was measured at three wavelengths in the range of 0.46–0.63 μm using an MDA aetalometer. The round-the-clock hourly measurements of optical and meteorological parameters were carried out at the Aerosol Station of the IAO SB RAS (in a suburban area of Tomsk).

An array of simultaneously measured optical characteristics contained 191 hours of implementation. Meteorological visibility ranged from 11 to 1.5 km. The limits of meteorological parameters change were: 1) air temperature from -25 to -38°C ; 2) relative humidity – from 47 to 79%; 3) partial pressure of water vapor $0.2\div 0.6$ mb. The mass concentration of soot varied from 0.3 to $37\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$. The relative content of the absorbing substance in dry submicron particles (BC fraction) is from 3 to 11%. Statistical comparison of the data of the route and local measurements was carried out separately for aerosol components of radiation extinction due to submicron (particle radius $< 0.8\text{ }\mu\text{m}$) and coarse aerosol ($> 0.8\text{ }\mu\text{m}$). The statistical relationship between the $\beta_{\text{ex}}(2.2\text{ }\mu\text{m})$ and $\beta_{\text{sc}}(\varphi)(1.2^{\circ})$ parameters was estimated for coarse particles. For submicron particles such relation was obtained between the parameters $\Delta\beta_{\text{ex}} = \beta_{\text{ex}}(0.55\text{ }\mu\text{m}) - \beta_{\text{ex}}(2.2\text{ }\mu\text{m})$ and $\beta_{\text{sc}}(45^{\circ})$, taking into account changes in the relative humidity of the air. The correlation between the coefficient of aerosol absorption (as the difference between the extinction coefficient $\Delta\beta$ and scattering coefficient) with the M_{BC} parameter is also estimated. It was shown that under conditions of ice fog, the contribution of absorption in the extinction of radiation for a coarse aerosol was $5 \pm 4\%$; however, for submicron aerosol it increased to $20 \pm 12\%$.

This work was supported by the Russian Science Foundation (grant № 19-77-20109).

Содержание черного углерода в атмосфере Северной Евразии при сибирских лесных пожарах летом 2016 г. (по данным MERRA-2)

Ситнов С.А.¹ (sitnov@ifaran.ru), Мохов И.И.^{1,2}, Горчаков Г.И.¹, Лихошерстова А.А.³

¹Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Пыжевский пер. 3, 119017 Москва, Россия.

²Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Ленинские горы 1, 119991 Москва, Россия

³Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, Миусская пл. 9, 125047 Москва, Россия

Аномально высокая температура и дефицит осадков в Сибири летом 2016 г. способствовали развитию массовых лесных пожаров, при этом особенности крупномасштабной атмосферной циркуляции, характерные для атмосферного блокирования дипольного типа, способствовали аномальному (восточному) переносу продуктов горения сибирских лесов в Европу и крупномасштабному задымлению атмосферы Северной Евразии на площади более 16 млн. км² [1–5].

С привлечением данных реанализа MERRA-2 проведен анализ пространственных и временных вариаций в атмосфере над Северной Евразией летом 2016 г. общего содержания черного углерода (black carbon (BC)) в атмосферном столбе. Отмечены особенности пространственных распределений аномалий BC в ходе развития и ослабления массовых лесных пожаров в Сибири. Получены оценки массового содержания BC над различными регионами Северной Евразии для различных стадий пожарной активности в сопоставлении с соответствующими оценками массового содержания дымового аэрозоля. С привлечением дисперсионной модели HYSPLIT проведен анализ характерных траекторий воздушных частиц от лесных пожаров в Центральной Сибири в Европу с оценками эффективных высот, скоростей и пространственных масштабов дальнего аномального переноса BC в атмосфере Северной Евразии летом 2016 г.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 19-17-00240).

1. Интенсивные атмосферные вихри и их динамика. Под ред. И.И.Мохова, М.В. Курганского, О.Г. Чхетиани. М.: ГЕОС. 2018. 482 с.

2. Ситнов С.А., Мохов И.И., Горчаков Г.И., Джолла А.В. Дымная мгла над европейской территорией России летом 2016 года: связь с лесными пожарами в Сибири и аномалиями атмосферной циркуляции // Метеорология и гидрология. 2017. № 8. С. 50–63.

3. Ситнов С.А., Мохов И.И., Горчаков Г.И. Связь задымления атмосферы европейской территории России летом 2016 года с лесными пожарами в Сибири и аномалиями атмосферной циркуляции // Доклады АН. 2017. Т. 472, № 4. С. 456–461.

4. Sitnov S.A., Mokhov I.I. Variations in atmospheric composition over Northern Eurasia regions under weather and climate anomalies associated with atmospheric blocking events // IOP Conf. Series: Earth Environ. Sci. 2019. V. 231. 012049.
5. Gorchakov G.I., Sitnov S.A., Karpov A.V. et al. Large-scale hazes over Eurasia in July 2016: Siberian smoke haze evolution // IOP Conf. Series: Earth Environ. Sci. 2019. V. 231. 012019.

Black carbon in the atmosphere over Northern Eurasia during Siberian forest fires in the summer of 2016 (according to MERRA-2 data)

S.A. Sitnov¹, I.I. Mokhov^{1,2}, G.I. Gorchakov¹, A.A. Likhoshesterova³

¹A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics, RAS, Pyzhevsky 3, Moscow 119017, Russia

²M.V. Lomonosov Moscow State University, Leninskiye Gory 1, Moscow 119991, Russia

³D.I. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Miusskaya sq. 2, Moscow 125047, Russia

Anomalously hot weather and precipitation deficit, noted in Siberia in the summer of 2016, contributed to the development of massive forest fires in the region, at that the persistent peculiarities of the large-scale atmospheric circulation, which are characteristic for the atmospheric blocking of the dipole type, contributed to the long-range transfer of the combustion products of Siberian forest fires to Europe and thus to the large-scale smoke blanketing of the territory of Northern Eurasia, with an area of more than 16 million km² [1–5].

In this paper, using the MERRA-2 reanalysis data, we study the spatial and temporal variations of the black carbon (BC) column mass density over Northern Eurasia in the summer of 2016. The spatial distributions of the anomalies of BC during the development and decay of wildfires are analyzed. Estimates are given for the mass content of BC in the atmospheric column over various regions of Northern Eurasia and for different stages of the forest fire activity, including their comparison with the corresponding estimates of the mass content of smoke. Using the dispersion model HYSPLIT, the characteristic trajectories of air particles from forest fires in Central Siberia to Europe are analyzed with estimates of the effective heights, speeds and spatial scales of the long-range anomalous (westward) air mass transport in the atmosphere of Northern Eurasia in the summer of 2016.

This work was supported by the Russian Science Foundation (Grant No. 19-17-00240).

1. Intense atmospheric vortices and their dynamics. I.I. Mokhov, M.V. Kurgansky, O.G. Chkhetiani (eds.). Moscow: GEOS. 2018. 482 p. (in Russian)
2. Sitnov S.A., Mokhov I.I., Gorchakov G.I., Dzhola A.V. Smoke haze over the European part of Russia in the summer of 2016: A link to wildfires in Siberia and atmospheric circulation anomalies // Russ. Meteorol. Hydrol. 2017. V. 42, No. 8. P. 518–528.
3. Sitnov S.A., Mokhov I.I., Gorchakov G.I. The Link between Smoke Blanketing of European Russia in Summer 2016, Siberian Wildfires and Anomalies of Large-Scale Atmospheric Circulation // Dokl. Earth Sci. 2017. V. 472. Part 2. P. 190–195.
4. Sitnov S.A., Mokhov I.I. Variations in atmospheric composition over Northern Eurasia regions under weather and climate anomalies associated with atmospheric blocking events // IOP Conf. Series: Earth Environ. Sci. 2019. V. 231. 012049.
5. Gorchakov G.I., Sitnov S.A., Karpov A.V. et al. Large-scale hazes over Eurasia in July 2016: Siberian smoke haze evolution // IOP Conf. Series: Earth Environ. Sci. 2019. V. 231. 012019.

Конденсационные свойства субчастиц пылицы

Иванова О.А. (junga2007@mail.ru), Михайлов Е.Ф., Небосько Е.Ю., Власенко С.С.,
Рышкевич Т.И.

Санкт-Петербургский государственный университет, физ. фак., Университетская наб. 7/9, 199034
Санкт-Петербург, Россия

Частицы биологического происхождения, такие как пыльца растений, относятся к числу наименее изученных аэрозольных компонент атмосферы, в то время как их вклад в общую аэрозольную массу составляет 15–25% [1]. Ряд лабораторных экспериментов показал, что первичные биочастицы являются активными ядрами конденсации и льдообразования,

таким образом, оказывают влияние на формирование облачных систем и осадков [2, 3]. Влияние же вторичных субмикронных частиц, которые образуются при распаде первичных аэрозолей в условиях высокой влажности (осмотический шок), на эти процессы остаётся малоизученным, что приводит к неточностям в модельных расчётах.

В данной работе описана методика и представлены результаты измерений конденсационной активности водорастворимых субмикронных частиц, полученных в результате водной экстракции пыльцевых гранул берёзы (*Betula pendula*), сосны (*Pinus silvestris*) и рапса (*Brassica napus*). Измерения были выполнены при помощи тандема спектрометра облачных ядер конденсации и дифференциального анализатора подвижности частиц. Для интервала размеров 20–270 нм в диапазоне пересыщений 0.1–1.1% получены данные о концентрациях облачных ядер конденсации, параметрах облачной активации частиц, а также коэффициента гигроскопичности κ , характеризующего влияние химического состава на конденсационную активность. Его средние значения для субпыльцевых частиц берёзы, сосны и рапса составили 0.12 ± 0.01 , 0.12 ± 0.02 , 0.14 ± 0.01 , соответственно. Полученные значения характерны для вторичного органического аэрозоля с параметром κ в интервале 0.1–0.2. Данные измерений показали, что субмикронные частицы биологического происхождения способны участвовать в формировании и модификации облачных систем.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант №18-17-00076) и ресурсного центра СПбГУ «Геомодель».

1. Jaenicke R. Abundance of cellular material and proteins in the atmosphere // *Science*. 2005. V. 308. P. 73.
2. Mohler O., DeMott P.J., Vali G. & Levin Z. Microbiology and atmospheric processes: the role of biological particles in cloud physics // *Biogeosciences*. 2007. V. 4. P. 1059–1071.
3. Pope F.D. Pollen grains are efficient cloud condensation nuclei // *Environ. Res. Lett.* 2010. V.5, No 4. 044015.

Cloud Condensation Nuclei properties of subpollen particles

O.A. Ivanova, E.F. Mikhailov, E.Yu. Nebosko, S.S. Vlasenko, T.I. Ryshkevich
Saint-Petersburg State University, Physics Faculty, 7/9 Universitetskaya nab., 199034 Saint-Petersburg, Russia

The least understood atmospheric aerosol components include the biogenic aerosols, such as pollen grains, which make a significant contribution (15–25%) to the total aerosol component in atmosphere [1]. A number of prior studies have showed that primary biogenic aerosols have the high ability to act as cloud condensation nuclei (CCN) and ice nuclei, thus they have an impact on the formation of cloud systems and precipitations [2, 3]. Under high humidity pollen grains can rupture to form submicron subpollen particles (SPP) that as well can serve as CCN. Their impact keeps understudied that leads to significant inaccuracy in the model estimations.

In this study the CCN ability of 3 different types of water-soluble SPP obtained from the water extraction of pollen grains of birch (*Betula pendula*), pine (*Pinus silvestris*) and rape (*Brassica napus*) samples was analyzed by using the tandem of the CCN counter and Differential Mobility Analyzer. In the size range of 20–270 nm the CCN concentration of the size-selected particles and cloud condensation nuclei parameters for the water vapor supersaturation range of 0.1–1.1% were determined. Also the parameter κ which characterizes the chemical composition effect on the hygroscopicity of CCN-active particles has been determined. Its average value for birch, pine and rape subpollen particles were 0.12 ± 0.01 , 0.12 ± 0.02 , 0.14 ± 0.01 , respectively. The obtained values are typical for the secondary organic aerosols with κ in the range of 0.1–0.2. Measurement data showed that submicron biogenic particles are able to participate in the formation and modification of cloud systems.

This work was supported by the Russian Science Foundation (grant №18-17-00076) and the Geo Environmental Research Center “Geomodel” of the Saint-Petersburg State University.

1. Jaenicke R. Abundance of cellular material and proteins in the atmosphere // *Science*. 2005. V. 308. P. 73.
2. Mohler O., DeMott P.J., Vali G. & Levin Z. Microbiology and atmospheric processes: the role of biological particles in cloud physics // *Biogeosciences*. 2007. V. 4. P. 1059–1071.
3. Pope F.D. Pollen grains are efficient cloud condensation nuclei // *Environ. Res. Lett.* 2010. V.5, No 4. 044015.

Пространственно-временная изменчивость аэрозольной оптической толщины в сибирской дымной мгле летом 2016 г.

Гушин Р.А.^{1,2} (roma-max7@mail.ru), Горчаков Г.И.¹, Карпов А.В.¹, Даденко О.И.^{1,2},
Текарев Р.Р.³

¹Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Пыжевский пер. 3, 119017 Москва, Россия

²МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, Россия.

³Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, физ. факультет, Ленинские горы 1,
119992 Москва, Россия

Возникшая на территории Сибири в июле 2016 г. крупномасштабная дымная мгла распространилась на европейскую часть России (ЕЧР), Белоруссию и другие страны Европы [1, 2]. Эволюция пространственного распределения аэрозольной оптической толщины (АОТ) над Евразией в июле 2016 г. была исследована по данным мониторинга с помощью спектрометров MODIS, установленных на спутниках Aqua и Terra [3]. Был обнаружен на территории Северной Евразии мега-шлейф дымового аэрозоля длиной примерно 5000 км.

Выполнен статистический анализ вариаций АОТ. Для четырех этапов эволюции Сибирской дымной мглы получены эмпирические функции распределения АОТ MODIS (длина волны 550 нм) [3]. Проанализирована временная изменчивость АОТ в июле 2016 г. на станциях AERONET в Сибири (Tomsk, Irkutsk) на Урале (Ekaterinburg), на ЕЧР (Moscow, Zvenigorod) и на территории ряда стран Европы (Helsinki, Minsk, Berlin, Moldova, Galata Platform и др.) Показано, что в июле 2016 г. повышенные значения АОТ на указанных станциях были обусловлены дальним переносом дымового аэрозоля из Сибири.

О вертикальных профилях характеристик дымового аэрозоля можно судить по данным зондирования с помощью лидара CALIOP, установленного на спутнике CALIPSO [4]. Были проанализированы результаты восстановления вертикальных профилей коэффициента ослабления дымового аэрозоля на длине волны 532 нм в сибирской дымной мгле. Построены горизонтальные профили АОТ на меридианах Москвы и Минска, а также на других направлениях. По данным реанализа получены вертикальные профили скорости воздуха при задымлении атмосферы в июле 2016 г. Полученные результаты использованы для оценки адвективных потоков дымового аэрозоля при дальнем переносе воздушных масс.

1. Ситнов С.А., Мохов И.И., Горчаков Г.И. Связь задымления атмосферы европейской территории России летом 2016 года с лесными пожарами в Сибири и аномалиями атмосферной циркуляции // Доклады АН. 2017. Т. 472, №4. С. 456–461.
2. Gorchakov G.I., Sitnov S.A., Karpov A.V. et al. Siberian smoke haze over Europe in July 2016 // Proc. SPIE. 2018. 108330O.
3. Gorchakov G.I., Sitnov S.A., Karpov A.V. et al. Large-scale hazes over Eurasia in July 2016: Siberian smoke haze evolution // IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 2019. V. 231. 012019.
4. Amiridis V., Giannakaki E., Balis D. S. et al. Smoke injection heights from agricultural burning in Eastern Europe as seen by CALIPSO // Atmos. Chem. Phys. 2010. V. 10. P. 1167–1176.

Siberian smoke haze in Summer 2016: Spatio-temporal variability of aerosol optical depth

R.A. Gushchin^{1,2} (roma-max7@mail.ru), G.I. Gorchakov¹, A.V. Karpov¹, O.I. Datsenko^{1,2},
R.R. Tekarev³

¹A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics RAS, 3 Pyzhevsky per., 119017 Moscow, Russia

²MIREA – Russian University of Technology, Moscow, Russia

³M.V. Lomonosov Moscow State University, Physics Faculty, 1 Leninsky gory, 119992 Moscow, Russia

In July 2016 mass forest fires were arose in Siberia. Owing to anomalous eastern transport of the air masses significant part of Siberia was enveloped by smoke haze. Further Siberian smoke haze propagated to European part of Russia (EPR) and European countries including Belorus, Finland, Poland, Germany, Romania and Bulgaria [1, 2]. Evolution of the spatial distribution of the aerosol optical depth (AOD) in July 2016 was analyzed from monitoring data received by means of MODIS spectrometers installed at Aqua and Terra satellites [3]. Smoke aerosol mega-plume as long as 5000 km was discovered over Northern Eurasia.

Statistical analysis of the AOD variations was carried out. Empirical distribution functions of AOD MODIS (wavelength 550 nm) for four evolution periods of Siberian smoke haze were determined. AOD temporal variability in summer 2016 at AERONET stations in Siberia (Tomsk, Irkutsk), at Urals (Ekaterinburg), at EPR (Moscow, Zvenigorod) and in a number of European countries (Minsk, Helsinki, Moldova, Galata Platform) was studied. It is shown that AOD enhanced values at these AERONET stations in July 2016 were due to the smoke aerosol long-range transport.

Vertical profiles of extinction coefficient (wavelength 532 nm) in Siberian smoke haze were received using CALIOP monitoring data [4]. AOD Horizontal profiles for Moscow and Minsk meridians and also for other directions were contracted. Using re-analysis data vertical profiles of wind velocity were calculated in the event of smoke haze. Results obtained were used for assessment of the smoke aerosol adjective fluxes during long-range transport.

1. Sitnov S.A., Mokhov I.I. and Gorchakov G.I. The Link between Smoke Blanketing of European Russia in Summer 2016, Siberian Wildfires and Anomalies of Large-Scale Atmospheric Circulation // Dokl. Earth Sci. 2017. V 472, No 2. P 190–195.
2. Gorchakov G.I., Sitnov S.A., Karpov A.V. et al. Siberian smoke haze over Europe in July 2016 // Proc. SPIE. 2018. 108330O.
3. Gorchakov G.I., Sitnov S.A., Karpov A.V. et al. Large-scale hazes over Eurasia in July 2016: Siberian smoke haze evolution // IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 2019. V. 231. 012019.
4. Amiridis V., Giannakaki E., Balis D. S. et al. Smoke injection heights from agricultural burning in Eastern Europe as seen by CALIPSO // Atmos. Chem. Phys. 2010. V. 10. P. 1167–1176.

Моделирование рассеяния света частицами произвольной формы с использованием эллипсоидов

Фарафонов В.Г. (far@aanet.ru), Устимов В.И., Ильин В.Б., Прокопьева М.С.,
Тулегенов А.Р.

*Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения; ул. Б.
Морская 67, 190000 Санкт-Петербург, Россия*

Предлагается эллипсоидальная модель несферических рассеивателей. Найдены условия, при которых эффективный эллипсоид и рассеиватель произвольной формы имеют близкие оптические свойства. Эти условия используют объем рассеивателя и отношение его продольного и поперечного размеров. Для определения области применимости нашей эллипсоидальной модели мы выполнили обширные численные расчеты рассеяния света несферическими частицами разнообразной формы (параллелепипедов, конусов, конечных цилиндров и т.д.).

Оптические свойства таких частиц рассчитывались с использованием программы, основанной на так называемом приближении дискретных диполей (DDA), которое является точным методом решения проблемы светорассеяния [1]. Для расчета оптических свойств сфероидов (которые удобны для моделирования осесимметричных частиц) использовалась программа, основанная на методе разделения переменных (SVM) [2]. Найдено, что оптические свойства несферических частиц и соответствующих им эллипсоидальных моделей отличаются менее чем на 10% в очень широкой области значений параметров. А именно: для дифракционного параметра $x = 2\pi r/\lambda$ (где r – радиус шара того же объема, λ – длина волны падающего излучения) – в пределах от 0 до 6, для отношений продольного и поперечного размеров – от 1 до 10 и для всех ориентаций рассеивателя и показателей преломления, характерных для диэлектриков. Усреднение оптических свойств рассеивателей с учетом их распределения по размерам и ориентациям должно улучшить точность нашей эллипсоидальной модели. Таким образом, предлагаемая модель может быть полезна при решении практических вопросов, связанных с рассеянием света несферическими частицами различной формы.

Работа частично поддержана грантами СПбГУАП (2019 г.) и РФФИ 18-52-52006.

1. Yurkin M.A., Hoekstra A.G. The discrete-dipole-approximation code ADDA. Capabilities and known limitations // Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer. 2011. V. 112, No 13. P. 2234–2247.
2. Voshchinnikov N.V., Farafonov V.G. Optical properties of spheroidal particles // Astrophysics & Space Science. 1993. V. 204, No 1. P. 19–86.

Modelling of light scattering by particles of arbitrary shape using ellipsoids

V.G. Farafonov (far@aanet.ru), V.I. Ustimov, V.B. Il'in, M.S. Prokopjeva, A.R. Tulegenov
Saint-Peterburg State University of Aerospace Instrumentation, 67 B. Morskaya, 190000 Saint-Petersburg,
Russia

We suggest an ellipsoidal model of non-spherical scatterers. We found the conditions under which an “efficient” ellipsoid and a scatterer of the arbitrary shape possess similar optical properties. The conditions include the volume of the scatterer and its ratio of the longitudinal to transverse dimension. To investigate the range of applicability of our ellipsoidal model, we have performed extensive numerical simulations of light scattering by non-spherical particles of various shapes (parallelepipeds, cones, finite size cylinders, etc.).

The optical properties of such particles were calculated by using a code based on the discrete dipole approximation (DDA) that is a rigid method to solve the light scattering problem [1]. The optical properties of the spheroids (those can model axisymmetric scatterers) were computed with a code based on the separation of variables method (SVM) [2]. We have found that the optical properties of non-spherical scatterers differ from the corresponding ellipsoidal models by less than 10% in a very wide range of parameter values. These ranges are 0–6 for the diffraction parameter $x = 2\pi r/\lambda$ (where r is the radius of an equal volume sphere, λ is the wavelength of the incident radiation) and 1–10 for the ratio of the longitudinal to transverse dimension for all scatterer orientations and the refractive indexes typical for dielectrics. Averaging of the optical properties over the orientation and size distributions of real scatterers should increase the accuracy of the ellipsoidal model. Thus, the model which we suggest can be useful in solution of practical problems including the light scattering by non-spherical particles of different shapes.

The work was partly supported by grants of SPbUAI for 2019 and RFFI 18-52-52006.

1. Yurkin M.A., Hoekstra A.G. The discrete-dipole-approximation code ADDA. Capabilities and known limitations // Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer. 2011. V. 112, No 13. P. 2234–2247.
2. Voshchinnikov N.V., Farafonov V.G. Optical properties of spheroidal particles // Astrophysics & Space Science. 1993. V. 204, No 1. P. 19–86.

Простое приближение для рассеяния света слоистыми сфероидами

Фарафонов В.Г. (far@aanet.ru), Устимов В.И., Ильин В.Б., Соколовская М.В.,
Вешев Н.А.

*Санкт-Петербургский гос. университет аэрокосмического приборостроения, ул. Б. Морская 67, 190000
Санкт-Петербург, Россия*

Рассеиватели в атмосфере обычно имеют несферическую форму и иногда слоистую структуру. Моделирование рассеяния света такими частицами является сложной вычислительной задачей. Поэтому часто используется модель, основанная на распространении теории Ми на слоистые шары. В тех случаях, когда важны эффекты формы рассеивателей, рассматриваются слоистые сфероиды. Универсальные точные методы (например, приближение дискретных диполей), используемые для решения проблемы рассеяния света слоистым сфероидом, по-прежнему требуют значительного времени вычислений. Более эффективным точным методом является разделение переменных в сфероидальных координатах, однако оно может быть применено только к частицам, у которых поверхности слоев софокусны. Если размер подобных частиц мал в сравнении с длиной волны падающего излучения, то можно использовать известное аналитическое решение, которое основывается на решении соответствующей электростатической задачи.

В данной работе мы рассматриваем электростатическую проблему для двухслойных сфероидов с несофокусными границами слоя. Используя разложения потенциалов полей по аналогам сфероидальных функций, связанным с обеими границами слоев, и соотношения между такими функциями, найденные нами ранее [1], мы получили решение, выраженное через бесконечные матрицы. Если обрезать эти матрицы до размера 2×2 , то получается аналитическое решение для соответствующих софокусных сфероидов. Таким образом, это простое аналитическое решение является некоторым приближением для общего случая сфероидов с несофокусными слоями. Для исследования области применимости такого приближения мы выполнили численные тесты, которые показали, что приближение имеет точность порядка 1% в широкой области значений параметров задачи. Предложенное приближение легко распространяется на многослойные сфероиды.

Работа частично поддержана грантами СПбГУАП (2019 г.) и РФФИ 18-52-52006.

1. Фарафонов В.Г., Устимов В.И., Ильин В.Б. Рассеяние света малыми многослойными несофокусными сфероидом с использованием подходящих сфероидальных базисов // Оптика и спектроскопия. 2018. Т. 125, № 6. С. 786–794.

A simple approximation for light scattering by layered spheroids

V.G. Farafonov (far@aanet.ru), V.I. Ustimov, V.B. Il'in, M.V. Sokolovskaya, N.A. Veshev
Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, 67 B. Morskaya, 190000 St.Petersburg, Russia

Atmospheric scatterers often have non-spherical shapes and sometimes layered structure. Simulation of light scattering by such particles is a complicated computational task. Hence one often applies a model based on extension of the Mie theory on layered spheres. When scatterer shape effects are important, one considers layered spheroids. The universal exact methods (e.g., the Discrete Dipole Approximation) used to solve the light scattering problem for a layered spheroid are still computational time consuming. A more efficient exact method is the Separation of Variables in spheroidal coordinates, but it can be applied just to particles whose layer boundaries are confocal. When such spheroids are small in comparison with the wavelength of incident radiation, there is a simple analytic solution. This solution is based on solving the corresponding electrostatic problem.

In this paper we consider the electrostatic problem for core-mantle spheroids with non-confocal boundaries of layers. We use expansions of field potentials in analogs of spheroidal functions related to both layer boundaries, and relations between such spheroidal functions earlier obtained by us [1]. We find the solution expressed through infinite matrices. When one truncates these matrices to 2×2 ones, one gets the analytic solution known for confocal layer spheroids. So, this simple solution is an approximate one for the general case of non-confocal layered spheroids. To investigate the range of applicability of such approximation, we have performed numerical tests and found that the approximation had the accuracy of about 1% in a wide region of parameter values. Obviously, the suggested approximation can easily be extended on multilayered spheroids.

The work was partly supported by grants of SPbUAI for 2019 and RFFI 18-52-52006.

1. Farafonov V.G., Ustimov V.I., Il'in V.B. Light Scattering by Small Multilayer Nonconfocal Spheroids Using Suitable Spheroidal Basis Sets // Optics & Spectroscopy. 2018. V. 125, № 6. P. 957–965.

Гигроскопические свойства биологических аэрозолей

Костюков А.А. (pohran@gmail.com), Михайлов Е.Ф.

Санкт-Петербургский государственный университет, физ. фак., Университетская наб. 7/9, 199034
Санкт-Петербург, Россия

Биологический аэрозоль (пыльца растений, споры грибов, остатки растительности, бактерии и др.) составляет от 15 до 25% глобальной аэрозольной массы. Как и любой другой аэрозоль, биочастицы участвуют во многих атмосферных процессах – рассеивают и

поглощают свет, служат ядрами конденсации. Но при этом степень влияния биоаэрозолей на атмосферные процессы остается плохо изученной.

Цель данной работы – получение экспериментальных данных о механизмах взаимодействия биочастиц с атмосферным водяным паром, их гигроскопических свойствах. Подобные данные можно использовать для упрощения прогнозирования результата их влияния на радиационное возмущение атмосферы. В ходе работы была разработана и значительно усовершенствована методика генерации, подготовки и определения диаметра пыльцевых зерен в трех режимах – гидратации, дегидратации и реструктуринга. Получены уникальные данные по гигроскопическому росту и свойствам для водорастворимых продуктов трех типов пыльцы – сосны, березы и рапса в диапазоне относительной влажности ~ 5–97%, а также определены факторы гигроскопического роста частиц в режимах гидратации и дегидратации. На основе модели Келера, определен параметр гигроскопичности субчастиц пыльцы сосны, березы и рапса. Полученные значения показывают, что в атмосферных условиях вторичные биологические частицы способны к гигроскопическому росту, а также участвовать в процессах образования облачных капель. В целом, полученные в ходе измерений результаты, в частности измеренные значения параметра гигроскопичности, могут быть использованы для расчетов, связанных с учетом биологического аэрозоля в климатических моделях различного уровня.

Работа выполнялась при поддержке РФФИ (грант №18-17-00076) и ресурсного центра СПбГУ «Геомодель».

Hygroscopic properties of biological aerosols

A.A. Kostyukov (pohran@gmail.com), E.F. Mikhailov

Saint-Petersburg State University, Physics Faculty, 7/9 Universitetskaya nab., 199034 Saint-Petersburg, Russia

Biological aerosol (plant pollen, fungal spores, vegetation residues, bacteria, etc.) makes up from 15 to 25% of the global aerosol mass. Like any other aerosol, bioparticles are involved in many atmospheric processes – they scatter and absorb light, serve as condensation nuclei. At the same time, the degree of influence of bioaerosols on atmospheric processes remains poorly understood.

The purpose of this work is to obtain experimental data on the mechanisms of interaction of bioparticles with atmospheric water vapor and their hygroscopic properties. Such data can be used to simplify the prediction of the result of their influence on the atmospheric radiation perturbation. In the course of the work, the methods for generating, preparing and determining the diameter of pollen grains in three modes – hydration, dehydration, and restructuring – were developed and significantly improved. Unique data on hygroscopic growth and properties for water-soluble products of three types of pollen – pine, birch and rape – in the relative humidity range of ~ 5–97% were obtained, and factors of hygroscopic particle growth under conditions of hydration and dehydration were determined. On the basis of the Koehler model, the hygroscopicity parameter of subparticles of pine, birch and rape pollen is determined. The obtained values show that under atmospheric conditions, secondary biological particles are capable of hygroscopic growth, as well as participate in the formation of cloud droplets. In general, the results obtained during the measurements, in particular the measured values of the hygroscopicity parameter, can be used for calculations related to taking into account biological aerosol in climate models of various levels.

The work was carried out with the support of the RNF (grant No. 18-17-00076) and the resource center of SPSU “Geomodel”.

Изменчивость атмосферных аэрозолей по данным наземных измерений в пригороде Санкт-Петербурга

Аникин С.С. (iguanodon-13@mail.ru), Михайлов Е.Ф., Волкова К.А.

*Санкт-Петербургский государственный университет, физ. фак., Университетская наб. 7/9, 199034
Санкт-Петербург, Россия*

Изменчивость атмосферного аэрозоля играет значимую роль для радиационного баланса планеты. Мониторинг различных аэрозольных характеристик важен для понимания процессов, воздействующих на климат. С 2015 года в СПбГУ (Петергоф) ведутся непрерывные измерения массовой концентрации аэрозоля с использованием спектрометра GRIMM Data Logger 1142.M5 для частиц размеров 0.265–1 мкм (PM1), 0.265–2.5 мкм (PM2.5) и 0.265–10 мкм (PM10).

Анализ временного хода аэрозольных массовых концентраций в Петергофе был дополнен измерениями приземных газовых концентраций и других аэрозольных характеристик, выполняющимися в том же районе. Кроме того, для интерпретации наблюдаемой изменчивости аэрозоля было проведено сравнение с данными измерений станции мониторинга качества воздуха в Ломоносове и рассмотрены обратные траектории движения воздушных масс с использованием модели HYSPLIT.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант 18-17-00076). Функционирование измерительной аппаратуры обеспечивалось ресурсным центром «Геомодель» Санкт-Петербургского государственного университета.

Variability of surface atmospheric aerosols according to ground-based measurements near St. Petersburg

Anikin S.S. (iguanodon-13@mail.ru), Mikhailov E.F., Volkova K.A.

Saint-Petersburg State University, Physics Faculty, 7/9 Universitetskaya nab., 199034 Saint-Petersburg, Russia

Changes of atmospheric aerosol characteristics play the key role for the radiative balance of the Earth. The monitoring of different aerosol characteristics is important for the understanding of the processes affected the climate. In SPbSU (Peterhof) the continuous measurements of mass concentration of aerosols have been performing since 2015 using the spectrometer GRIMM Data Logger 1142.M5 in the following size ranges: 0.265–1 μm (PM1), 0.265–2.5 μm (PM2.5) and 0.265–10 μm (PM10).

Analysis of temporal dependence of aerosol mass concentrations for the site Peterhof was supplemented by the measurements of surface gaseous concentrations and other aerosol characteristics registered at the same location. Moreover, for interpretation of the observed aerosol variability the comparison with data of the air quality monitoring station in Lomonosov and plotting of backward trajectories of air mass movement using HYSPLIT model were carried out.

The research was supported by Russian Science Foundation through the project No. 18-17-00076. The operation of the RPG-HATPRO instrument was provided by the Research Centre GEOMODEL of St.Petersburg State University.

**СЕКЦИЯ 5. "РАДИАЦИОННАЯ КЛИМАТОЛОГИЯ и РАДИАЦИОННЫЕ АЛГОРИТМЫ в
МОДЕЛЯХ ПРОГНОЗА ПОГОДЫ и КЛИМАТА"**

Председатель: д.ф.-м.н. **О.М. Покровский** (РГГМУ, СПб, Россия)

Сопредседатели: акад. РАН **И.И. Мохов** (ИФА РАН, Москва, Россия), д.г.н. **Н.Е. Чубарова** (МГУ, Москва, Россия), д.ф.-м.н. **Б.А. Фомин** (Курчатовский институт, Москва, Россия), к.ф.-м.н. **П.В. Спорышев** (ГГО, СПб, Россия)

**SESSION 5. "RADIATIVE CLIMATOLOGY and ALGORITHMS in MODELS for WEATHER and
CLIMATE FORECASTING"**

Chairman: Prof. **O.M. Pokrovsky** (MGO, SPb, Russia)

Co-chairmen: Acad. of RAS **I.I. Mokhov** (IAP RAS, Moscow, Russia), Prof. **N.E. Chubarova** (MSU, Moscow, Russia), Dr. **P.V. Sporyshev** (MGO, SPb, Russia), Prof. **B.A. Fomin** (Kurchatov Institute, Moscow, Russia)

**Изменения облачности в период глобального потепления по
результатам международного спутникового проекта ISCCP**

Покровский О.М. (pokrov_06@mail.ru)

*Российский государственный гидрометеорологический университет, Воронежская ул. 79, 192007
Санкт-Петербург*

Представлены результаты анализа климатических рядов глобальной и региональной облачности за 1983–2009 гг. Данные получены в рамках международного спутникового проекта ISCCP. Описывается технология статистического анализа временных рядов, включающая алгоритм сглаживания и вейвлет анализ. Обе методики предназначены для анализа нестационарных рядов.

Результаты анализа показывают, что как глобальная, так и региональная облачность демонстрируют убывание на 2–6%. Наибольшее убывание наблюдается в тропиках и над океанами. Над сушей убывание минимально. Коэффициент взаимной корреляции рядов глобальной облачности с одной стороны и рядов глобальных температур воздуха и поверхности океана с другой стороны достигает значений (–0.84)–(–0.86). Коэффициент детерминации, характеризующий точность регрессии для прогноза изменений глобальной температуры на основе данных об изменениях нижней облачности, составляет в этом случае 0.316.

**Cloud changes in the period of global warming: the results of the
international satellite project ISCCP**

O.M. Pokrovsky (pokrov_06@mail.ru)

Russian State Hydrometeorological University, 79 Voronezhskaya, 192007 Saint-Petersburg, Russia

The results of analysis of climatic series of global and regional cloudiness for 1983-2009 are presented. Data were obtained in the framework of the international satellite project ISCCP. The technology of statistical time series analysis including smoothing algorithm and wavelet analysis is described. Both methods are intended for the analysis of non-stationary series.

The results of the analysis show that both global and regional cloudiness show a decrease of 2–6%. The greatest decrease is observed in the tropics and over oceans. Over land, the decrease is minimal. The correlation coefficient between the global cloud series on the one hand and the global air and ocean surface temperature series on the other hand reaches values (–0.84)–(–0.86). The coefficient of determination that characterizes the accuracy of the regression for the prediction of global temperature changes based on data on changes in the lower cloud, in this case is 0.316.

Энтропийно–фрактальный анализ метеорологических данных

Фролькис В.А.^{1,2} (vfrolkis@vf13868.spb.edu), Могилина В.С.³

¹Главная геофизическая обсерватория им. А.И. Воейкова, ул. Карбышева 7, 194021 Санкт-Петербург, Россия

²Санкт-Петербургский государственный экономический университет, Садовая ул. 21, 191023 Санкт-Петербург, Россия

³Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, 2-я Красноармейская ул. 4, 190005 Санкт-Петербург, Россия

Вопрос о глобальном изменении климата не сходит с повестки дня. Происходит уменьшение количества зим с очень низкой температурой, также увеличивается температура приземного воздуха. На основе этих и других фактов делается вывод о глобальном потеплении. Причины, влияющие на потепление, могут быть достаточно разнообразными, они являются предметом широкой дискуссии. Климатическая система является сложной нестационарной открытой термодинамической системой с многочисленными нелинейными обратными связями, которые генерируют флуктуации ее параметров. Высокий уровень шума мешает оценить изменение тренда метеорологических параметров, заметить тонкие изменения в климатической системе, что в совокупности с нестационарностью, стохастичностью и негладкостью метеорологических полей затрудняет использование традиционных методов анализа и стимулируют поиск других подходов. Один из сравнительно новых способов изучения изменения состояния климатической системы состоит в использовании энтропийно-фрактального анализа, в основе которого лежит понятие выборочной энтропии. Метеорологические данные, вообще говоря, могут рассматриваться как произвольная выборка из вариаций параметра некоторого стохастического процесса, причем сама вариация может быть не гладкой и, даже, разрывной. Дополнительно, измерения вносят в данные и разрывы, и стохастичность, связанные с ошибками и спецификой измерений. Именно эти обстоятельства делают успешным применение энтропийно-фрактальной параметризации нестационарных временных метеорологических рядов, так как при надлежащем определении выборки такая параметризация нечувствительна к разрывам в данных и к вариациям шага по времени. Метод энтропийно-фрактального анализа позволяет проанализировать поведение метеорологических полей, оценить хаотическую составляющую климатической системы и ее изменчивость. Для этой цели рассматриваются первая (на амплитудном покрытии) и вторая (временном покрытии) информационные энтропии Шеннона, обобщенная энтропия Реньи, и на основе R/S анализа – показатель Херста.

Рассмотрены различные алгоритмы вычисления энтропии. Расчеты проведены на примере суточных минимальных, максимальных, а также среднесуточных температурных метеорологических данных по Санкт-Петербургу с 1920-го года. Показано, что изменение энтропии позволяет диагностировать перелом температурного тренда, а также то, что при потеплении увеличивается хаос, или, по крайней мере, растет уровень зашумленности, в климатической системе.

Entropy-fractal analysis of meteorological data

V.A. Frolkis^{1,2} (vfrolkis@vf13868.spb.edu), V.S. Mogilina³

¹A.I. Voeikov Main Geophysical Observatory, 7 Karbyshev str., 194021 Saint-Petersburg, Russia

²Saint Petersburg State University of Economics, 21 Sadovaya str., 191023 Saint-Petersburg, Russia

³Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, 4 2-st Krasnoarmeiskaya str., 190005 Saint-Petersburg, Russia

The issue of global climate change is on the agenda. There is a decrease in the number of winters with a very low temperature, also the temperature of the surface air increases. On the basis of these and other facts, it is concluded that there is a global warming. The causes of warming can be quite varied and are the subject of much discussion. The climate system is a complex non-

stationary open thermodynamic system with numerous nonlinear feedbacks that generate fluctuations in its parameters. The high noise level makes it difficult to assess changes in the trend of meteorological parameters, which together with the unsteadiness, stochasticity and inflexibility of meteorological fields makes it difficult to use traditional methods of analysis and stimulate the search for other approaches. One of the relatively new ways to study changes in the state of the climate system is to use entropy-fractal analysis, which is based on the concept of selective entropy. Meteorological data, generally speaking, can be considered as an random sample from the variations of the parameter of a stochastic process, and the variation itself may not be smooth and even discontinuous. Additionally, the measure makes to the data and discontinuities, and stochasticity associated with the specificity of the measurements. It is these circumstances that make the use of entropy-fractal parameterization of non-stationary time meteorological series successful, since such parameterization is not sensitive to data discontinuities and time step variations if the sample is properly determined. The method of entropy-fractal analysis allows to analyze the behavior of meteorological fields, to estimate the chaotic component of the climate system and its variability. For this purpose, the first (on the amplitude cover) and the second (time cover) Shannon information entropies, generalized Renyi entropy, and the Hurst exponent based on R/S analysis are considered.

Various algorithms for computing the entropy are reviewed. Calculations are carried out on the example of daily minimum, maximum and average daily temperature meteorological data for St. Petersburg since 1920. It is shown that the change in entropy makes it possible to diagnose a change in the temperature trend, as well as the fact that with warming the chaos increases, or at least the level of noise increases, in the climate system.

Аэрозольная составляющая атмосферы после 2000-ого года по данным российских континентальных и судовых наблюдений в системе AERONET

Русина Е.Н. (elnikrus@mail.ru), Радионов В.Ф., Сибир Е.Е.

Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, ул. Беринга 38, 199397 Санкт-Петербург, Россия

Непрерывное увеличение антропогенных выбросов в атмосферу вызывает рост содержания атмосферных аэрозолей даже на большом расстоянии от источников. Мониторинг оптических характеристик атмосферного аэрозоля в глобальном масштабе был начат в конце 1960-х годов, когда Всемирная Метеорологическая Организация организовала службу мониторинга фоновое уровня загрязнения атмосферы BARMON. В настоящее время наиболее крупной международной сетью слежения за аэрозольной составляющей в атмосфере является AERONET (AErosol RObotic NETwork).

В работе проанализированы уровни аэрозольного загрязнения по данным оптических наблюдений и динамика аэрозольной оптической толщины в разных географических регионах и условиях после 2000-ого года. Для этого были использованы опубликованные в Интернете данные AERONET (<https://aeronet.gsfc.nasa.gov>) на российских континентальных станциях и арктических зарубежных станциях AERONET. Эти данные рассматривались в сравнении с данными, полученными в Антарктиде на российской станции Мирный и станции AERONET Южный полюс (South Pole), а также данными наблюдений за аэрозольной оптической толщиной (AOT) на длине волны 500 нм во время нескольких рейсов российских научно-экспедиционных судов. Это позволило оценить специфику аэрозольного замутнения в различных районах Земного шара.

Установлено, что осредненный после 2000 года уровень AOT (500) на российских континентальных станциях AERONET (0.17 ± 0.02) вдвое превышает аналогичный уровень в Арктике (0.08 ± 0.02) и более чем в 7 раз средний уровень AOT в Антарктиде. Максимальные значения AOT (500) на континентальных российских станциях AERONET в исследуемый

период были обусловлены крупномасштабными лесными пожарами, в период которых среднемесячные значения могли приближаться к единице. Экстремально высокие аэрозольные оптические толщины в Арктике могут быть связаны как с адвективным переносом загрязненных воздушных масс из континентальных районов, так и с влиянием вулканических извержений. Максимальное среднегодовое значение AOT (500) в зарубежной Арктике были зафиксированы на станции Barrow в 2009 г., когда оно превысило величину 0,18.

Наиболее высокие уровни AOT (500) в районах, не подверженных антропогенному влиянию, характерны для широтных зон Атлантики, куда выносятся аридный аэрозоль с Африканского континента. Снижение уровня аэрозольного загрязнения к северу и югу от этой зоны происходит неодинаково. В «зеркальных» относительно экватора поясах средние значения AOT (500) в Северном полушарии заметно превышают соответствующие значения, полученные в Южном полушарии.

The aerosol component of the atmosphere after the year 2000 according to the Russian continental and marine observations in the AERONET system

E.N. Rusina (elnikrus@mail.ru), V.F. Radionov, E.E. Sibir
Arctic and Antarctic Research Institute, 38 Bering str., 199397 Saint-Petersburg, Russia

The continuous increase in anthropogenic emissions causes an increase in the content of atmospheric aerosols even at a great distance from sources. Monitoring of the optical characteristics of atmospheric aerosol on a global scale began in the late 1960s, when the World Meteorological Organization (WMO) organized the service for monitoring the background level of atmospheric pollution, BAPMON. Currently, AERONET (AErosol RObotic NETwork) is the largest international network monitoring the atmospheric aerosol.

Here, we used aerosol optical thickness (AOT) data from the Russian continental AERONET stations (<https://aeronet.gsfc.nasa.gov>) as well as from the foreign AERONET stations in the Arctic to analyze aerosol pollution levels and aerosol optical thickness dynamics in different geographical regions and conditions after year 2000. These data were compared then with the data from the Russian Mirny station and the South Pole AERONET station in the Antarctic, as well as with the AOT data of observations during several voyages of the Russian research vessels. This allowed us to assess the specifics of aerosol turbidity in different parts of the globe.

We found that after the year 2000, the average AOT (500) level at Russian continental AERONET stations (0.17 ± 0.02) was twice as high as in the Arctic (0.08 ± 0.02) and more than 7 times the average AOT level in Antarctic. The maximum AOT values at the continental Russian AERONET stations during the study period were due to large-scale forest fires, during which the average monthly values could approach 1. Extremely high aerosol optical thicknesses in the Arctic can be associated with the advective transport of contaminated air masses from the continental areas and with the influence of volcanic eruptions. The maximum AOT (500) values in the foreign Arctic (> 0.18) were recorded at the Barrow station in 2009.

The highest AOT (500) levels in areas not subjected to the anthropogenic influence are characteristic of the latitudinal zone of the Atlantic, to which the arid aerosol from the African continent is carried. The decrease in aerosol pollution to the North and South of this zone is unequal. In the "mirror" belts relative to the equator, the average AOT values in the Northern hemisphere significantly exceed the corresponding values obtained in the southern hemisphere.

Особенности пространственно-временного распределения аэрозольной оптической толщины на территории Московского региона по данным спутникового алгоритма MAIAC

Жданова Е.Ю.¹ (ekaterinazhdanova214@gmail.com), Чубарова Н.Е.¹, Ляпустин А.И.²
¹Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, географ. факультет, Ленинские горы
1, 119991, Москва, Россия

²Laboratory for Atmospheres, NASA Goddard Space Flight Center, Greenbelt, Maryland, USA

Для определения пространственно-временных особенностей аэрозольной оптической толщины (AOT) на территории Московского региона были применены данные спутникового алгоритма Multi-Angle Implementation of Atmospheric Correction (MAIAC) [1], которые имеют высокое пространственное разрешение 1 км и доступны за период измерений радиометра MODIS с 2000 года по настоящее время.

Проведенная валидация оценок AOT, полученных с помощью алгоритма MAIAC, по данным станций сети AERONET в Москве и Звенигороде, показала, что данные алгоритма MAIAC имеет меньшие ошибки относительно наземных данных по сравнению с другими аэрозольными продуктами MODIS. Важной отличительной особенностью данных MAIAC является отсутствие роста погрешности определения AOT на городской территории. Особенное внимание уделено сопоставлению оценок AOT для станций Москвы и Звенигорода по спутниковым и наземным данным. Рассмотрено влияние дальнего переноса и локальных источников на аэрозольное загрязнение в Московском регионе.

Работа выполнена при поддержке РФН (грант №18-17-00149).

1. Lyapustin, A., Wang, Y., Korkin, S., & Huang, D. MODIS Collection 6 MAIAC algorithm // Atmospheric Measurement Techniques, 2018. V.11, No 10. P. 5741–5765.

Features of spatial-temporal distribution of aerosol optical thickness over the territory of Moscow region according to MAIAC satellite algorithm

E.Yu. Zhdanova¹ (ekaterinazhdanova214@gmail.com), N.E. Chubarova¹, A.I. Lyapustin²

¹M.V. Lomonosov Moscow State University, Geography Faculty, 1 Leninsky Gory, 119991 Moscow, Russia

²Laboratory for Atmospheres, NASA Goddard Space Flight Center, Greenbelt, Maryland, USA

To determine spatial-temporal features of aerosol optical thickness (AOT) over the territory of Moscow region data of Multi-Angle Implementation of Atmospheric Correction (MAIAC) [1] were used. MAIAC AOT data have high spatial resolution of 1 km and are available from 2000 to the present.

Validation of MAIAC AOT estimates according to the data of AERONET stations in Moscow and Zvenigorod, has shown that AOT MAIAC has less errors relative to ground-based data compared to other MODIS aerosol products. An important distinguishing feature of AOT MAIAC data is no evident increasing in error of AOT evaluation over the urban territory. Special attention was paid to the comparison of AOT estimates for stations in Moscow and Zvenigorod using satellite and ground-based data. Influence of long-range transport and local sources on aerosol pollution over the territory of Moscow region is considered.

This work was supported by the RFN (grant No. 18-17-00149).

1. Lyapustin, A., Wang, Y., Korkin, S., & Huang, D. MODIS Collection 6 MAIAC algorithm // Atmospheric Measurement Techniques, 2018. V.11, No 10. P. 5741–5765.

Изменение радиационного режима Томска в конце XX–начале XXI в.в.

Складнева Т.К. (Tatyana@iao.ru), Белан Б.Д., Рассказчикова Т.М., Аршинова В.
Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, пл. Ак. Зюева 1, 634055 Томск, Россия

Сотрудники Института оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН ведут многолетний непрерывный мониторинг атмосферных параметров в приземном слое атмосферы на TOR-

станции, расположенной на северо-восточной окраине Томского Академгородка (56°28' с.ш., 85°03' в.д.). Комплекс оборудования состоит из нескольких блоков: аэрозольного, газоаналитического, метеорологического, радиационного и блока управления, сбора и передачи данных [1]. Измерения суммарной солнечной радиации проводятся стандартным пиранометром Ю.Д. Янишевского М-115М (диапазон измерения 0.3–2.4 мкм) с апреля 1995 г.

В докладе анализируются изменения суммарной солнечной радиации, облачности, продолжительности солнечного сияния (ПСС) и приземной температуры воздуха за период 1996–2017 гг. в Томске. Проведена оценка изменения ПСС и температуры путем сравнения средних значений за рассматриваемый период с нормами исторического (1961–1990 гг.) и текущего базового (1981–2010 гг.) периода, определенных Всемирным Метеорологическим конгрессом в 2015 году.

Показано, что среднегодовой приход суммарной солнечной радиации за 22-летний период составил 3791 ± 228 МДж/м², а коэффициент вариации годовых сумм суммарной радиации равнялся 6%. Наблюдается тенденция незначительного спада годового поступления суммарной радиации в Томске. Относительная величина тренда составила – 3%. Увеличивается количество общей и нижней облачности (относительная величина тренда 2% и 6% для общей и нижней облачности, соответственно). В общей облачности наблюдаются тенденции увеличения вклада облаков верхнего яруса и уменьшения – облаков среднего яруса. Отмечена достаточно высокая повторяемость пасмурного неба (10/10 баллов) от 15 до 27%, что повлекло уменьшение соотношения наблюдаемого годового значения ПСС к теоретически возможной продолжительности солнечного сияния в отдельные годы до 41%. Сокращается продолжительность солнечного сияния и в то же время увеличивается приземная температура воздуха. С 1953 по 2017 гг. в Томске наблюдается тенденция роста температуры (относительная величина тренда 65%). В рассматриваемый период (1996–2017 гг.) практически во все месяцы имеет место рост температуры относительно текущего базового периода (1981–2010 гг.), при этом рост температуры явно замедлился по сравнению с историческим периодом (1961–1990 гг.).

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 17-17-01095 «Исследование динамики состава воздуха и процессов ее определяющих в Сибирском регионе в условиях изменяющегося климата».

1. Давыдов Д.К., Белан Б.Д., Антохин П.Н. и др. Мониторинг атмосферных параметров: 25 лет TOR-станции ИОА СО РАН // Оптика атмосферы и океана. 2018. Т. 31, No 10. С. 845–853.

Change in the radiation regime of Tomsk in the late XX–early XXI centuries

T.K. Sklyadneva (Tatyana@iao.ru), B.D. Belan, T.M. Rasskazchikova, V. Arshinova
V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics SB RAS, 1 Ac. Zuev sq., 634055 Tomsk, Russia

Employees of the V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics SB RAS conduct long-term continuous monitoring of atmospheric parameters in the atmospheric surface layer at the TOR station located on the northeastern margin of the Tomsk Academgorodok (56°28' N, 85°03' E). The equipment complex consists of several units: aerosol, gas analytical, meteorological, radiation and control unit, data collection and transmission [1]. Measurements of total solar radiation have been carried out using a standard pyranometer Yu.D. Yanishevsky M-115M (measurement range 0.3–2.4 μm) since April 1995.

The results of the study of changes in the total solar radiation, cloudiness, sunshine duration (SD), and surface air temperature in Tomsk for the period 1996–2017 are analyzed in the paper. The change in the SD and temperature was estimated by comparing the average values for the period under consideration with the norms for the historical (1961–1990) and the current baseline period (1981–2010), determined by the World Meteorological Congress in 2015.

It is shown that the average annual of coming total solar radiation over a 22-year period was 3791 ± 228 MJ/m², and the coefficient of variation of the annual sums of total radiation was 6%.

The tendency of a slight negative trend of coming total radiation in Tomsk is noted. The relative value of the trend was – 3%. The amount of total and lower cloud cover increases (relative trend values of 2% and 6% for total and lower clouds, respectively). In total cloudiness, there are tendencies of increasing the contribution of the clouds of the upper tier and decreasing the clouds of the middle tier. The high repeatability of overcast skies (10/10 points) from 15 to 27% was noted. Therefore, a decrease in the ratio of the observed annual value of SD to the theoretically possible sunshine duration in some years to 41% is observed. The sunshine duration is reduced and, at the same time, the surface air temperature increases. The tendency of positive trend of surface air temperature from 1953 to 2017 in Tomsk is noted. The relative value of the trend is 65%. In the period under review (1996–2017), the temperature increased relative to the current base period (1981–2010) in almost all months, while the temperature increase was clearly slowed down compared with the historical period (1961–1990).

This work was supported by RSF, grant No 17-17-01095.

1. Davydov D.K., B.D. Belan, P.N. Antokhin et al. Monitoring of atmospheric parameters: 25 years of observations at the TOR station of IAO SB RAS // Atmospheric and Oceanic Optics. 2019. V. 32, No 2. P. 180–192.

Возможная связь движения магнитного полюса и изменения солнечной активности с прозрачностью атмосферы и климатом Арктики

Беликов Ю.Е.¹ (yury_belikov@mail.ru), Буров В.А.¹, Дышлевский С.В.²,
Котонаева Н.Г.¹, Лапшин В.Б.¹, Репин А.Ю.¹

¹Институт прикладной геофизики им. Е.К. Федорова, Ростокинская ул. 9, 129128 Москва, Россия

²МГИМО МИД России, пр. Вернадского 76, 119454 Москва, Россия

Анализ двух явлений – таяния ледового покрытия Арктики за последние десятилетия и движения Северного магнитного полюса, – проведенный на основе космических снимков НАСА и модели IRGF, показал, что потепление, которое сопровождается усиленным таянием ледового покрова, захватывает в основном Российскую зону Арктики и акваторию моря Бофорта, области, к которым приближается магнитный полюс. В то же время, в арктических восточных областях Канады, от которой магнитный полюс удаляется, этого эффекта не наблюдается или он слабый. При этом у берегов Канады сохраняется значительная доля многолетнего льда по сравнению с Российской зоной Арктики и акваторией моря Бофорта. Анализ показал, что вместе с магнитным полюсом сдвигаются и зоны, соответствующие контурам изолиний жесткости обрезания протонов, входящих в состав космических галактических лучей.

Согласно выдвигаемой гипотезе, основное влияние на изменение таяния льдов Арктики в последние десятилетия, примерно с 1984 по настоящее время, могут оказывать перемещения зон, ограниченных контурами изолиний жесткости обрезания, соответствующих энергиям протонов ~1–100 МэВ. При средней энергии 10 МэВ размер рассматриваемой зоны составляет ~2500–3000 км. На основе решения уравнения переноса излучения была показана принципиальная возможность и даны оценки увеличения потока солнечного излучения к поверхности в сумеречных условиях при появлении аэрозоля или тонких облаков в верхней тропосфере и стратосфере над плотной тропосферной облачностью, которая существует большую часть времени над территорией Арктики.

Перемещение магнитного полюса приводит, согласно нашей гипотезе, к перемещению некоторой эффективной области указанного размера, внутри которой повышена вероятность образования аэрозолей и тонких облаков на основе ионных кластеров в верхней тропосфере и стратосфере на высотах ~4–50 км. При этом уменьшение солнечной активности и, соответственно, усиление действия космических лучей на протяжении последних десятилетий привело к потеплению арктической зоны в целом, в то время как сдвиг

магнитного полюса за это же время привел к региональным отличиям в изменении климата в Арктике.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, грант № 18-05-00812-а.

Possible relationships between the magnetic pole motion and solar activity variations with atmospheric transparency and Arctic climate

Yu.E. Belikov¹ (yury_belikov@mail.ru), V.A. Burov¹, S.V. Dyshlevsky², N.G. Kotonayeva¹,
V.B. Lapshin¹, A.Yu. Repin¹

¹*E.K. Fedorov Institute of Applied Geophysics, 9 Rostokinskaya str., 129128 Moscow, Russia*

²*MGIMO University, 76 Vernadsky ave., 119454 Moscow, Russia*

The analysis of two phenomena: the Arctic ice cover melting during last decades and the North magnetic pole motion, which were performed using the NASA satellite images of the Earth surface and the IGRF model calculations, has shown that the warming which comes with the accelerated melting of the ice cover, takes place mainly in the Russian polar zone and the Beaufort Sea area, while the magnetic pole approaches them. At the same time the effect of the warming is not observed, or it is weak in the Canadian Arctic zone, from which the magnetic pole drifts apart. Besides that, a proportion of the multi-year ice near the Canadian coast is much higher than that of the Russian polar zone and Beaufort Sea area. The analysis has shown that together with the magnetic pole motion the zones, which correspond to dynamic rigidity cutoffs curves over the Earth surface of proton fluxes presented in the galactic cosmic rays, are also displaced.

According to the proposed hypothesis the displacement of the dynamic rigidity cutoffs zones curves contours for proton energies of $\sim 1\text{--}100$ МэВ can cause the main effect on the ice melting change during the last decades since about 1984 till present. With the average proton energy of 10 MeV the size of this zone is about $\sim 2500\text{--}3000$ km. Basing on the radiation transfer equation solution, a principal possibility was shown of the downward solar flux increase in the case of aerosol and thin clouds emerging over the dense tropospheric cloudiness, which exists during the greater part of time over the Arctic region. The values of this flux increase were also estimated.

According to our hypothesis the magnetic pole motion brings to the displacement of the some effective area of the given above size inside of which the probability of aerosol and thin clouds formation on the ion clusters cores in the upper troposphere and stratosphere in the altitude range of $\sim 4\text{--}50$ km is higher than outside of it. As the solar activity decrease and, correspondingly, the galactic cosmic radiation rise during the last decades caused the warming of the whole Arctic zone, the magnetic pole movement at the same period brought to the regional climatic changes in the Arctic.

The work is carried out by the support of the Russian Foundation for Basic Research (RFBR), No. 18-05-00812-a.

УФ радиация в прошлом, настоящем и будущем по данным моделирования, измерений и реанализа

Чубарова Н.Е.¹ (natalia.chubarova@gmail.com), Пастухова А.С.¹, Жданова Е.Ю.¹,
Полюхов А.А.¹, Вольперт Е.В.¹, Смышляев С.П.² (smyshl@rshu.ru),
Галин В.Я.³ (venergalin@yandex.ru), Володин Е.М.³

¹*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Ленинские горы 1, 119911 Москва, Россия*

²*Российский государственный гидрометеорологический университет, Малоохтинский пр. 98, 195196 Санкт-Петербург, Россия*

³*Институт вычислительной математики РАН, ул. Губкина 8, 119333 Москва, Россия*

Эритемная биологически активная УФ радиация (БАУФР) оказывает значительное воздействие на здоровье человека. Целью данной работы является анализ долгопериодных

вариаций БАУФР на основе численных экспериментов с использованием химико-климатической модели (ХКМ), разработанной в ИВМ РАН и РГГМУ (ХКМ ИВМ-РГГМУ) [1], а также результатов наземных и спутниковых измерений и данных реанализа ERA-INTERIM на территории Северной Евразии за период 1979–2015 гг. С использованием численных расчетов по ХКМ ИВМ-РГГМУ также проанализированы вариации общего содержания озона (ОСО) и БАУФР до 2059 г. Результаты модельных экспериментов, учитывающих изменения антропогенных выбросов галогенсодержащих веществ, свидетельствуют о нелинейном уменьшении БАУФР за счет восстановления озонового слоя в 21 веке. В 2016–2020 гг. ее значения на 2–5% выше относительно уровня 1979–1983 гг. в среднем по всей северной Евразии с максимумом порядка 6% в полярных широтах. В 2035–2039 гг. значения БАУФР становятся близкими к уровню 1979–1983 гг. и далее постепенно снижаются относительно значений за 1979–1983 гг. За период 2055–2059 гг. они становятся соответственно на 4–6% и 6–8% меньше в азиатской части России и в северной Европе. За счет этого наблюдается изменение границ различных категорий УФ ресурсов, определенных согласно методике, описанной в [2]. Наибольшие изменения в пространственном распределении УФ ресурсов будут наблюдаться весной и летом: эти изменения проявляются в расширении областей УФ недостаточности на севере и сокращении областей УФ избыточности на юге.

Проведены также численные эксперименты по оценке влияния реального аэрозольного распределения по данным [3] на пространственно-временные вариации БАУФР и общего содержания озона для периода с 1979 по 2015 год. Дополнительно проведены эксперименты с учетом новых данных по солнечной внеатмосферной радиации и температуре поверхности океана. Показана существенная чувствительность озона к разным данным по температуре поверхности океана (ТПО). Заметные положительные изменения УФ радиации за период 2000–2015 гг. относительно значений 1979–1999 гг. наблюдаются при учете реального тропосферного и стратосферного аэрозоля как по величине (1.5–2%), так и по площади. Выполнены сравнения результатов моделирования с данными реанализа и спутниковыми измерениями. Внесены изменения в облачно-аэрозольной блок климатической модели ИВМ версии 5 и проведены тестовые численные эксперименты с различными конфигурациями этого блока для выявления косвенного эффекта аэрозоля на облачность и радиацию.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ №18-05-00700.

1. Galin V.Y., Smyshlyaev S.P., Volodin E.M. Combined chemistry-climate model of the atmosphere // *Izv. Atmos. Ocean. Phys.* 2007. V. 43, No 4. P. 399–412.
2. Chubarova N., Zhdanova Ye. Ultraviolet resources over Northern Eurasia // *Photochemistry and Photobiology*. 2013. Vol. 127. P. 38–51.
3. Kinne S., O'Donnel D., Stier P., et al. MAC - v1: A new global aerosol climatology for climate studies // *J. Adv. Model. Earth Syst.* 2013. V. 5, No 4. P. 704–740.

UV radiation in the past, present and future according to modeling, measurements and reanalysis

N.E. Chubarova¹ (natalia.chubarova@gmail.com), A.S. Pastukhova¹, E.Yu. Zhdanova¹,
A.A. Polyukhov¹, E.V. Volpert¹, S.P. Smyshlyaev² (smyshl@rshu.ru),
V.Ya. Galin³ (venergalin@yandex.ru), E.M. Volodin³

¹M.V. Lomonosov Moscow State University, 1 Leninsky gory, 119911 Moscow, Russia

²Russian State Hydrometeorological University, 98 Malookhtinsky, 195196 Saint-Petersburg, Russia

³Institute of Numerical Mathematics RAS, 8 Gubkina str., 119333 Moscow, Russia

Erythemally-weighted biologically active UV radiation (BAUVR) has a significant impact on human health. The aim of this work is to analyze long-term variations of BAUVR on the basis of numerical experiments using the chemical-climate model developed at the INM RAS and RSHMU (INM-RSHMU CCM) [1], as well as the results of ground-based and satellite measurements, and ERA-INTERIM reanalysis over Northern Eurasia for the 1979–2015 period. In addition, using the INM-RSHMU CCM the ozone and BAUVR were also analysed for the period up to 2059. The

results of model experiments with account for the changes in anthropogenic emissions of halogen-containing substances show a nonlinear decrease in BAUVР due to the recovery of the ozone layer in the 21st century. In 2016–2020, its values are 2–5% higher relative to the level of 1979–1983 on average over the whole Northern Eurasia with a maximum of about 6% in polar latitudes. In 2035–2039, the values of BAUVР become close and then gradually decrease relative to the values for 1979–1983 period. For the 2055–2059 period they become 4–6% and 6–8% smaller respectively for the Asian part of Russia and for Northern Europe. Due to these changes, there is a pronounced change in the boundaries of different categories of UV resources defined according to the technique described in [2]. The largest changes in spatial distribution of UV resources are observed in spring and summer: these changes can be seen in the expansion of the areas of UV deficiency in the North and in the reduction of the areas of UV excess in the South.

Numerical experiments were also carried out for estimating the effect of real aerosol distribution according to [3] on the BAUVР and total ozone spatial and temporal distribution for the 1979–2015 period. In addition, experiments were made with taking into account for new data on solar extraterrestrial irradiance and ocean surface temperature. The significant sensitivity of ozone was obtained to various data on the surface temperature of the ocean. The pronounced positive changes in UV radiation for the period 2000–2015 relative to the values of 1979–1999 occurred both in magnitude (1.5–2%) and in area square when accounting real tropospheric and stratospheric aerosol. Comparisons of simulation results with reanalysis data and satellite measurements were performed. We also made the changes in the cloud-aerosol block of the climate INM model (version 5). Several numerical experiments were carried out with different configurations of this block to identify the indirect effect of aerosol on clouds and radiation.

The work was supported by RFBR grant number 18-05-00700.

1. Galin V.Y., Smyshlyaev S.P., Volodin E.M. Combined chemistry-climate model of the atmosphere // *Izv. Atmos. Ocean. Phys.* 2007. V. 43, No 4. P. 399–412.
2. Chubarova N., Zhdanova Ye. Ultraviolet resources over Northern Eurasia // *Photochemistry and Photobiology*. 2013. Vol. 127. P. 38–51.
3. Kinne S., O'Donnell D., Stier P., et al. MAC - v1: A new global aerosol climatology for climate studies // *J. Adv. Model. Earth Syst.* 2013. V. 5, No 4. P. 704–740.

Интерпретация слабого радиационного излучения при лидарном зондировании атмосферы

Потапова И.А. (potapovaira@yandex.ru), Егоров А.Д., Дьяченко Н.В., Саноцкая Н.А., Скобликова А.Л., Яковлева Т.Ю.

Российский государственный гидрометеорологический университет, Малоохтинский пр. 98, 195196, Санкт-Петербург, Россия

Проблема контроля и сохранения качества атмосферного воздуха является одной из основных задач, стоящей перед человечеством. Атмосферный воздух – жизненно важный компонент окружающей среды, благоприятное состояние которого составляет естественную основу устойчивого социально-экономического развития страны. Его качество непосредственно влияет на здоровье человека, продолжительность его жизни. Атмосферный воздух представляет собой аэрозоль, и рассеяние света его дисперсной фазой, т.е. взвешенными в воздухе инородными частицами (загрязнителями), играет в оптике атмосферы немаловажную роль. Мощность радиационного излучения, которая принимается из атмосферы, существенно зависит от концентрации загрязняющих его частиц. Таким образом, зная значение мощности радиационного излучения в определенной точке зондируемого слоя, можно определить концентрацию аэрозоля. Для решения данной задачи разрабатываются различные методы.

В работе рассматриваются вопросы достоверности [1], с которой могут быть определены параметры аэрозоля методами лидарного зондирования. Разрабатываются линеаризованные алгоритмы обработки сигналов лидарного зондирования слабо

замутненной атмосферы. В случае оптически однородной атмосферы с постоянными коэффициентами ослабления и обратного рассеяния лидарное уравнение не содержит интегральных величин. Задача состоит в определении неизвестных постоянных: фоновой засветки и коэффициента ослабления. С этой целью осуществляется линеаризация задачи с использованием предварительно вычисленных значений коэффициента ослабления. Для того, чтобы найти их величины с минимальными погрешностями, используется метод наименьших квадратов.

Представлены результаты определения коэффициента ослабления при осреднении по нескольким десяткам импульсов [2]. Для сравнения представлены результаты определения коэффициента ослабления при посылке одного импульса. В данном случае предложенный алгоритм не обеспечил достаточную точность. Для повышения точности предлагается использовать метод наименьших квадратов с использованием предварительно заданной фоновой засветки. Исследование выполнено для типичных параметров аэрозоля слабо замутненной атмосферы и для реалистических характеристик лидаров.

1. Yegorov A.D., Kopp I.Z., Perelman A.Y. Air aerosol pollution and lidar measurements // Proc. SPIE "Lidar and Atmospheric Sensing". 1995. V. 2505. P. 38–43.
2. Yegorov A.D., Potapova I.A., Rzhonsnitskaya Yu.B. et al. Atmospheric aerosols measurements and reliability problem: new results // Int. J. Rem. Sen. 2014. V. 35. P. 5750–5765.

Interpretation of weak radiation in lidar sounding of the atmosphere

I.A. Potapova (potapovaira@yandex.ru), A.D. Yegorov, N.V. Dyachenko, N.A. Sanotskaya,
A.L. Skoblikova, T.Yu. Yakovleva

*Российский государственный гидрометеорологический университет, Малоохтинский пр. 98, 195196
Санкт-Петербург, Россия*

The problem of control and preservation of air quality is one of the main challenges facing humanity. Atmospheric air is a vital component of the environment, the favorable state of which is the natural basis for sustainable social-economic development of the country. Its quality directly affects human health, life expectancy. Atmospheric air is an aerosol, and light scattering by its dispersed phase, i.e. suspended in the air foreign particles (pollutants), plays an important role in the optics of the atmosphere. The power of radiation, which is received from the atmosphere, depends significantly on the concentration of polluting particles. Thus, knowing the value of the radiation power at a certain point of the probed layer, it is possible to determine the aerosol concentration. To solve this problem, various methods are developed.

This paper considers the questions of the reliability [1], with which the aerosol parameters can be defined by the lidar probing methods. The linearized digital signal processing algorithms are developed for lidar probing of a weakly turbid atmosphere. The lidar equation does not contain the integral quantities in the case of optically homogeneous atmosphere with constant extinction and backscattering coefficients. The problem is to determine the unknown constants: the background light and the extinction coefficient. The linearization of the problem is carried out for this purpose using pre-calculated values of the extinction coefficient. Least squares method is used to find their values with the minimum errors.

The results of determination of extinction coefficient are presented at averaging of several dozens of pulses [2]. For comparison the results of determination of the extinction coefficient are presented for sending one pulse. In this case, the proposed algorithm does not provide enough accuracy. To improve accuracy it is proposed the method of least squares using predetermined background light. The study was performed for typical aerosol parameters in weakly turbid atmosphere and realistic characteristics of lidars.

1. Yegorov A.D., Kopp I.Z., Perelman A.Y. Air aerosol pollution and lidar measurements // Proc. SPIE "Lidar and Atmospheric Sensing". 1995. V. 2505. P. 38–43.
2. Yegorov A.D., Potapova I.A., Rzhonsnitskaya Yu.B. et al. Atmospheric aerosols measurements and reliability problem: new results // Int. J. Rem. Sen. 2014. V. 35. P. 5750–5765.

Воздействие геокосмических факторов на облачность

Авакян С.В.¹ (avak@soi.spb.ru), Баранова Л.А.²

¹Государственный оптический институт им. С.И. Вавилова, Биржевая линия 10, 199034 Санкт-Петербург, Россия

²Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Политехническая 26, 194021 Санкт-Петербург, Россия

До сих пор физика образования и эволюции облаков остаётся недостаточно исследованной областью знаний [1]; это относится и к причинам вариации прозрачности атмосферы в периоды гелиогеофизических возмущений. Нами предложен новый подход к геокосмическому контролю окружающей среды (атмосферы и биосферы) через введение супрамолекулярной физики водной среды – паров воды и водосодержащего конденсата в облачном покрове [2, 3], а также биорастворов в живом организме, включая человека [4]. Привлечены процессы, известные в физике молекулярных столкновений, с участием высоковозбуждённых состояний, возникающих при ассоциатообразовании молекул воды благодаря их высокому сродству к протону, а также при столкновительной диссоциативной рекомбинации водосодержащих кластерных ионов. Использована возможность управления такими процессами через повышение величины орбитального момента ридберговского электрона в поле внешней радиоволны микроволнового диапазона [2–4].

Выполнен анализ опубликованных результатов регистрации потоков микроволнового излучения из земной ионосферы, возмущённой в периоды вспышек на Солнце и геомагнитных бурь, определены уровни таких потоков и диапазоны их естественных вариаций в циклах солнечной активности. В экспериментах ряда авторов подтверждено, что:

- ионосферное микроволновое излучение усиливается во время солнечных вспышек и магнитных бурь;
- ридберговский механизм возбуждения микроволнового излучения в ионосфере, предложенный нами, доказан нагревными воздействиями на ионосферу на стенде "Сура";
- регулирование солнечными вспышками содержания паров воды в столбе атмосферы, на высотах более 2-х км, с переводом их в кластеры, зарегистрировано;
- влияние солнечных вспышек и магнитных бурь на общую и перистую облачность четко фиксируется;
- уменьшение величины содержания паров воды, с переводом их в кластерное состояние, как после солнечной вспышки (на ~ 5%), так и при работе нагревного стенда "Сура" (на 0.05 г/см² (~ 2.5%)), при пороге чувствительности аппаратуры в 0.006 г/см² зарегистрированы в экспериментах в Германии и России.

Получено, что поразительное несоответствие обнаруженного в эксперименте ISCCP уменьшения глобальной облачности при одновременном повышении температуры поверхности океана (что сопровождается увеличением испарения с водной поверхности), существующим представлениям о механизмах образования облаков [1] можно объяснить космофизическим воздействием в максимуме векового цикла активности Солнца. К этому же эффекту относится и наличие в течение нескольких десятилетий полной антикорреляции в трендах распространённости указанной глобальной облачности и такой величины, как содержание паров воды в вертикальном столбе при параллельном мониторинге на высоте 1600 м (в Киргизии) и 500 м (в Техасе).

1. Покровский О.М. Изменения облачности в период глобального потепления по результатам междунауч. спутникового проекта // Исследование Земли из космоса. 2019. № 1. С. 3–13.
2. Авакян С.В., Галечян Г.А. К вопросу о супрамолекулярной физике нижней атмосферы // Тезисы Межд. Симпоз. "Атмосф. радиация и динамика" (МСАРД-2015). 2015. СПбГУ. С. 28–29.
3. Авакян С.В. Супрамолекулярная физика окружающей среды: климатические и биофизические эффекты // Вестник РАН, 2017, 87, №5, 458–466.
4. Авакян С.В., Баранова Л.А. Влияние электромагнитного излучения окружающей среды на ассоциатообразование в водных растворах // Биофизика. 2019. Т. 64, № 1. С. 12–20.

Impact of geocosmic factors on cloudness

S.V. Avakyan¹ (avak@soi.spb.ru), L.A. Baranova² (l.baranova@mail.ioffe.ru)

¹S.I. Vavilov State Optical Institute, 10 Birzhevaya line, 199034 Saint-Petersburg, Russia

²Ioffe Institute of RAS, 26 Politekhnikeskaya str., 194021 Saint-Petersburg, Russia

Until now, the physics of the formation and evolution of clouds remains an insufficiently studied area of knowledge [1]; this also applies to the causes of variations in atmospheric transparency during periods of heliogeophysical disturbances. We have proposed a new approach to the geocosmic control of the environment (atmosphere and biosphere) through the introduction of supramolecular physics of the aquatic media – water vapor and water-containing condensate in the cloud cover [2, 3], as well as biological solutions in a living organism, including humans [4]. The processes known in the physics of molecular collisions are involved, including highly excited states arising from the association of water molecules due to their high affinity for the proton, as well as collisional dissociative recombination of water-containing cluster ions. The possibility of controlling such processes through increasing the orbital moment of the Rydberg electron in the field of an external microwave radio wave [2–4] is considered.

The analysis of the published results of the registration of microwave fluxes from the Earth's ionosphere perturbed during periods of solar flares and geomagnetic storms is performed. The levels of such fluxes and the ranges of their natural variations in solar activity cycles are determined. Several authors have confirmed experimentally that:

- the ionospheric microwave radiation is amplified during solar flares and magnetic storms;
- Rydberg mechanism of excitation of microwave radiation in the ionosphere (which was first proposed in our papers) is proved by heating impact on the Earth's ionosphere at the “Sura” stand;
- the regulation by solar flares of the content of water vapor in the atmospheric column, at altitudes of more than 2 km, with their transfer to clusters, has been registered;
- the effect of solar flares and magnetic storms on the total and cirrus clouds is clearly recorded;
- a decrease in the amount of water vapor content, with their transfer to a cluster state, both after a solar flare (by $\sim 5\%$) and during the operation of the “Sura” heating stand (by $0.05 \text{ g/cm}^2 = \sim 2.5\%$), with the threshold of sensitivity of the apparatus of 0.006 g/cm^2 was recorded in experiments in Germany and Russia.

It has been found that the striking inconsistency of the global cloudiness decrease observed in the ISCCP experiment while simultaneously increasing the ocean surface temperature (accompanied by increased evaporation from the water surface) and existing ideas about the mechanisms of cloud formation [1] can be explained by cosmophysical effects at the maximum of the secular solar activity cycle. The same paradox consists in the complete anti-correlation for several decades in the trends of the prevalence of the global cloudiness and of such magnitude as the content of water vapor in the vertical column during parallel monitoring at an altitude of 1600 m (in Kyrgyzstan) and 500 m (in Texas).

1. Pokrovsky O.M. Cloudness changes in the period of global warming: the results of International satellite project // *Issledovanie Zemli iz Kosmosa*. 2019. № 1. P. 3–13 (in Russian).
2. Avakyan S.V., Galechian G.A. About supramolecular physics of the low atmosphere // In: *Theses of Int. Symp. “Atmospheric Radiation and Dynamics”* // SPbSU, June 23-26, St. Petersburg. 2015. P. 28–29.
3. Avakyan S.V. Environmental supramolecular physics: climatic and biophysical effects. *Herald Russ. Acad. Sci.* 2017. V. 87, No 3. P. 276–283.
4. Avakyan S.V., and Baranova L. A., The influence of environmental electromagnetic radiation on associate formation in aqueous solutions // *Biofizika*. 2019. V. 64, No 1. P. 7–13.

«Лунная программа» и спектральное альbedo Земли как индикатор глобального изменения климата Земли

Сушкевич Т.А. (tamaras@keldysh.ru), Стрелков С.А., Максакова С.В.

Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, Миусская пл. 4, 125047 Москва, Россия

В 20-м веке вскоре после запуска ПЕРВОГО искусственного спутника Земли по инициативе С.П. Королева и М.В. Келдыша были осуществлены ПЕРВЫЕ полеты к Луне. В 21-м веке уже несколько стран стремятся покорить Луну. Работа посвящается 60-летию ПЕРВЫХ полетов советских автоматических межпланетных станций (АМС) к Луне [1] и памяти Арнольда Сергеевича Селиванова (1935–2019), под руководством и непосредственном участии которого были обеспечены приоритетные достижения отечественной науки и техники: съемка обратной стороны Луны и получение первых снимков поверхности Луны, цветная съемка поверхности Марса с орбиты его искусственного спутника, получение первых черно-белых и цветных снимков поверхности Венеры, а также проведение тепловой съемки поверхности Марса.

ВПЕРВЫЕ в истории 02.01.1959 АМС «Луна-1» осуществила полет к Луне. Впервые были получены сведения о радиационном поясе Земли и космическом пространстве. 12.09.1959 состоялся запуск АМС «Луна-2», которая 14.09.1959 ВПЕРВЫЕ достигла поверхности Луны. На борту АМС «Луна-2» были размещены три символических вымпела с изображением герба СССР и надписью «СССР сентябрь 1959». 04.10.1959 стартовала АМС «Луна-3», которая совершила облет и впервые сфотографировала обратную сторону Луны. В рамках «Лунной программы» было запущено 24 КА [1]. Баллистические расчеты и навигационные средства всех отечественных «лунных» КА обеспечили в Институте Келдыша, которому принадлежит ведущая роль в «Лунной программе». На Луну были доставлены два «лунохода» (1970, 1973); три ракеты стартовали с Луны и доставили лунный грунт на Землю (1970, 1972, 1976); с 1966 по 1974 гг. запущены семь искусственных спутников Луны; АМС «Зонд 5»–«Зонд 8» (1968–1970 гг.) облетели Луну и доставили уникальные многочисленные данные фото- и кино-съемок Земли и Луны. В Мемориальном музее-кабинете академика М.В. Келдыша хранятся макеты «глобуса Луны» и «лунохода». Для исследований приложения теории переноса излучения с гиперспектральным подходом в перспективных космических проектах дистанционного зондирования глобальной климатической системы Земли (КСЗ) можно найти аналогии с подходами изучения планет солнечной системы и Галактик и с учетом опыта реализации «Лунной программы», в которой принимала участие Т.А. Сушкевич [2].

Великие советские ученые многогранно изучали альbedo нашей планеты. Весомый вклад внесли академик В.Г. Фесенков [3] и Н.П. Барабашов [4]. Предлагается идея нового подхода к изучению эволюции климата Земли как планеты на основе компьютерного моделирования спектрального альbedo Земли в сферической геометрии с использованием «сценариев» состояния КСЗ в контролируемых условиях с разделением вкладов, обусловленных изменчивостью атмосферы и подстилающих поверхностей, что позволяет отслеживать влияние разных факторов КСЗ. Можно смоделировать и «пепельный свет» Луны, который всё более интересует исследователей в связи с неоднозначной оценкой «потепления» или «похолодания» на Земле. Ученые озабочены проблемой эволюции Земли как планеты. Разработан инструментарий для теоретико-расчетных исследований этой эволюции с помощью «сценарного» подхода и оценки спектрального и глобального альbedo Земли как планеты, которое чувствительно к изменениям и в атмосфере, и в океане, и на суше. Для оценки такого альbedo требуются сферические модели, представленные в монографии [5]. Исследование альbedo Земли может стать частью новой «Лунной программы».

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проектов 18-01-00609, 17-01-00220).

1. Прикладная небесная механика и управление движением. Сборник статей, посвященный 90-летию со дня рождения Д.Е.Охоцимского // Труды ИПМ им. М.В. Келдыша РАН. М.: ИПМ им. М.В. Келдыша, 2010. 368 с.
2. Сушкевич Т.А., Стрелков С.А., Максакова С.В. Альbedo планеты как индикатор эволюции климата Земли (65-летию ИПМ имени М.В.Келдыша и достижениям «Лунной программы» посвящается) // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. 2018. № 88. 28 с.
3. Fessenkoff V. Détermination de l'albedo de la Terre // Сообщения Харьковского математического общества. Вторая серия. 1915. Т. 14, выпуск 5. С. 229–238. (Фесенков В.Г. Определе́ние альбе́до земли) <http://mi.mathnet.ru/rus/khmo/v14/i5/p229>.
4. Барабашов Н.П. Определение альbedo земного шара // Русский Астрономический журнал. 1924. Т. 1. Вып. 3–4. С. 58–67.
5. Сушкевич Т.А. Математические модели переноса излучения. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний. 2005. 661 с.

The Moon Program and the Earth spectral albedo as an indicator of global climate change on Earth

T.A. Sushkevich (tamaras@keldysh.ru), S.A. Strelkov, S.V. Maksakova
M.V. Keldysh Institute of Applied Mathematics RAS, 4 Miusskaya sq., 125047 Moscow, Russia

In the 20th century, shortly after the launch of the FIRST artificial Earth sputnik, on the initiative of S.P. Korolev and M.V. Keldysh, the FIRST flights to the Moon were made. In the 21st century, several countries are already seeking to conquer the Moon. The work is dedicated to the 60th anniversary of the FIRST flights of the Soviet automatic interplanetary stations (AIS) to the Moon [1] and to the memory of Arnold Sergeyevich Selivanov (1935–2019), under the guidance and direct participation of which priority achievements of domestic science and technology were ensured: shooting backward side of the Moon and taking the first images of the surface of the Moon, color photography of the surface of Mars from the orbit of its artificial satellite, taking the first black and white and color images of the surface of Venus, as well as conducting thermal imaging of the Mars surface.

FOR THE FIRST TIME in the history 02.01.1959 AIS “Luna-1” flew to the Moon. For the first time, information was obtained about the Earth radiation belt and outer space. 12.09.1959 the launch AIS “Luna-2” took place, which 14.09.1959 FIRST reached the Moon surface. Three symbolic pennants with the image of the coat of arms of the USSR and the inscription “USSR September 1959” were placed on board the AIS “Luna-2”. AIS “Luna-3” launched 04.10.1959, circled and, for the first time, photographed the reverse side of Moon. In the framework of the “Moon Program” 24 spacecraft were launched [1]. Ballistic calculations and navigational aids of all domestic “lunar” spacecraft were provided at the Keldysh Institute, which plays the leading role in the “Moon Program”. Two “Lunokhods” were delivered to the Moon (1970, 1973); three rockets launched from the Moon and delivered lunar soil to Earth (1970, 1972, 1976); from 1966 to 1974 seven artificial Moon satellites were launched; AIS “Zond-5”–“Zond-8” (1968– 1970) circled the Moon and delivered a unique, numerous data of photo and film shooting of the Earth and the Moon. In the Memorial Museum-office of Academician M.V.Keldysh there are models of the “Globe of the Moon” and “Lunokhod”. For studies of the application of radiation transfer theory with a hyperspectral approach in promising space projects of remote sensing of the global climate system of the Earth (CSE), analogies can be found with approaches to study the planets of the solar system and Galaxies, and the experience of implementing the “Lunar Program”, in which T.A.Sushkevich took part [2].

The great Soviet scientists studied the albedo of our planet in many ways. A significant contribution was made by academician V.G.Fesenkoff [3] and N.P.Barabashov [4]. A new approach is proposed to study the evolution of Earth climate as a planet based on computer simulations of the Earth’s spectral albedo in spherical geometry using “scenarios” of the CSE state under controlled conditions with separation of contributions due to atmospheric and underlying surfaces variability, which allows tracking the influence of various CSE factors. It is possible to simulate the “ashen light” of Moon, which is more and more interesting for researchers in

connection with the ambiguous assessment of “warming” or “cooling” on Earth. Scientists are concerned with the problem of the evolution of the Earth as a planet. A tools has been developed for theoretical and computational studies of this evolution using the “scenario” approach and the assessment of the spectral and global albedo of the Earth as a planet that is sensitive to changes in the atmosphere, in the ocean and on land. To estimate such an albedo, spherical models are required, which are presented in the monograph [5]. The study of the Earth albedo may become part of the new “Lunar Program”.

The reported study was funded partially by RFBR according to the research projects 18-01-00609, 17-01-00220.

1. Applied celestial mechanics and motion control. Collection of articles dedicated to the 90th anniversary of the birth of D.Ye.Ohotsynsky // Proc. of KIAM RAS. M.: Keldysh Institute of Applied Mathematics. 2010. 368 p.
2. Sushkevich T.A., Strelkov S.A., Maksakova S.V. Albedo of the planet as an indicator of the evolution of the Earth's climate (Dedicated to the 65th anniversary of the Keldysh Institute of Applied Mathematics and the achievements of the “Lunar Program”) // Preprint KIAM RAS. 2018. No 88. 28 p.
3. Fessenkoff B. Détermination de l'albedo de la Terre // Communications of the Kharkov Mathematical Society. The second series. 1915. V. 1, Issue 5. P. 229–238.
4. Barabashov N.P. Determination of the albedo of the globe // Rus. Astron. J. 1924. V. 1, Issue 3–4. P. 58–67.
5. Sushkevich T.A. Mathematical models of radiation transfer. M.: BINOM. Laboratory of Knowledge. 2005. 661 p.

50 лет измерений суммарной УФ радиации в области спектра 300–380 нм в метеорологической обсерватории МГУ

Незваль Е.И. (einezval@mail.ru)

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, географ. факультет, Ленинские горы 1, 119991, Москва, Россия

Метеорологическая обсерватория МГУ (МО МГУ) является единственной станцией в России, которая располагает 50-летним рядом (1968–2017 гг.) непрерывных наблюдений суммарной УФ радиации в области спектра с длинами волн 300–380 нм (Q380), проводившихся различными типами широкополосных УФ приборов, отградуированных по Европейским Стандартам. В настоящей работе подводятся итоги 50-летних измерений Q380.

В среднем за 50 лет годовая сумма составляет 145 МДж/м^2 , изменяясь от 132 (1980 г.) до 159 МДж/м^2 (1999 г.). Коэффициент вариации 5%. В 50% случаев годовые суммы лежат в пределах $140\text{--}150 \text{ МДж/м}^2$. В среднем за 50 лет максимум в годовом ходе месячных сумм ($\approx 25 \text{ МДж/м}^2$) приходится на июнь. Однако за 50 лет максимум отмечался в июне лишь 24 раза, смещаясь в 17 случаях на июль, а в 9 случаях на май. Минимум в годовом ходе месячных сумм Q380 приходится всегда на декабрь (в среднем 1.5 МДж/м^2). Приход суммарной УФ радиации за лето составляет почти половину годовой суммы, а за весну и лето – 80%.

Наибольшие положительные аномалии ($> 5\%$) годовых сумм Q380 по отношению к средней величине за 50 лет отмечались в 1968 г., в 1994–1996 гг., 1998–2000 гг., в 2011 г. и 2014 г. Максимальная аномалия, составившая 10%, имела место в 1999 г. Наибольшие отрицательные аномалии ($> -5\%$) годовых сумм Q380 были отмечены в 1976–1978 гг., в 1980, 1984, 1990 и 2008 гг. Отрицательные аномалии $\approx -9\%$ наблюдались в 1978 и 1980 гг. Были рассмотрены также многолетние изменения для теплого (май–сентябрь) и холодного (ноябрь–март) периодов. Для теплого периода ход многолетних изменений сумм Q380 хорошо согласуется с изменениями годовых сумм (коэффициент корреляции $r = 0.92$), так как вклад УФ радиации за этот период в годовую сумму превышает 70%. Сумма Q380 за холодный период составляет всего 15% от годовой величины. Многолетние изменения сумм Q380 для холодного периода выражены значительно сильнее. Максимальные аномалии сумм Q380, отмечались в 1996 г. (+25%) и в 1999 г. (+22%). Наибольшая отрицательная аномалия (– 21%) имела место в 1977 г.

Наиболее высокие значения Q380 по сравнению со средней величиной за 50 лет для года в целом и для теплого периода отмечались в четвертом и пятом десятилетиях (1998–2007 гг. и 2008–2017 гг.): годовые суммы Q380 были больше на 2.1 и 2.6%, суммы для теплого периода – на 2.0 и 3.0% соответственно для этих двух десятилетий. Существенное снижение прихода Q380 наблюдалось во втором десятилетии (1978–1987 гг.): на 4.6% для года и на 5% для теплого периода. Основными факторами являются балл нижней облачности за светлое время суток ($N_{\text{ниж св}}$) и продолжительность солнечного сияния (ПСС). Между суммами Q380 в целом за год и за теплый период и $N_{\text{ниж св}}$ коэффициенты корреляции составили соответственно: – 0.50 и – 0.73, а между суммами Q380 и ПСС – 0.75 и 0.80.

Работа выполнялась при частичной поддержке гранта РФФИ №18-05-00700.

50 years of measurements of global UV radiation within spectral region 300–380 nm at Meteorological observatory of MSU

Ye.I Nezval' (einezval@mail.ru)

M.V. Lomonosov Moscow State University, Geography Faculty, 1 Leninsky Gory, 119991 Moscow, Russia

Meteorological Observatory of Moscow State University (MO MSU) is the only one station in Russia, which has 50-year continuous observations (1968–2017) of global UV radiation within spectral region 300–380 nm (Q380). These observations were accomplished by different types of broadband UV instruments calibrated according to European standards. This paper summarizes the results of 50-year measurements of Q380.

On average, for 50 years, annual amount of Q380 is 145 MJ/m², varying from 159 (in 1999) to 132 MJ/m² (in 1980). Coefficient of variation of annual amounts of Q380 is 5%. Annual amounts of Q380 are in range of 140–150 MJ/m² in 50% of cases. On average, for 50 years, the maximum monthly amount of Q380 (≈ 25 MJ/m²) is observed in June. However, the maximum monthly amount of Q380 was observed in June only 24 times, in July – 17 times, and in May – 9 times. The minimum monthly amount of Q380 is observed always in December (on average 1.5 MJ/m²). Summer amount of Q380 is almost half of the annual amount of Q380, and spring and summer amount of Q380 is 80% of annual amount of Q380.

High positive anomalies from average ($> 5\%$) of annual amounts of Q380 were observed in 1968, in 1994–1996, 1998–2000, in 2011 and 2014. Maximum anomaly of annual Q380 amount exceeded 10% took place in 1999. High negative anomalies ($> -5\%$) of annual amounts of Q380 were recorded in 1976–1978, 1980, 1984, 1990 and 2008. Negative anomalies of annual amounts of Q380 approximately -9% were observed in 1978 and 1980. Long-term changes of Q380 for warm (May–September) and cold (November–March) periods were also considered. Long-term changes of amounts of Q380 in warm period is in good agreement with changes of annual amounts of Q380 (correlation coefficient is $r = 0.92$) because of contribution of Q380 in warm period to annual amounts of Q380 exceeds 70%. Amount of Q380 for cold period of year is only 15% of annual amounts of Q380. Variability of Q380 amounts in cold period of year is greater than in warm period. Maximum anomalies of Q380 amounts in cold period of year were observed in 1996 ($+25\%$) and in 1999 ($+22\%$), the maximum negative anomaly of Q380 amounts (-21%) occurred in 1977.

The highest Q380 amounts for year and warm seasons were observed in the fourth and fifth measurement decades (1998–2007 and 2008–2017): yearly Q380 amounts were more than average by 2.1 and 2.6% and warm period Q380 amounts were more than the average by 2.0 and 3.0%, respectively, in these two decades. A significant decrease of Q380 amounts (by 4.6% for yearly Q380 amounts and by 5% for warm period Q380 amounts) was observed in the second decade (1978–1987). The main factors affecting Q380 are the low level cloud amount and sunshine duration. Correlation coefficients between yearly and warm period Q380 amounts and low level cloud amount are – 0.50 and – 0.73, between yearly and warm period Q380 amounts and sunshine duration are 0.75 and 0.80, respectively.

This work was partially supported by RFBR grant №18-05-00700.

Модель реконструкции коротковолновой солнечной радиации на основе данных наземных и спутниковых измерений

Вольперт Е.В. (elena.volpert@yandex.ru), Чубарова Н.Е. (natalia.chubarova@gmail.com)
*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, географ. факультет, Ленинские горы
1, 119991, Москва, Россия*

Для оценки многолетней изменчивости коротковолновой солнечной радиации менее 4 мкм (КР) и вклада различных факторов в ее вариации была разработана модель реконструкции коротковолновой радиации на основе принципа, изложенного в [1]. Модель реконструкции солнечной радиации оценивает относительное изменение приходящей КР как сумму относительных колебаний солнечной радиации во всем коротковолновом спектре за счет аэрозоля и облачности, характеризующейся эффективным баллом облаков и их оптической толщиной.

Результат восстановления коротковолновой солнечной радиации за счет различных факторов был протестирован на основе данных многолетних измерений КР, проводимых в Метеорологической Обсерватории МГУ (МО МГУ) с 1968 года. Сравнение данных, полученных по модели реконструкции, и данных радиационных наблюдений показало их хорошую согласованность с R^2 равным 0.9. Помимо этого был проведен анализ трендов за счет аэрозольной оптической толщины, эффективного балла облаков и их оптической толщины и оценен их вклад в изменчивость солнечной радиации во всем коротковолновом спектре.

На основе полученных результатов по МО МГУ было выполнено восстановление изменчивости КР для всей Северной Евразии на основе архивов срочных наблюдений, предоставляемых NOAA NCEI (National Centers for Environmental Information) <https://www.ncdc.noaa.gov/isd>, и спутниковых измерений аэрозольной оптической толщины на длине волны 550 нм MODIS (collection 6.1) <http://disc.sci.gsfc.nasa.gov/giovanni/> с 1° разрешением. С помощью модели реконструкции солнечной радиации во всем коротковолновом спектре были получены региональные особенности трендов КР за счет различных факторов для территории Северной Евразии.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 18-05-00700.

1. Chubarova N.Y. UV variability in Moscow according to long-term UV measurements and reconstruction model // *Atm. Chem. Physics*. 2008. V. 8, No. 12. P. 3025–3031.

Model reconstruction of solar shortwave irradiance based on ground-based and satellite measurements

E.V. Volpert (elena.volpert@yandex.ru), N.E. Chubarova (natalia.chubarova@gmail.com)
M.V. Lomonosov Moscow State University, Geography Faculty, 1 Leninsky Gory, 119991 Moscow, Russia

To assess the long-term variability of solar shortwave irradiance less 4 μm (SR) and to analyze the contribution of various factors in SR variations the shortwave radiation reconstruction model based on [1] has been used. The model reconstruction is based on the assumption that the year-to-year SR variability can be written as a sum of SR variations due to aerosol, effective cloud amount and cloud optical thickness.

The retrievals of solar shortwave irradiance from different sources were tested against long-term measurements of Moscow State University Meteorological Observatory (MO MSU) since 1968. The reconstruction long-term changes in SR show a good agreement with the measurement values during 1968–2016 with R^2 equal 0.9. Additionally, the solar irradiance trends due to cloud amount, cloud optical thickness and aerosol optical thickness were considered, and the rate of their influence on SR variations was analyzed.

Based on the results of the SR retrieval in MO MSU shortwave irradiance variability was reconstructed for Northern Eurasia according to ground-based integrated surface solarly database provided by NOAA NCEI (National Centers for Environmental Information, <https://www.ncdc.noaa.gov/isd>) and satellite measurements of aerosol optical thickness at 550 nm from MODIS (collection 6.1) with 1° spatial resolution (<http://disc.sci.gsfc.nasa.gov/giovanni/>). The regional characteristics of SR trends due to different sources for Northern Eurasia were obtained using the SR model reconstruction

The work was supported by RFBR grant number 18-05-00700.

1. Chubarova N.Y. UV variability in Moscow according to long-term UV measurements and reconstruction model // *Atm. Chem. Physics*. 2008. V. 8, No. 12. P. 3025–3031.

Вариации оптических и микрофизических характеристик аэрозоля в сибирской дымной мгле летом 2016 г. по данным AERONET

Даценко О.И.^{1,2} (datoleg@yandex.ru), Горчаков Г.И.¹, Семутникова Е.Г.³, Карпов А.В.¹,
Гущин Р.А.^{1,2}

¹Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Пыжевский пер. 3, 119017 Москва, Россия

²МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, Россия.

³Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, физ. факультет, Ленинские горы 1,
119992 Москва, Россия

Вариации оптических и микрофизических характеристик аэрозоля в дымной мгле на территории Сибири летом 2016 г. проанализированы по данным мониторинга на станции AERONET (Томск, Иркутск и Екатеринбург). Результаты статистического анализа аэрозольной оптической толщины (АОТ) свидетельствуют о высоком уровне задымления атмосферы (АОТ на длине волны 440 нм достигала 4.0). Спектры ослабления в сибирской дымной мгле оказались типичными для наблюдавшихся ранее эпизодов крупномасштабной дымной мглы при пожарах в бореальных лесах [1, 2]. Альбеда однократного рассеяния (АОР) на длине волны 440 нм в сибирской дымной мгле (АОТ > 0.4) превышало 0.9, достигая 0.99 («белый дым»). Среднее значение АОР по данным AERONET (уровень L 1.5) в рассматриваемой дымной мгле оказалось равным примерно 0.97. Проанализирована изменчивость спектров поглощения дымового аэрозоля.

Определяющий вклад в микроструктуру дымового аэрозоля в сибирской дымной мгле летом 2016 г. вносила тонкодисперсная фракция с узким распределением частиц по размерам, что согласуется с результатами исследований крупномасштабных задымлений европейской части России (ЕЧР) в 2002 и 2010 гг. [1, 2]. В июле 2016 г. сибирская дымная мгла распространялась на ЕЧР, Белоруссию и другие страны Европы, включая Финляндию, Польшу, Германию, Румынию и Болгарию. При распространении сибирской дымной мглы из Азии в Европу АОР дымового аэрозоля не уменьшалось. Сохранилось также доминирование тонкодисперсной фракции дымового аэрозоля с узким распределением частиц по размерам [3]. Выполнен статистический анализ вариаций оптических и микрофизических характеристик аэрозоля в сибирской дымной мгле.

1. Горчаков Г.И., Свириденков М.А., Семутникова Е.Г. и др. Оптические и микрофизические характеристики аэрозоля задымленной атмосферы Московского региона в 2010 году // Доклады АН. 2011. Т. 437, № 5. С. 686–690.
2. Gorchakov G.I., Sitnov S.A., Sviridenkov M.A. et al. Satellite and ground-based monitoring of smoke in the atmosphere during the summer wildfires in European Russia in 2010 and Siberia in 2012 // Int. J. Remote Sens. 2014. V. 35, No 15. P. 5698–5721.
3. Gorchakov G.I., Sitnov S.A., Karpov A.V. et al. Siberian smoke haze over Europe in July 2016 // Proc. SPIE. 2018. V. 10833. 108330O.

Siberian smoke haze in summer 2016: variations of optical and microphysical aerosol characteristics

O.I. Datsenko^{1,2} (datoleg@yandex.ru), G.I. Gorchakov¹, E.G. Semoutnikova³, A.V. Karpov¹,
R.A. Gushin^{1,2}

¹A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics RAS, 3 Pyzhevsky per., 119017 Moscow, Russia

²MIREA – Russian University of Technology, Moscow, Russia

³M.V. Lomonosov Moscow State University, Physics Faculty, 1 Leninsky gory, 119992 Moscow, Russia

Variations of optical and microphysical aerosol characteristics in Siberia smoke haze in Summer 2016 were analyzed using monitoring data at AERONET station Tomsk, Irkutsk and Ekaterinburg. Analysis of aerosol optical depth (AOD) variations revealed the high smoke content in the atmosphere. AOD at wavelength 440 nm reached 4.0. Extinction spectra were typical for the large-scale smoke hazes during mass forest fires [1, 2]. In smoke haze (AOD > 0.4) the single scattering albedo (SSA) at wavelength 440 nm exceeded 0.9 reaching 0.99 (“white smoke”). SSA

average values (AERONET data, L 1.5) in Siberian smoke haze was equal to 0.97 approximately. Absorption spectrum variability in smoke haze was studied.

Determinative contribution in the smoke aerosol microstructure in summer 2016 over Siberia brought the fine mode with narrow smoke particle size distribution that was observed earlier during large-scale smoke haze over European part of Russia in 2002 and 2010 [1, 2]. In July 2016 Siberian smoke haze propagated at EPR, Belarus and other European countries [3] including Finland, Poland, Germany, Romania and Bulgaria. It is interesting that smoke haze essential peculiarities (large values SSA, domination of the aerosol fine mode with narrow size distribution) were kept [3]. Statistical analysis of the optical and microphysical characteristics of the smoke aerosol in Siberian smoke haze was carried out.

1. Gorchakov G.I., Sviridenkov M.A., Semoutnikova E.G. et al. Optical and Microphysical Parameters of the Aerosol in the Smoky Atmosphere of the Moscow Region in 2010 // *Doklady Earth Sciences*. 2011. V. 437, No 2. P. 513–517.
2. Gorchakov G.I., Sitnov S.A., Sviridenkov M.A. et al. Satellite and ground-based monitoring of smoke in the atmosphere during the summer wildfires in European Russia in 2010 and Siberia in 2012 // *Int. J. Remote Sens.* 2014. V. 35, No 15. P. 5698–5721.
3. Gorchakov G.I., Sitnov S.A., Karpov A.V. et al. Siberian smoke haze over Europe in July 2016 // *Proc. SPIE*. 2018. V. 10833. 108330O.

Радиационные эффекты дымной мглы и смогов Евразии

Семутникова Е.Г.¹ (egsemutnikova@mail.ru), Горчаков Г.И.², Карпов А.В.²,
Гущин Р.А.^{2,3}, Даценко О.И.^{2,3}

¹Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, физ. факультет, Ленинские горы 1,
119992 Москва, Россия

²Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Пыжевский пер. 3, 119017 Москва, Россия

³МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, Россия.

Крупномасштабные дымки заметно влияют на радиационный режим атмосферы в Евразии [1]. Максимальные возмущения радиационного режима наблюдались в июле 2016 г. при распространении сибирской дымной мглы [2]. Были рассмотрены радиационные форсинги дымового аэрозоля на верхней и нижней границах атмосферы на европейской территории России (ЕТР) и на территории Сибири. Выполнено сопоставление с задымлениями ЕТР в 2002 и 2012 гг. [3, 4] и с задымлением Сибири в 2012 г. [1]. Выполнен статистический анализ вариаций аэрозольных форсингов в сибирской дымной мгле 2016 г.

На Северной Китайской Равнине (СКР) и прилегающих территориях часто возникают крупномасштабные смоги. Проанализированы вариации аэрозольной оптической толщины (АОТ) и аэрозольных радиационных форсингов на СКР в 2003, 2007 и 2016 гг. Сопоставлены эффективности радиационных аэрозольных форсингов в дымной мгле и в смогах на СКР. Показано, что различие аэрозольных радиационных форсингов в смогах и дымной мгле объясняется, главным образом, большим поглощением в смогах по сравнению с дымной мглой. В частности, при фиксированных значениях АОТ альбеда системы земля–атмосфера в случае дымной мглы больше, чем альбеда при смогах.

1. Gorchakov G.I., Sitnov S.A., Sviridenkov M.A. et al. Satellite and ground-based monitoring of smoke in the atmosphere during the summer wildfires in European Russia in 2010 and Siberia in 2012 // *Int. J. Remote Sens.* 2014. V. 35, No 15. P. 5698–5721.
2. Горчаков Г.И., Голицын Г.С., Ситнов С.А. и др. Крупномасштабные дымки Евразии в июле 2016 г // *Доклады АН*. 2018. Т 482, № 2. С. 211–214.
3. Семутникова Е.Г., Горчаков Г.И., Ситнов С.А. и др. Сибирская дымная мгла над европейской территорией России в июле 2016 г. Загрязнение атмосферы и радиационные эффекты // *Оптика атмосферы и океана*. 2017. Т. 30, №11. С. 962–970.
4. Горчаков Г.И., Ситнов С.А., Семутникова Е.Г. и др. Крупномасштабное задымление европейской территории России и Белоруссии в июле 2016 г. // *Иссл. Земли из космоса*. 2018. № 1. С. 27–42.

Smoke haze and smog Eurasia radiative impact

E.G. Semoutnikova¹ (egsemutnikova@mail.ru), G.I. Gorchakov², A.V. Karpov²,
R.A. Gushin^{2,3}, O.I. Datsenko^{2,3}

¹*M.V. Lomonosov Moscow State University, Physics Faculty, 1 Leninsky gory, 119992 Moscow, Russia*

²*A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics RAS, 3 Pyzhevsky per., 119017 Moscow, Russia*

³*MIREA – Russian University of Technology, Moscow, Russia*

Large-scale hazes influence markedly on the radiative regime of the atmosphere over Eurasia [1]. Maximum disturbance of the radiative regime was observed in July 2016 during Siberian smoke haze propagation. Smoke aerosol radiative forcing at the top and the bottom of the atmosphere over European part of Russia (EPR) and Siberia were calculated [2]. A comparisons of the smoke haze 2016 with smoke hazes over EPR in 2002 and 2012 [3, 4] and smoke haze over Siberia in 2012 [1] were performed. Statistical analysis of the aerosol forcing variations in Siberian haze 2016 was carried out.

Large-scale smogs often occur over the Northern China Plain (NCP) and surrounding areas. Aerosol optical depth (AOD) and aerosol radiative forcing smog variations were studied (for 2003, 2007 and 2016). The efficiencies of radiative aerosol forcing in smoky haze and smog over NCP were compared. It is shown that the difference between aerosol radiative forcing in smog and smoke haze is mainly due to the large absorption in smog compared to smoke haze. In particular, at fixed AOT the albedo of earth-atmosphere system in the case of smoky haze is greater than the albedo under smog.

1. Gorchakov G.I., Sitnov S.A., Sviridenkov M.A. et al. Satellite and ground-based monitoring of smoke in the atmosphere during the summer wildfires in European Russia in 2010 and Siberia in 2012 // *Int. J. Remote Sens.* 2014. V. 35, No 15. P. 5698–5721.
2. Gorchakov G.I., Golitsyn G.S., Sitnov S.A. et al. Large-Scale Haze over Eurasia in July 2016 // *Doklady Earth Sciences*. 2018. V. 482. No 1. P. 1212–1215.
3. Semoutnikova E.G., Gorchakov G.I., Sitnov S.A. et al. Siberian Smoke Haze over European Territory of Russia in July 2016: Atmospheric Pollution and Radiative Effects // *Atmos. Ocean. Opt.* 2018. V. 31, No 2. P. 171–180.
4. Gorchakov G.I., Sitnov S.A., Semoutnikova E.G. et al. Large-Scale Smoke Haze over the European Part of Russia and Belarus in July 2016 // *Izv. Atm.Oceanic Phys.* 2018. V. 54, No 9. P. 986–996.

Межгодовая изменчивость инсоляции Пиренейского полуострова на основе спутниковых и наземных измерений

Гудошникова О.А. (guggopo@gmail.com)

Главная геофизическая обсерватория им. А.И. Воейкова, ул. Карбышева 7, 194021 Санкт-Петербург, Россия

В связи с изменением климата и ростом уровня загрязнения воздуха солнечные ресурсы, рассматриваемые по временной шкале, становятся менее стабильными и подвергаются значительным декадальным изменениям [1]. В работе рассмотрена динамика инсоляции Пиренейского полуострова (ПП). Для этого региона юго-запада Европы характерен высокий климатический уровень солнечной радиации. ПП имеет большой потенциал для развития гелиоэнергетики.

Описание пространственно-временной изменчивости инсоляции выполнено на базе длинных рядов наблюдений. Временной охват исследования с 1941 по 2017 год. Проведен анализ средних месячных сумм солнечной радиации и величин продолжительности солнечного сияния из архива Мирового центра радиационных данных (МЦРД). В МЦРД представлены измерения, полученные с наземных станций Португалии (португальская служба погоды IPMA) и Испании (АЕМЕТ испанская служба погоды). Все наземные измерения солнечной радиации выполняются с использованием пиранометров Кипп-Зонена, солнечного сияния – регистратором Кэмпбелла-Стокса. Выбор 12 станций осуществлялся с учетом местоположения и наличия большой длины рядов измерений. Существенные

пропуски в данных этих станций были дополнены спутниковыми измерениями нисходящей инсоляции для всего неба из архива Национального управления по аэронавтике и исследованию космического пространства (NASA Langley Research Center, Earth Science/Applied Science Program). Графическое представление статистических величин солнечной радиации демонстрирует влияние локальных особенностей расположения актинометрических станций Пиренейского полуострова. На пространственно-временное распределение радиации влияют орографические объекты на севере ПП, дающие локальные тени. Затеняющим фактором является: атмосферный перенос сахарской пыли, пыльцы с близлежащих деревьев, а также пепла от лесных пожаров в аномально жаркие годы. Высокая концентрация океанических аэрозолей на прибрежных станциях Португалии снижает регистрируемые солнечные потоки.

Анализ годовых и климатологических величин за периоды более 40 лет показывает вариации изменчивости радиационных характеристик по сезонам за средний период. Сравнительно низкие средние значения облачности в центральной и южной частях ПП [2] влияют на положительный градиент радиации с севера на юг и с запада на восток, с локальными эффектами, зависящими от топографии и расстояния до побережья. На станции Кордоба (Испания, регион Андалусии) наблюдаются высокие значения инсоляции. Самые высокие средние годовые значения (~ 5.13 кВт·ч/м²/день) измерены в 1984 и 2017 гг. Самые низкие средние значения связаны с западной и североатлантической прибрежной зоной и колеблются между ~ 0.96 и ~ 1.75 (кВт·ч/м²/день). Наименьшие значения найдены в Корунье (Галисия, Испания). На станциях Эвора и Бежа максимальная продолжительность солнечного сияния составляет 8.5 час. На востоке и юге Алентежу измеряются высокие средние значения радиации по сравнению с остальной частью Португалии. Эта картина в целом согласуется с исследованием, проведенным в работе [3] для Испании за период 1985–2010 гг., в котором тоже использовались данные о продолжительности солнечного сияния. Высокая изменчивость среднего квадратического отклонения (СКО) по наземным наблюдениям обнаруживается в весенний и летний сезоны, особенно вдоль прибрежных районов Атлантики. Например, на станции Сан-Себастьян (Испания) значения СКО выше 150 (10^{-2} МДж/м²). Исследование данных межгодовой изменчивости инсоляции на ПП по наземным и спутниковым измерениям обнаружило наличие небольших периодических амплитуд. Тенденции согласуются с 11-летним циклом солнечной активности [4].

1. Wild M. Global Dimming and Brightening. Decadal changes in sunlight at the Earth's surface // AGU Pressconference. 2015, <https://fallmeeting.agu.org/2015/files/2015/12/Wild-slides.pdf>
2. Lopes Francisco, Hugo G. Silva, Rui Salgado et al. Short-term forecasts of GHI and DNI for solar energy systems operation: assessment of the ECMWF integrated forecasting system in southern Portugal // Solar Energy. 2018. V. 170. P. 14–30.
3. Sanchez-Lorenzo, Josep Calbó, Michele Brunetti and Clara Deser. Dimming/brightening over the Iberian Peninsula: Trends in sunshine duration and cloud cover and their relations with atmospheric circulation // J. Geoph. Res. 2009. V. 114. D00D09, doi:10.1029/2008JD011394
4. Kopp, G., and J.L. Lean. A new, lower value of total solar irradiance: evidence and climate significance, Geophys. Research. Lett. 2011. V. 38. L01706, doi:10.1029/2010GL045777.

Interannual variability of insolation over the Iberian Peninsula based on satellite and ground-based measurements

O.A. Gudoshnikova (guggopo@gmail.com)

A.I. Voeikov Main Geophysical Observatory, 7 Karbyshev str., 194021 Saint-Petersburg, Russia

Due to climate change and increased air pollutions, the solar radiative fluxes at the Earth surface are becoming less stable and subject to decadal changes [1]. The paper considers the dynamics of the solar resources of the Iberian Peninsula (IP). This region of southwestern Europe has a high climatic level of insolation and the potential for used solar and wind powered renewable energy systems.

The description of the spatial-temporal variability of insolation performed on the basis of long series of observations. The time coverage of the study is from 1941 to 2017. The data of the average

monthly global solar radiation and the values of the sunshine duration were obtained from the archive of the World Radiation Data Centre (WRDC). The WRDC presents measurements with daily observations obtained from Portugal's ground-based stations IPMA (Portuguese Weather service) and from Spain – AEMET (Spanish Weather service). All ground-based measurements of solar radiation are performed using instrument Kipp & Zonen pyranometer and the Campbell-Stokes sunshine recorder (the sunshine duration). The choice of 12 stations was carried out taking into account the location and the presence of a long time series of high quality data sets. Significant gaps in the data of these stations were supplemented by satellite measurements of all Sky Insolation Incident on a Horizontal Surface. (These data were obtained from the NASA Langley Research Center (LaRC) POWER Project funded through the NASA Earth Science/Applied Science Program). The graphical representation of the statistical values of solar radiation demonstrates the influence of local features of the position of the actinometric stations of the Iberian Peninsula. The spatial-temporal distribution of radiation is influenced by orographic objects in the north of the IP give local shadows. The dimming factors are atmospheric transport of the Sahara's dust, pollen from nearby trees, and also ash from forest fires in abnormally hot years. A high concentration of oceanic aerosols in the coastal stations of Portugal reduces downwelling solar streams.

The study of annual and climatological values for periods of more than 40 years shows characteristics in the variability of the surface solar radiation, by season for an average period. Comparatively low average cloudiness values in the central and southern parts of the IP, as noted earlier [2], affect the positive gradient of radiation from north to south and from west to east, with local effects depending on topography and distance to the coast. At Cordoba station (Spain, Andalusia region) high insolation values are observed. Highest average annual values ($\sim 5.13 \text{ kWh/m}^2/\text{day}$) were measured in 1984 and 2017 (NASA). The lowest average values are related to the western and north Atlantic coastal zone and range between ~ 0.96 и $\sim 1.75 \text{ kWh/m}^2/\text{day}$. The lowest values are observed in La Coruna (Galicia, Spain). At Evora and Beja stations, the maximum average annual sunshine duration is 8.5 hours. In the east and south of region Alentejo, high average radiation values are measured compared with the rest of Portugal. This picture is generally consistent with the study [3] for Spain, for the period 1985–2010, which also used data on the sunshine duration. High variability (standard deviation) from ground observations is found in the spring and summer seasons, especially along the coastal regions of the Atlantic. For example, at the San Sebastián station (Spain), the standard deviation values are above 150 (10^{-2} MJ/m^2). A study of the interannual variability of insolation on the IP from ground and satellite measurements revealed the presence of small periodic amplitudes. The trends are consistent with the 11 year cycle of solar activity [4].

1. Wild M. Global Dimming and Brightening. Decadal changes in sunlight at the Earth's surface // AGU Pressconference. 2015, <https://fallmeeting.agu.org/2015/files/2015/12/Wild-slides.pdf>
2. Lopes Francisco, Hugo G. Silva, Rui Salgado et al. Short-term forecasts of GHI and DNI for solar energy systems operation: assessment of the ECMWF integrated forecasting system in southern Portugal // Solar Energy. 2018. V. 170. P. 14–30.
3. Sanchez-Lorenzo, Josep Calbó, Michele Brunetti and Clara Deser. Dimming/brightening over the Iberian Peninsula: Trends in sunshine duration and cloud cover and their relations with atmospheric circulation // J. Geoph. Res. 2009. V. 114. D00D09, doi:10.1029/2008JD011394
4. Kopp, G., and J.L. Lean. A new, lower value of total solar irradiance: evidence and climate significance, Geophys. Research. Lett. 2011. V. 38. L01706, doi:10.1029/2010GL045777.

Динамические факторы формирования поля облаков Земли

Матвеев Ю.Л. (matveev.gpa@yandex.ru), Матвеев Л.Т.

*Российский государственный гидрометеорологический университет, Воронежская ул. 79, 192007
Санкт-Петербург, Россия*

Уравнения притока (баланса) тепла и водяного пара, дополненные некоторыми другими соотношениями, позволяют установить зависимость водности от всех факторов формирования облака: адвекции тепла (холода), вертикальных движений и турбулентного

обмена. Следующие из анализа этих уравнений и количественных оценок водности облаков создают основу понимания (объяснения) наблюдаемых особенностей образования различных форм облаков: четко выраженная зависимость водности облаков от температуры (увеличение ее на два-три порядка при переходе от низких отрицательных к высоким положительным температурам); уменьшение водности по мере увеличения высоты (яруса) расположения облака (на один-два порядка при переходе от нижнего яруса к верхнему, а также от тропосферных облаков к перламутровым (стратосфера) и серебристым (мезосфера); сезонные колебания водности и границ облаков.

Впервые установленная количественная связь изменения водности облака с адвекцией температуры (адвективным притоком тепла) закладывает основу пересмотра взглядов на условия образования различных форм облаков: в формировании слоисто-дождевых, слоистых, слоисто-кучевых облаков среднего и верхнего ярусов, а также циклона в целом не меньшую (а, возможно, и большую), чем вертикальные скорости, играют роль адвекция холода (в образовании и усилении) и адвекция тепла (в ослаблении и рассеянии облака). Велика роль адвекции холодного воздуха в образовании стены облаков в тропическом циклоне за счет притока тепла, извлекаемого циклоном из океана, температура в нем (на расстоянии до 200–300 км от центра) увеличивается на несколько десятков градусов за сутки. Этот рост температуры компенсируется адвекцией (притоком) холодного воздуха с расстояний до 2000–3000 км от центра циклона. Под влиянием этой адвекции и формируются в циклоне мощные кучево-дождевые облака и ливневые осадки.

Уже в работах 50–60-х годов, обобщенных в монографии Л.Т. Матвеева «Динамика облаков», уделено много внимания роли турбулентного обмена в образовании и развитии облаков, в частности, закономерностям распределения по высоте массовой доли пара и удельного влагосодержания, водности облаков и др., а также получению формул для высоты нижней и верхней границ облака. Из последних следует, что высота нижней границы (уровня конденсации) зависит не только от влажности воздуха (точки росы или относительной влажности) вблизи земной поверхности (как по формуле Ферреля), но и в равной степени от распределения температуры по высоте (в общем же случае – также от вертикальной скорости и коэффициента турбулентности).

Dynamic factors of Earth clouds formation

Yu.L. Matveev (matveev.gpa@yandex.ru), L.T. Matveev

Russian State Hydrometeorological University, 79 Voronezhskaya str., 192007 Saint-Petersburg, Russia

Equations of inflow (balance) of heat and water vapor, supplemented by some other relations, allow us to establish the dependence of water content on all factors of cloud formation: advection of heat (cold), vertical movements and turbulent exchange. Results following from the analysis of these equations and quantitative estimates of the cloud liquid water content form the basis for understanding (explaining) the observed features of the formation of various cloud forms: a clearly expressed dependence of the cloud liquid water content on temperature (increasing it by two or three orders of magnitude in the transition from low negative to high positive temperatures); decrease in water content as the height (layer) of the cloud location increases (by one or two orders of magnitude in the transition from the lower to the upper layer, as well as from tropospheric clouds to pearlescent (stratosphere) and silver (mesosphere); seasonal fluctuations of water content and cloud boundaries.

For the first time the established quantitative relationship between changes in the water content of the cloud and the temperature advection (advective heat inflow) form the basis for a revision of views on the conditions of the formation of various forms of clouds: in the formation of nimbostratus, stratus and stratocumulus clouds of middle and upper layers, as well as the cyclone as a whole, the cold advection (in the formation and enhancement) and heat advection (in the weakening and dispersion of the cloud) play the role not less (and possibly more) than the vertical velocity. The role of advection of cold air in the formation of the cloud wall in the tropical cyclone

due to the influx of heat extracted by the cyclone from the ocean is great. The temperature in it (at a distance of 200–300 km from the center) increases by several tens of degrees per day. This increase in temperature is compensated by advection (inflow) of cold air from distances up to 2000–3000 km from the center of the cyclone. Under the influence of this advection powerful cumulonimbus clouds and rainfall are formed in the cyclone.

Already in the works of 50-60-ies, summarized in the monograph by L.T. Matveev ("The dynamics of clouds"), much attention is paid to the role of turbulent exchange in the formation and development of clouds, in particular, regularities in the height distribution of the mass fraction of vapor, and specific humidity, the water content of clouds, etc., as well as obtaining formulas for the height of the upper and lower boundaries of the cloud. It follows from the latter that the height of the lower boundary (condensation level) depends not only on the air humidity (dew point or relative humidity) near the earth's surface (as in the formula of Ferrel), but also equally on the temperature height distribution (in the general case – also on the vertical speed and turbulence coefficient).

Тенденции изменений солнечной радиации в Балтийском регионе

Цветков А.В. (wrdc@main.mgo.rssi.ru), Самукова Е.А

Главная геофизическая обсерватория им. А.И.Воейкова, МЦРД, ул. Карбышева 7, 194021 Санкт-Петербург, Россия

Балтийское море и прилегающие к нему страны являются важнейшим регионом, в котором изменения климата, в частности, его радиационная составляющая, влияют на все стороны деятельности человека. Статистический анализ характера изменений базовых составляющих радиационного баланса, таких как суммарная и рассеянная радиация, опирается на результаты наблюдений на отдельных станциях и сводится к полиномиальной аппроксимации соответствующих рядов данных.

В предлагаемой работе представлены результаты анализа рядов сезонных и годовых значений солнечной радиации 35 актинометрических станциях Балтийского региона, представленных в архиве Мирового центра радиационных данных (МЦРД) за 1964–2018 годы. Рассмотрены особенности многолетних изменений соотношения между рассеянной и прямой солнечной радиацией на горизонтальную поверхность, которые могут отражать тенденции изменений облачности и прозрачности атмосферы. Для оценки изменения солнечной радиации на территории России использованы также данные из архива Росгидромета «Актинометрия». Исследования тенденций суммарной и рассеянной радиации основываются на результатах непосредственных наблюдений на станциях 10 стран: Дании, Германии, Латвии, Литвы, Норвегии, Польши, России, Финляндии, Швеции, Эстонии. Прямая солнечная радиация получена из значений суммарной и рассеянной радиации. Многолетний ход сезонных и годовых значений солнечной радиации оценивался линейными трендами, а также полиномами более высокой степени. Степень неопределённости оценок трендов может быть уменьшена после анализа остатков от выделения трендов из исходных рядов и проверки близости гистограмм таких остатков к нормальному закону распределения.

В 1980-х–начале 1990-х годов на большинстве актинометрических станций Балтийского региона отмечен минимум поступления солнечной радиации и наибольший коэффициент отношения рассеянной радиации к прямой солнечной радиации на горизонтальную поверхность (110–140%). Анализ многолетней изменчивости солнечной радиации на станциях показал наличие двух хорошо выраженных периодов: уменьшение с 1964 г. до начала 1990-х и увеличение с середины 1990-х до 2010-х годов. В первый период произошло уменьшение суммарной радиации в среднем на 2% за десятилетие, наиболее значительное в летний сезон – на 3–4% за десятилетие. Во второй период поступление солнечной радиация увеличилось в среднем на 2% за десятилетие. Наиболее заметное увеличение отмечается в весенний и осенний сезоны – в среднем на 3% за десятилетие. Увеличение суммарной радиации в регионе в основном связано с ростом прямой солнечной

радиации. На большинстве станций отмечается превышение рассеянной радиации прямой солнечной радиацией на горизонтальную поверхность, соотношение рассеянной радиации к прямой радиации составляет 60–90%. В последнее десятилетие хорошо выраженной общей тенденции увеличения или уменьшения поступления солнечной радиации в Балтийском регионе не наблюдается.

Trends of solar radiation changes in Baltic Region

A.V. Tsvetkov (wrdc@main.mgo.rssi.ru), E.A. Samukova

A.I. Voeikov Main Geophysical Observatory, WRDC, 7 Karbyshev str., 194021 Saint-Petersburg, Russia

The Baltic Sea and the adjacent countries are the most important region in which climate change, in particular its solar radiation component, affects all aspects of human activity. Statistical analysis of changes in the basic components of the radiation balance, such as total and diffuse radiation, are based on the results of observations at individual stations and are reduced to a polynomial approximation of the corresponding data series.

The proposed report presents the results of an analysis of time series of seasonal and annual values of solar radiation observed at 35 actinometrical stations in the Baltic region. The data presented in the archive of the World Radiation Data Center (WRDC) for the period 1964–2018. The features of perennial changes in the ratio between diffuse and direct solar radiation on a horizontal surface, which may reflect trends in cloudiness and atmospheric transparency, are considered. To assess changes in solar radiation in the North-West of Russia data from the Roshydromet “Actinometry” archive were also used. Studies of trends in total and diffuse radiation are based on the results of observations at stations located in 10 countries: Denmark, Germany, Latvia, Lithuania, Norway, Poland, Russia, Finland, Sweden and Estonia. Direct solar radiation is calculated as the difference between values of total and diffuse radiation. The long-term trends of seasonal and annual values of solar radiation was estimated by fitting linear trends, as well as higher-order polynomials. The degree of uncertainty in trend estimates can be reduced after analyzing the residuals from extracting trends in the original time series and checking the proximity of the histograms of such residuals to the normal distribution law.

In the 1980s–early 1990s, most actinometrical stations in the Baltic region showed local minimum of solar radiation. The highest ratio between the values of diffuse and direct horizontal solar radiation was in the range of 110–140%. The long-term variability of solar radiation at the stations showed the presence of two well-defined periods: a decrease from 1964 to the early 1990s and an increase from the mid-1990s to the 2010s. In the first period, the total radiation decreases by an average of 2% per decade, most significant in the summer season by 3–4% per decade. In the second period solar radiation increased by an average of 2% per decade. The most noticeable increase is observed in the spring and autumn seasons – an average of 3% per decade. The increase in total radiation in the region is mainly due to the increase in direct solar radiation (on horizontal). At most stations, direct solar radiation on the horizontal surface exceeds diffuse radiation, the ratio between the values of diffuse and direct horizontal solar radiation was in the range of 60–90%. In the last decade the general trend of increasing or decreasing solar radiation is not significant in the Baltic region.

База глобальных оценок климатических УФ индексов

Фомин Б.А.¹ (b.fomin@mail.ru), Вязанкин А.С.² (vzvzvzan@mail.ru)

¹Московский Физико-Технический Институт, Институтский пер. 9, 141701 Долгопрудный Моск. обл., Россия

²Центральная Аэрологическая Обсерватория, Первомайская ул. 3, 141702 Долгопрудный Моск. обл., Россия

В докладе представлена база расчётных оценок климатических УФ индексов на каждый день в году на сетке с шагом 0.125x0.125 градусов по долготе и широте. Учитывались

многолетние глобальные данные по баллу облачности и альбедо подстилающей поверхности (<https://cds.climate.copernicus.eu/#!/search?text=ERA5&type=dataset>), аэрозольной оптической толщине (<http://apps.ecmwf.int/datasets/data/cams-climate-forcings/> и с 2013 по 2017 год <https://apps.ecmwf.int/datasets/data/cams-nrealtime/levtype%3Dsfc/>), и общему содержанию озона (<https://apps.ecmwf.int/datasets/data/interim-full-mnth/levtype%3Dsfc/>). Также учитывалась высота над уровнем океана, (<https://apps.ecmwf.int/datasets/data/interim-full-invariant/>).

В каждой точке на основе этих многолетних данных оценивалась вероятность определённой комбинации таких параметров как балл облачности, аэрозольное ослабление, альбедо подстилающей поверхности и общего содержания озона. И для этой комбинации выполнялся расчёт УФ индекса (для каждого дня и географической точки). В расчётах использовалась оригинальная методика, основанная на параметризации спектров поглощения озона с последующим решением уравнений переноса УФ радиации методом дискретных ординат. Для получения климатических УФ индексов эти решения суммировались с учётом вышеуказанных вероятностей. База может быть полезна для задач курортологии и других медицинских приложений.

Работа поддержана грантами РФФИ (18-01-00609А and 17-01-00220А).

A database of global estimates of climate UV indices

B.A. Fomin¹ (b.fomin@mail.ru), A.S. Viazankin² (vzvzvzan@mail.ru)

¹*Moscow Institute of Physics and Technology, 9 Institutsky per., 141701 Dolgoprudny, Moscow reg., Russia*

²*Central Aerological Observatory, 3 Pervomaiskaya str., 141701 Dolgoprudny, Moscow reg., Russia*

The report presents a database of estimates of climate UV indices for each day of the year on a grid of 0.125x0.125 degrees in longitude and latitude. The perennial global data on cloud cover and underlying surface albedo (<https://cds.climate.copernicus.eu/#!/search?text=ERA5&type=dataset>), aerosol optical thickness (<http://apps.ecmwf.int/datasets/data/cams-climate-forcings/> and from 2013 to 2017 <https://apps.ecmwf.int/datasets/data/cams-nrealtime/levtype%3Dsfc/>), and the total ozone content (<https://apps.ecmwf.int/datasets/data/interim-full-mnth/levtype%3Dsfc/>) and altitude above sea level (<https://apps.ecmwf.int/datasets/data/interim-full-invariant/>) were taken into account.

At each point, on the basis of these long-term data, the probability of a certain combination of parameters such as cloud cover, aerosol attenuation, albedo of the underlying surface and total ozone was estimated. And for this combination, the UV index was calculated (for each day and geographic point). The original technique was used in the calculations. It based on the parametrization of the absorption spectra of ozone with the subsequent solution of the equations of UV radiation transfer by the method of discrete ordinates. To obtain climate UV indices, these solutions were summed up taking into account the above probabilities. The base can be useful for problems of balneology and other medical applications.

The work is supported by RFBR grants (18-01-00609А and 17-01-00220А).

Валидация MODIS данных аэрозольной оптической толщины с данными AERONET для наземной станции ARG (Молдова) за период наблюдений с 2003 по 2017 гг.

Акулинин А.А. (akulinin@phys.asm.md), Смыков В.П.

Институт прикладной физики, ул. Академией 5, Кишинев, MD-2028 Молдова

В данном исследовании используются наборы данных аэрозольной оптической толщины AOT@550 нм для спектрометра изображений со средним разрешением (MODIS), полученные из мультиспектральных наблюдений изображения земной поверхности с борта спутника EOS Terra. Наборы данных представляют собой среднедневные значения

АОТ@550 нм для уровня точности L3, семейства C6.0 и с пространственным разрешением $1^\circ \times 1^\circ$. Данные обработаны с использованием алгоритмов Deep Blue (DB) и Dark Target (DT). Данные АОТ@550 нм были загружены с сайта <http://disc.sci.gsfc.nasa.gov/giovanni/>.

Спектральные измерения АОТ для семи длин волн от 340 нм до 1024 нм проводились с использованием солнечного фотометра Cimel CE 318 в рамках международной программы AERONET, NASA/GSFC с 1999 года. Cimel CE 318 был размещен на наземной станции ARG по мониторингу солнечной радиации на базе Института прикладной физики (ИПФ), Кишинев (Молдова) (47.00°N , 28.82°E , $h = 205$ над уровнем моря). Значения АОТ@550 нм были рассчитаны с использованием аппроксимации полиномом второй степени наборов данных АОТ для диапазона длин волн от 340 нм до 1024 нм, которые можно загрузить с веб-сайта AERONET (<https://aeronet.gsfc.nasa.gov/>). В процессе обработки наборов данных АОТ@550 нм принимались во внимание две облачные ситуации: все типы облачности (AS) и безоблачное небо (CF).

Аппроксимации наборов данных MODIS DT АОТ@550 нм против AERONET АОТ@550 нм для облачных ситуаций AS и CF следующие:

(CF): $Y(\text{MODIS}) = -0.0198 + 0.7580 X(\text{AERONET})$, $R=0.759$, $\text{bias}=-0.058$, $\text{RMSE}=0.079$, $N=129$;

(AS): $Y(\text{MODIS})=0.0252 + 0.7353 X(\text{AERONET})$, $R=0.696$, $\text{bias}=-0.032$, $\text{RMSE}=0.115$, $N=2075$.

Аппроксимации наборов данных MODIS DB АОТ@550 нм против AERONET АОТ@550 нм для облачных ситуаций AS и CF следующие:

(CF): $Y(\text{MODIS})=-0.0035 + 0.9825 X(\text{AERONET})$, $R=0.806$, $\text{bias}=-0.006$, $\text{RMSE}=0.054$, $N=188$;

(AS): $Y(\text{MODIS})=0.0342 + 0.8206 X(\text{AERONET})$, $R=0.781$, $\text{bias}=-0.002$, $\text{RMSE}=0.094$, $N=2267$.

Во всех случаях наблюдалась недооценка данных MODIS АОТ@550 нм.

Авторы выражают благодарность доктору Бренту Холбену, руководителю проекта AERONET, NASA/GSFC и команде проекта за предоставление солнечного фотометра, его калибровку и обработку данных измерений АОТ. Мы благодарим членов команды NASA DISC за предоставленные данные MODIS АОТ@550 нм со спутниковой платформы EOS Terra.

Validation of the MODIS datasets of aerosol optical depth with data from the AERONET site at the ARG ground station (Moldova) for the period of observation from 2003 to 2017

A.A. Aculinin (akulinin@phys.asm.md), V.P. Smicov
Institute of Applied Physics, 5 Academiei Str., Kishinev, MD-2028, Moldova

The MODerate resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) datasets of aerosol optical depth AOD@550 nm retrieved from multispectral observations of the Earth surface on board of the EOS Terra satellite are used in this research. Datasets of daily mean AOD@550 nm of Level 3 collection C6.0 and with spatial resolution $1^\circ \times 1^\circ$ for Deep Blue (DB) and Dark Target (DT) algorithms have been downloaded from <http://disc.sci.gsfc.nasa.gov/giovanni/>.

Multispectral measurements of AOD at seven wavelengths from 340 nm to 1024 nm have been carried out by sunphotometer Cimel CE 318 within the framework of the international program AERONET, NASA/GSFC since 1999. Cimel CE 318 was placed at the ARG ground-based solar radiation monitoring station (47.00°N , 28.82°E , $h = 205$ m.a.s.l.) at the Institute of Applied Physics (IAP), Kishinev (Moldova). The values of AOD@550 were computed by applying the second degree polynomial approximation to data sets of AOD for wavelength range from 340 nm to 1024 nm, which can be downloaded from AERONET website (<https://aeronet.gsfc.nasa.gov/>). Two cloud situations are taken into consideration in the course of processing of AOD@550 nm datasets: all-skies (AS) and cloud-free (CF).

Approximations of scatterplots MODIS DT AOD@550 nm vs. AERONET AOD@550 nm for AS and CF cloud situations are the following:

(CF): $Y(\text{MODIS}) = -0.0198 + 0.7580 X(\text{AERONET})$, $R=0.759$, $\text{bias}=-0.058$, $\text{RMSE}=0.079$, $N=129$;

(AS): $Y(\text{MODIS})=0.0252 + 0.7353 X(\text{AERONET})$, $R=0.696$, $\text{bias}=-0.032$, $\text{RMSE}=0.115$, $N=2075$.

Approximations of scatterplot MODIS DB AOD@550 nm vs. AERONET AOD@550 nm for AS and CF cloud situations are the following:

(CF): $Y(\text{MODIS}) = -0.0035 + 0.9825 X(\text{AERONET})$, $R=0.806$, $\text{bias}=-0.006$, $\text{RMSE}=0.054$, $N=188$;

(AS): $Y(\text{MODIS})=0.0342 + 0.8206 X(\text{AERONET})$, $R=0.781$, $\text{bias}=-0.002$, $\text{RMSE}=0.094$, $N=2267$.

In all cases it was observed underestimation of MODIS AOD@550 nm data.

The authors express their gratitude to Dr. Brent Holben, the PI of the AERONET project and to project team for the provision of sunphotometer, its calibration and data processing. We thank to members of NASA DISC teams for MODIS products.

Статистическое изменение ежемесячных и годовых сумм солнечной радиации на станции ARG (Молдова) в течение многолетнего периода наблюдений с 2004 по 2018 гг.

Акулинин А.А. (akulinin@phys.asm.md), Смыков В.П.

Институт прикладной физики, ул. Академией 5, Кишинев, MD-2028 Молдова

Целью исследования является получение значений статистических вариаций месячных и годовых сумм широкополосных компонент коротковолновой (SW) солнечной радиации в спектральных поддиапазонах от УФ (-B, erythemal, -A) до ближнего ИК диапазона. Солнечное излучение на горизонтальной плоскости измерялось из прямых наблюдений на наземной станции ARG на базе Института прикладной физики (ИПФ), Кишинев (Молдова). Два радиометрических датчика CM-11 (300–2800 нм) и один датчик CH-1 (200–4000 нм) использовались для измерения глобальной $Q_{\text{SW,gl}}$, диффузной $Q_{\text{SW,dif}}$ и, соответственно, прямой (на плоскость, перпендикулярную солнечным лучам) $Q_{\text{SW,dir}}$ солнечной радиации. Два датчика типа UV-S-B-C (280–315 нм), один датчик типа UV-S-A-C (315–400 нм) и один датчик типа SPLite (400–1100 нм) использовались для измерения глобального и рассеянного солнечного UVe эритемального, UVB, UVA и SPLite излучения: $Q_{\text{Uve,gl}}$, $Q_{\text{UVb,gl}}$, $Q_{\text{Uva,gl}}$ и $Q_{\text{SP,gl}}$.

Соответствующая статистика многолетних средних значений отношений $< Q_{x,y} / Q_{\text{SW,gl}} >_{\text{MY}}$, $x \in \{ \text{Uve, UVb, Uva, sp, sw} \}$, $y \in \{ \text{gl, dif, dir} \}$ и многолетних средних значений годовых сумм $< Q_{\text{SW,y}} >_{\text{MY}}$ за наблюдательный период с 2004 по 2018 годы представлена ниже:

отношения $< Q_{x,y} / Q_{\text{SW,gl}} >_{\text{MY}}$, %	годовые суммы $< Q_{\text{SW,y}} >_{\text{MY}}$, MJ/m^2
$< Q_{\text{Uve,gl}} / Q_{\text{SW,gl}} >_{\text{MY}} = 0.02$	$< Q_{\text{Uve,gl}} >_{\text{MY}} = 0.993 \pm 0.101$
$< Q_{\text{UVb,gl}} / Q_{\text{SW,gl}} >_{\text{MY}} = 0.16$	$< Q_{\text{UVb,gl}} >_{\text{MY}} = 7.734 \pm 0.789$
$< Q_{\text{Uva,gl}} / Q_{\text{SW,gl}} >_{\text{MY}} = 7.88$	$< Q_{\text{Uva,gl}} >_{\text{MY}} = 375.264 \pm 9.344$
$< Q_{\text{SP,gl}} / Q_{\text{SW,gl}} >_{\text{MY}} = 94.64$	$< Q_{\text{SP,gl}} >_{\text{MY}} = 4509.151 \pm 161.637$
$< Q_{\text{SW,dif}} / Q_{\text{SW,gl}} >_{\text{MY}} = 40.16$	$< Q_{\text{SW,dif}} >_{\text{MY}} = 1914.848 \pm 56.724$
	$< Q_{\text{SW,gl}} >_{\text{MY}} = 4764.878 \pm 174.341$
	$< Q_{\text{SW,dir}} >_{\text{MY}} = 5023.890 \pm 345.307$

Также было показано, что внутригодовые изменения месячных сумм солнечной радиации, усредненных за период наблюдения с 2004 по 2018 гг., хорошо аппроксимируются гауссовым распределением с коэффициентами корреляции от $R^2 \sim 0.976$ (для $Q_{\text{SW,dir}}$) до $R^2 \sim 0.994$ (для $Q_{\text{Uva,gl}}$ & $Q_{\text{SW,dif}}$).

Результаты многолетних наблюдений широкополосной солнечной радиации в спектральных поддиапазонах от УФ до ближней ИК и подробное описание наземной станции ARG представлены на сайте <http://arg.phys.asm.md>. Данные по солнечной радиации регулярно предоставляются во Всемирный центр данных по озону и ультрафиолетовой радиации (WOUDC) <http://www.woudc.org/> и во Всемирный центр радиационных данных (WRDC) <http://wrdc.mgo.rssi.ru>.

Statistical variations of monthly and yearly sums of solar irradiance at the ARG ground station (Moldova) in the course of multi-year observational period from 2004 to 2018

A.A. Aculinin (akulinin@phys.asm.md), V.P. Smicov
Institute of Applied Physics(IAP), 5 Academiei Str., Kishinev, MD-2028, Moldova,

The aim of the research is to derive values of statistical variations of monthly and yearly sums of the broadband components of shortwave (SW) solar irradiance in spectral subranges from UV(-B, erythema, -A) to near IR. Solar irradiance onto the horizontal plane was measured from the direct observations at the ARG ground-based station, Institute of Applied Physics (IAP), Kishinev (Moldova). Two radiometric sensors CM-11 (300–2800 nm) and one sensor CH-1 (200–4000 nm) were used to measure global $Q_{SW,gl}$, diffuse $Q_{SW,dif}$ and, respectively, direct (onto the plane perpendicular to solar beam) $Q_{SW,dir}$ SW solar irradiances. Two sensors of type UV-S-B-C (280–315 nm), one sensor of type UV-S-A-C (315–400 nm) and one sensor of type SPLite(400–1100 nm) were used to measure global and diffuse solar UV-ery, UV-B, UV-A and SPLite irradiances: $Q_{Uve,gl}$, $Q_{UVb,gl}$, $Q_{UVa,gl}$ and $Q_{SP,gl}$.

Respective statistics of multi-year mean values of ratios $\langle Q_{x,y}/Q_{SW,gl} \rangle_{MY}$, $x \in \{ UVe, UVb, UVa, sp, sw \}$, $y \in \{ gl, dif, dir \}$ and multi-year mean values of yearly sums $\langle Q_{SW,y} \rangle_{MY}$ for the observational period from 2004 to 2018 is presented below:

ratios $\langle Q_{x,y}/Q_{SW,gl} \rangle_{MY}$, %	yearly sums $\langle Q_{SW,y} \rangle_{MY}$, MJ/m ²
$\langle Q_{Uve,gl}/Q_{SW,gl} \rangle_{MY} = 0.02$	$\langle Q_{Uve,gl} \rangle_{MY} = 0.993 \pm 0.101$
$\langle Q_{UVb,gl}/Q_{SW,gl} \rangle_{MY} = 0.16$	$\langle Q_{UVb,gl} \rangle_{MY} = 7.734 \pm 0.789$
$\langle Q_{UVa,gl}/Q_{SW,gl} \rangle_{MY} = 7.88$	$\langle Q_{UVa,gl} \rangle_{MY} = 375.264 \pm 9.344$
$\langle Q_{SP,gl}/Q_{SW,gl} \rangle_{MY} = 94.64$	$\langle Q_{SP,gl} \rangle_{MY} = 4509.151 \pm 161.637$
$\langle Q_{SW,dif}/Q_{SW,gl} \rangle_{MY} = 40.16$	$\langle Q_{SW,dif} \rangle_{MY} = 1914.848 \pm 56.724$
	$\langle Q_{SW,gl} \rangle_{MY} = 4764.878 \pm 174.341$
	$\langle Q_{SW,dir} \rangle_{MY} = 5023.890 \pm 345.307$

It has been also shown that the intra-annual change of monthly sums of solar irradiance, averaged over observation period from 2004 to 2018, is well approximated by Gaussian distribution with correlation coefficients ranged from $R^2 \sim 0.976$ (for $Q_{SW,dir}$) to $R^2 \sim 0.994$ (for $Q_{UVa,gl}$ & $Q_{SW,dif}$).

Results of multi-year observations of solar irradiances from UV to near IR and detailed description of ARG ground-based station are presented at the site <http://arg.phys.asm.md>. Solar radiation data are submitted on a regular basis to the World Ozone and Ultraviolet Radiation Data Centre (WOUDC) <http://www.woudc.org/> and to the World Radiation Data Center (WRDC) <http://wrdc.mgo.rssi.ru>.

Создание и валидация эмпирической модели изменчивости компонент радиационного баланса земной поверхности

Горбаренко Е.В. (catgor@mail.ru), Бунина Н.А.
Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Ленинские горы 1, 119992 Москва, Россия

Оценка радиационного баланса системы «атмосфера-подстилающая поверхность», его основных составляющих в зависимости от факторов, определяющих их изменчивость в реальной атмосфере, необходима для создания надежных параметризаций радиационных процессов в моделях прогноза погоды и климата. На основе анализа радиационного климата Москвы дана оценка значимости факторов, определяющих изменения коротковолновой и длинноволновой частей радиационного баланса. Представлена прикладная эмпирическая модель изменчивости компонент радиационного баланса земной поверхности. Построение

модели основывается на регрессионном анализе данных, полученных в ходе 60-летних измерений в метеорологической обсерватории (МО МГУ) радиационных и метеорологических параметров атмосферы и земной поверхности. Материал представлен в виде совокупности регрессионных зависимостей коротковолновых и длинноволновых потоков радиации от основных факторов: продолжительности солнечного сияния, высоты Солнца, условий облачности, влагосодержания атмосферы, прозрачности атмосферы, состояния подстилающей поверхности, ее температуры и альбедо. Количественные зависимости между элементами получены по данным измерений за различные отрезки времени в период наблюдений 1958–2013 гг.

Валидация модели проведена путем прямого сравнения получаемых результатов с данными независимых измерений в период 2014–2018 гг. и данными радиационной модели. Предложенные эмпирические уравнения позволят проводить вычисления радиационных характеристик атмосферы на основе сетевых метеорологических и актинометрических данных. Точность результатов, полученных по уравнениям, количественно связывающих между собой радиационные характеристики атмосферы, сравнима с точностью измерения радиационных потоков. Точность количественных зависимостей компонент радиационного баланса от метеорологических величин снижается.

Представленная работа является обобщением результатов по систематизации актинометрических наблюдений МО МГУ, начатых совместно с Галиной Михайловной Абакумовой и Ольгой Александровной Шиловцевой, безвременно ушедшими из жизни в 2017 году.

Development and validation of an empirical model to estimate temporal variations of radiation balance components at the Earth surface

E.V. Gorbarenko (catgor@mail.ru), N.A. Bunina

M.V. Lomonosov Moscow State University, 1 Leninsky gory, 119992 Moscow, Russia

The assessment of the radiation balance of the atmosphere-underlying surface system, its main components depending on the factors determining their variability in the real atmosphere, is necessary for creating reliable parametrizations of radiation processes in models of weather and climate forecast. Based on the analysis of the radiation climate in Moscow, an assessment of the significance of the factors determining changes in the shortwave and longwave parts of the radiation balance is given. An applied empirical model of variability of the components of the earth's radiation balance is presented. The construction of the model is based on a regression analysis of data obtained during 60 years of measurements of the radiation and meteorological parameters of the atmosphere and the Earth's surface at the Moscow State University. The material is presented in the form of a set of regression dependencies of short-wave and long-wave radiation fluxes on the main factors: the duration of sunshine, the height of the sun, cloudiness conditions, moisture content of the atmosphere, transparency of the atmosphere, the underlying surface state, its temperature and albedo. Quantitative dependencies between elements were obtained from measurements for different periods of time during the observation period 1958–2013.

Validation of the model was carried out by direct comparison of the obtained results with data from independent measurements in the period 2014–2018 and a radiation model. The proposed empirical equations will allow calculations of atmospheric radiation characteristics based on network meteorological and actinometric data. The accuracy of the results obtained by equations that quantitatively relate the atmospheric radiation characteristics to each other is comparable to the accuracy of measuring radiation fluxes. The accuracy of the quantitative dependences of the components of the radiation balance on meteorological quantities decreases.

The presented work is a generalization of the results on the systematization of the actinometric observations of the Moscow State University MO initiated together with Galina Abakumova and Olga Shilovtseva who died untimely in 2017.

Динамика прозрачности атмосферы в Европе, 1906–2018

Горбаренко Е.В.¹ (catgor@mail.ru), Охврил Х.², Окулов О.², Каттай К.², Нейман Л.²,
Руссак В.³, Йыевээр А.⁴, Каллис А.⁴, Охврил Т.⁵, Терез Э.И.⁶, Терез Г.А.⁶, Гушин Г.К.⁶,
Лаулайнен Н.⁷

¹Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, географ. факультет, Ленинские горы
1, 119991, Москва, Россия

²Тартуский университет, Тарту 50090, Эстония

³Тартуская обсерватория, Тыравере 61602, Эстония

⁴Агенство окружающей среды, Таллин 10616, Эстония

⁵Эстонский университет естественных наук, Тарту 51014, Эстония

⁶Крымская астрофизическая обсерватория РАН, Крым 298409, Россия

⁷Тихоокеанская северозападная национальная лаборатория, Ричланд, Вашингтон 99352, США

Многолетние изменения прозрачности толщи атмосферы, полученные на основании измерений прямой интегральной солнечной радиации, позволяют оценивать загруженность воздуха аэрозолями, образование радиационного режима и условий дистанционного зондирования. В данной работе одним из основных исследуемых параметров выбран Бугеровский интегральный коэффициент прозрачности атмосферы (p_2), приведенный к оптической массе атмосферы $m = 2$ (высота Солнца $\approx 30^\circ$). Существует два независимых метода приведения, разработанные соответственно Евневичем-Савиковским и Мюрком-Охврилем. Этот коэффициент является простым и ясным по своему физическому смыслу, а также даёт возможность перейти на другие параметры прозрачности и мутности атмосферы, в том числе на спектральную аэрозольную оптическую толщину (АОТ500, АОТ550). Как и в наших прошлых докладах (МСАРД-2009, -2011, -2013, -2015, -2017) мы представим многолетние ряды p_2 для трёх различных европейских климатических зон: 1) Ленинградская область и Эстония и (Павловск, Воейково, Тарту-Тыравере, Тийрикоя); 2) Москва (МО МГУ); 3) Крым (Карадаг). В общей сложности эти ряды покрывают 113 лет, 1906–2018.

Выделяются следующие закономерности:

1. Заметное уменьшение прозрачности после крупных вулканических извержений и возвращение к прежнему уровню прозрачности, происходящее в течение двух-трех лет.

2. Высокие значения прозрачности, наблюдавшиеся в начале 20 века, в довоенное время и с начала конца 20 века.

3. Почти 40-летний падающий тренд прозрачности, 1945–1983/1984, т.н. *период потемнения*.

4. Сильное уменьшение прозрачности, особенно в Москве, происходящее из-за местных летних лесных и торфяных пожаров (1972, 2002, 2006, 2010).

5. Период начиная с 1984/1985 можно назвать периодом *осветления*, который был прерван извержением вулкана Пинатубо (1991). Послепинатубовский период, 1994–2016, характеризуется очень высокой прозрачностью толщи атмосферы. Улучшение прозрачности атмосферы произошло за счёт уменьшения аэрозольного загрязнения. Причиной уменьшения аэрозольной нагрузки является как отсутствие крупных вулканических извержений, начиная с 1992 г., так и уменьшение антропогенного загрязнения воздуха за счёт улучшения технологий, перемещения производства из Западной Европы в Азию и за счёт спада экономики в Восточной Европе в ходе крупных структурных политико-экономических реформ начиная с конца 1980 гг.

6. В послепинатубовские годы (1994–2016) в сезонных ходах коэффициента p_2 произошли следующие изменения: а) в Москве усилился прозрачности в июне, причина – изменение розы ветров; б) на Карадаге минимум летней (а значит и годовой) прозрачности сдвинул с июля на август.

С сожалением следует отметить, что по разным причинам многолетний временной ряд прозрачности на Карадаге завершается с 2014 годом, в Тийрикоя с 2015 годом.

The dynamics of atmospheric transparency in Europe, 1906–2018

E.V. Gorbarenko¹ (catgor@mail.ru), X. Okhvril², O. Okulov², K. Kattai², L. Neiman², B. Russak³, A. Yyveer⁴, A. Kallis⁴, T. Okhvril⁵, E.I. Terez⁶, G.A. Terez⁶, G.K. Guschin⁶, N. Laulinen⁷

¹*M.V. Lomonosov Moscow State University, Geography Faculty, 1 Leninsky Gory, 119991 Moscow, Russia*

²*Tartu University, Tartu 50090, Estonia*

³*Tartu Observatory, Tõravere 61602, Estonia*

⁴*Environment Agency, Tallinn 10616, Estonia*

⁵*Estonian University of Life Sciences, Tartu 51014, Estonia*

⁶*Crimean Astrophysical Observatory of the Russian Academy of Sciences, Crimea 298409, Russia*

⁷*Pacific Northwest National Laboratory, Richland, Washington 99352, USA*

The long-term changes in the transparency of the atmospheric thickness, obtained from measurements of direct integral solar radiation, make it possible to estimate the load of air by aerosols, the formation of a radiation regime, and remote sensing conditions. In this work, one of the main parameters studied is the Bougerov integral transparency coefficient of the atmosphere (p_2), reduced to the optical mass of the atmosphere $m = 2$ (height of the Sun 30°). There are two independent reduction methods developed, respectively, by Evnevich-Savikovsky and Mürk-Ochvril. This coefficient is simple and clear in its physical meaning, and also makes it possible to switch to other parameters of transparency and turbidity of the atmosphere, including the spectral aerosol optical thickness (AOT500, AOT550). As in our previous reports (ISARD-2009, -2011, -2013, -2015, -2017) we will present the long-term p_2 series for three different European climatic zones: 1) Leningrad Region and Estonia and (Pavlovsk, Voejkovo, Tartu-Tiravere, Tirikoia), 2) Moscow (Moscow State University), 3) Crimea (Karadag). In total, these series cover 113 years, 1906–2018.

The following patterns are highlighted:

1. A marked decrease in transparency after major volcanic eruptions. Return to the previous level of transparency occurs within two to three years.

2. High values of transparency were observed at the beginning of the 20th century, before the war and from the beginning of the end of the 20th century.

3. Almost 40-year-old falling trend of transparency, 1945–1983/1984, the so-called period of darkening.

4. A strong decrease in transparency, especially in Moscow, is due to local summer forest and peat fires (1972, 2002, 2006, 2010).

5. The period from 1984/1985 can be called the period of clarification, which was interrupted by the eruption of the Pinatubo volcano (1991). The post-pinatubo period, 1994–2016, is characterized by a very high transparency of the atmosphere. Improving the transparency of the atmosphere was due to the reduction of aerosol pollution. The reason for the decrease in aerosol load is both the absence of large volcanic eruptions since 1992, and the reduction of anthropogenic air pollution due to improved technology, production movement from Western Europe to Asia and due to economic decline in Eastern Europe during major structural political and economic reforms since the late 1980s.

6. In the post-pinatubo years (1994–2016), the following changes occurred in the seasonal variations of the p_2 coefficient: a) in Moscow, transparency increased in June, the reason being the change in the wind rose; b) at Karadag, at least the summer (and therefore annual) transparency is shifted from July to August.

It is with regret that it should be noted that, for various reasons, the long-term time series of transparency at Karadag ends in 2014, in Tiuricoy, in 2015.

Применение кибернетического подхода к оптимальному управлению климатом Земли посредством введения в стратосферу аэрозоля

Солдатенко С.А. (Soldatenko@iias.spb.su), Юсупов Р.М.

Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации РАН, 14 линия В.О. 39, 199178

Санкт-Петербург, Россия

Согласно Пятому оценочному докладу МГЭИК, с очень высокой вероятностью основной причиной глобального потепления, наблюдаемого с середины 20-го века, является антропогенное воздействие. Технология климатического инжиниринга, известная как управление солнечной радиацией (английская аббревиатура SRM – Solar Radiation Management) посредством введения в стратосферу мелкодисперсного аэрозоля, способного отражать солнечную радиацию, считается наиболее рациональным и технически реализуемым решением для снижения скорости роста температуры в глобальном и региональном масштабах. Инжектирование аэрозолей, обладающих отражающими свойствами, в стратосферу (или газов-предшественников сульфатного аэрозоля, таких как диоксид серы SO_2 или сероводород H_2S , которые затем трансформируются в стратосферные аэрозоли в соотношении 1:4), имеет целью достижение некоторого значения температуры в будущем, заданного, например, в соответствии с Парижским соглашением по климату 2015 года. Реализация SRM-проектов предполагает наличие у исполнителей не только необходимого количества подходящего аэрозоля, но, кроме этого, различного рода ресурсов (финансовых, людских, технических и др.). Формально, задача проектирования SRM-операций состоит в том, чтобы обосновать (сформулировать) такой сценарий введения аэрозолей в стратосферу, который обеспечит достижение целевого значения температуры в заданный момент времени (например, в 2100 г.) при минимальном расходе аэрозоля и иных ресурсов. Под сценарием реализации SRM-проекта мы понимаем скорость введения аэрозолей в стратосферу как функцию времени. Данная задача не является тривиальной и математически представляет собой оптимизационную задачу с ограничениями на фазовые координаты и управляющие параметры модели.

Для ее решения нами предложен подход, основанный на идеях и концепциях геофизической кибернетики – нового научного направления, основы которого были заложены авторами в последней четверти прошлого столетия. Если представить земной климат как саморегулируемую кибернетическую систему, то тогда задачу стабилизации климата Земли можно рассмотреть в рамках геофизической кибернетики и применить для ее решения методы теории оптимального управления. В этом контексте цель SRM-операций формулируется в терминах следующей экстремальной задачи: найти экстремум заданного показателя качества процесса управления при наличии фазовых и параметрических ограничений на систему. Для иллюстрации метода нами разработана двухслойная энерго-балансовая климатическая модель и на ее основе сформулирована и решена задача оптимального управления, цель которой состоит в нахождении оптимального сценария эмиссии аэрозолей в стратосферу. При этом для описания временной динамики атмосферных концентраций парниковых газов используются одобренные МГЭИК "Representative Concentration Pathways". Оптимальные решения получены для периода 2020–2100 гг. и могут служить основой для разработки сценариев SRM-операций, эффективность которых может быть оценена с помощью совместных моделей системы "атмосфера-океан-биосфера".

Application of cybernetic concepts to optimal climate control via stratospheric aerosol injection

S.A. Soldatenko (Soldatenko@iias.spb.su), R.M. Yusupov

Institute for Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences, 14th Line 39, Saint-Petersburg, 199178 Russia

According to the IPCC Fifth Assessment report, the dominant cause of the observed global warming since the mid-20th century is (extremely likely) a human influence. Climate engineering technology known as a solar radiation management (SRM) via stratospheric aerosol injection is considered as the most feasible solution to decrease the rate of temperature growth globally and regionally. Injecting aerosols with reflective properties into the stratosphere (precursor sulphide gases such as sulphur dioxide SO_2 or hydrogen sulphide H_2S which then converted into the stratospheric aerosols in the ratio 1:4) aims to achieve the prescribed target temperature in the future. Realization of SRM projects requires not only the necessary amount of aerosols but also resources of various kinds (e.g. aircrafts or other aerosol's delivery system, different equipment, human resources etc.). In general, the problem in question is as follows: what should be the aerosol emission rate as a function of time (the emission scenario) in order to achieve the target temperature and, at the same time, minimize the aerosol consumption. In addition, required resources must satisfy specific constraints. This problem is not trivial.

To design the SRM projects and define the aerosol emission rate that allows us to achieve the target temperature we suggest, using the ideas and concepts of geophysical cybernetics, a new scientific area developed by the authors. Examining the Earth's global climate as controlled dynamical system, we can consider SRM projects within the framework of geophysical cybernetics by using methods of the optimal control theory. In this context the goal of SRM is formulated in terms of extremal problem, which entails finding control parameters (or control functions) as well as the corresponding state variables of climate system that minimize or maximize a given objective function subject to a number of constraints. To illustrate the suggested method, we developed a two-layer energy balance climate model and then applied this model to solve the optimal control problem the goal of which is to find the optimal aerosol emission rate scenario for all Representative Concentration Pathways used to specify the corresponding radiative forcings. The results were obtained for the period of 2020–2100. The optimal solutions calculated by the proposed approach represent the basis for developing SRM scenarios to simulate and predict the consequences of climate engineering operations using coupled atmosphere-ocean general circulation models.

Влияние общего содержания озона, облачности и аэрозольной оптической толщи на изменение суточных сумм УФ-В радиации по данным многолетних измерений в Томске

Складнева Т.К. (Tatyana@iao.ru), Белан Б.Д., Ивлев Г.А.

Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, пл. Ак. Зueva 1, 634055 Томск, Россия

Данные о многолетних вариациях УФ-радиации очень важны для определения ее кумулятивного действия на атмосферные процессы. В настоящее время более чем в 200 пунктах, расположенных по всему миру, осуществляется мониторинг солнечной радиации в области спектра УФ-В. В России такой мониторинг осуществляется всего на нескольких станциях. Одной из них является ТОР-станция ИОА СО РАН (56°28' с.ш., 85°03' в.д.), расположенная в Академгородке города Томска [1]. Наблюдения УФ-В радиации на ней ведутся с 2002 года. Измерения осуществляются ультрафиолетовым пиранометром UVB-1 (Yankee Environmental Systems, Inc., США) в диапазоне длин волн 280–320 нм.

В докладе анализируется взаимосвязь значений приземной ультрафиолетовой радиации с факторами, присутствующими в атмосфере Земли. Для этого используются следующие исходные данные:

- многолетний ряд наблюдений ультрафиолетовой (В) радиации на TOR-станции ИОА СО РАН за 2003–2016 гг.;
- данные общего содержания озона (ОСО), аэрозольной оптической толщи на длине волны 500 нм (АОТ), полученные при спутниковых наблюдениях прибором AIRS (Atmospheric Infrared Sounder) и аэрозольных измерениях солнечным фотометром в Томске (программа Aerosol Robotic Network – AERONET);
- синоптическая база данных, содержащая ежечасную информацию о количестве общей и нижней облачности, форме облаков.

В связи с тем, что суточное поступление УФ-В радиации имеет ярко выраженный годовой ход с максимумом в летний период и минимумом зимой, для исключения его влияния рассчитывались отклонения суточных сумм УФ-В радиации для каждого дня от средних многолетних значений за рассматриваемый период. Полученный результат нормировался на средние многолетние значения для данного дня времени года. Таким образом, было получено два многолетних ряда (2003–2016 гг.) дневных отклонений УФ-В радиации и ОСО.

Сделаны оценки совместного влияния облачности и АОТ на суточное поступление УФ-В радиации при изменении ОСО. Для этого из всего массива данных было сформировано несколько массивов данных, отсортированных по признаку наличия того или иного балла облачности в светлое время суток. Показано, что в условиях прозрачной атмосферы с облачностью до 6 баллов приращение дневных сумм УФ-В радиации, в случае уменьшения ОСО, на 30% выше среднего многолетнего значения, а без учёта АОТ – на 23%.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 17-17-01095 «Исследование динамики состава воздуха и процессов ее определяющих в Сибирском регионе в условиях изменяющегося климата».

1. Давыдов Д.К., Белан Б.Д., Антохин П.Н. et al. Мониторинг атмосферных параметров: 25 лет TOR-станции ИОА СО РАН // Оптика атмосферы и океана. 2018. Т. 31, No 10. С. 845–853.

The effect of total ozone, cloudiness and aerosol optical thickness on the change in daily amounts of UV-B radiation according to long-term measurements in Tomsk

T.K. Sklyadneva (Tatyana@iao.ru), B.D. Belan, G.A. Ivlev
V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics SB RAS, 1 Ac. Zuev sq., 634055 Tomsk, Russia

Data on long-term variations in UV radiation are very important for determining its cumulative effect on atmospheric processes. Monitoring of solar radiation in the UV-B spectrum is currently carried out in more than 200 locations around the world. Such monitoring in Russia is carried out at only a few stations. One of them is the TOR-station of the IAO SB RAS (56°28' N, 85°03' E), located in the Akademgorodok of the city of Tomsk [1]. Observations of UV-B radiation at the TOR-station have been conducted since 2002. Measurements are carried out with a UVB-1 ultraviolet pyranometer (Yankee Environmental Systems, Inc., USA) in the 280–320 nm wavelength range.

The report analyzes the relationship of values of the surface ultraviolet radiation with total ozone, cloudiness and aerosol optical thickness. For this we used the following initial data:

- long-term series of observations of ultraviolet (B) radiation at the TOR station of the IAO SB RAS for 2003–2016;
- data on total ozone content (TOC), aerosol optical thickness ($\lambda = 500$ nm) (АОТ) obtained by satellite observations with the AIRS (Atmospheric Infrared Sounder) and aerosol measurements with a solar photometer in Tomsk (Aerosol Robotic Network program – AERONET);
- a synoptic database containing hourly information on the amount of total and lower cloudiness, the shape of clouds.

The UV-B radiation has a pronounced annual variation with a maximum in summer and a minimum in winter. Therefore, in order to exclude the effect of the annual variation, the deviations of the daily amounts of UV-B radiation for each day from the mean multiyear values for the period in question were calculated. The result obtained was normalized to the average long-term values for a given day of the season. Thus, two long-term series (2003–2016) of daytime deviations of UV-B radiation and TOC were obtained.

The joint effect of cloudiness and AOT on the daily intake of UV-B radiation as a result of the TOC was estimated. For this purpose, several data arrays were formed from the entire data array, sorted by the sign of the presence of one or other units of cloudiness during daylight hours. It is shown that in a transparent atmosphere with cloudiness up to 6 units, the increment of the daytime sum of UV-B radiation, in case of a decrease in TOC, is 30% higher than the average multi-year value, and excluding AOT – by 23%.

This work was supported by RSF, grant No 17-17-01095.

1. Davydov D.K., B.D. Belan, P.N. Antokhin et al. Monitoring of atmospheric parameters: 25 years of observations at the TOR station of IAO SB RAS // *Atm. Ocean. Optics*. 2019. V. 32, No 2. P. 180–192.

СЕКЦИЯ 6. "НАТУРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РАДИАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК АТМОСФЕРЫ и ПОВЕРХНОСТИ"

Председатель: проф. Г.Г. Шукин (ВКА, СПб, Россия)

Сопредседатель: д.ф.-м.н. П.М. Нагорский (ИМКЭС РАН, Томск, Россия),
к.ф.-м.н. В.М. Осипов (НИИ ОЭП, Сосновый Бор, Россия)

SESSION 6. "FIELD STUDIES of RADIATIVE CHARACTERISTICS of ATMOSPHERE and SURFACE"

Chairman: Prof. G.G. Shchukin (Military Aerospace Academy, SPb, Russia)

Co-chairman: Prof. P.M. Nagorsky (IMCES RAS, Tomsk, Russia), Dr. V.M. Osipov (NII OEP,
Sosnovy Bor, Russia)

Городской аэрозоль и его радиационное воздействие по данным эксперимента AERORADCITY и данным аэрозольного моделирования с использованием модели COSMO-ART в Московском мегаполисе

Чубарова Н.¹ (natalia.chubarova@gmail.com), Андросова Е.¹, Вольперт Е.¹,
Кирсанов А.², Еремина И.¹, Поповичева О.¹, Иванов А.¹, Ривин Г.^{2,1}, Шалыгина И.²
¹Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, географ. факультет, Ленинские горы
1, 119991, Москва, Россия

²Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации, Б. Предтеченский
пер. 11-13, 123242 Москва, Россия

Представлены результаты исследования аэрозольных свойств атмосферы и его радиационных эффектов в городской среде московского мегаполиса в период проведения комплексного эксперимента AeroRadCity весной 2018 г. в метеорологической обсерватории (МО) МГУ. Комплекс наблюдений включал измерения аэрозольных свойств в столбе атмосферы по данным AERONET, а также приземные измерения черного углерода (BC), концентрации взвешенных частиц диаметром менее 10 мкм (PM10) и различных газов – предшественников аэрозоля. Дополнительно использовался комплекс радиационных измерений МО МГУ.

Характеристики интенсивности рассеивания примесей использовались для оценки взаимосвязи между аэрозольными измерениями в столбе атмосферы и его приземной концентрацией. Проанализированы изменения BC и BC/PM10 за период эксперимента. Особое внимание уделялось анализу влияния BC на альbedo однократного рассеяния аэрозоля и на его радиационные эффекты. Обнаружены высокие корреляции между PM10 и оксидами азота, что, возможно, указывает на активное формирование нитратного аэрозоля в атмосфере Москвы. Анализ радиационного эффекта аэрозоля показал, что его наименьшие (по абсолютной величине) значения на верхней границе атмосферы достигали – $3 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}$ в условиях арктической адвекции воздуха и очень малой оптической толщины аэрозоля. Средний аэрозольный радиационный эффект в период эксперимента составил около – $15 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}$.

Одновременно проводились модельные аэрозольные эксперименты с использованием химико-транспортной модели COSMO-ART с шагом сетки 7 км. Это позволило выделить антропогенную компоненту аэрозольного загрязнения в городской среде. Проведены сравнения модельных расчетов с результатами измерений аэрозольных оптических толщин и PM10 в городских и фоновых условиях. Особое внимание уделено анализу динамики аэрозольных концентраций в период выпадения осадков. Выявлено значимое уменьшение концентраций PM10. Изменений в концентрации черного углерода при этом не отмечено. Показано более эффективное удаление аэрозолей из атмосферы в нерастворимой форме по сравнению с удалением их в виде растворов.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, грант № 18-17-00149.

Urban aerosol and its radiative effects according to the AeroRadCity experiment and aerosol data simulation using the COSMO-ART model in Moscow megalopolis

N. Chubarova¹, E. Androsova¹, E. Volpert¹, A. Kirsanov², I. Eremina¹, O. Popovicheva¹,
A. Ivanov¹, G. Rivin^{2,1}, I. Shalygina²

¹*M.V. Lomonosov Moscow State University, Geography Faculty, 1 Leninsky Gory, 119991 Moscow, Russia*

³*Hydrometeorological Research Center of Russia, 11-13 B. Predtechensky per., 123242 Moscow, Russia*

We present the analysis of aerosol properties of the atmosphere and their radiation effects in the urban environment of the Moscow megalopolis during the complex AeroRadCity experiment in the spring of 2018 at the meteorological Observatory of Moscow State University (MO MSU). The set of observations included the measurements of aerosol properties in the atmospheric column according to the AERONET, as well as surface measurements of black carbon (BC), the concentration of aerosol particles with a diameter of less than 10 μm (PM10) and various aerosol precursor gases. In addition, we used the MO MSU set of radiative measurements.

The characteristics of the intensity of pollutant dispersion (IPD) were used to estimate the relationship between aerosol measurements in the atmospheric column and its surface concentration. Changes in BC and BC/PM10 during the experiment were also analyzed. Special attention was paid to the analysis of the influence of BC on the aerosol single scattering albedo and its radiation effects. High correlations between PM10 and nitrogen oxides were found, which may indicate the active formation of nitrate aerosol in the atmosphere of Moscow. Analysis of the aerosol radiative effect showed that the smallest (in absolute units) values at the top of the atmosphere reached $-3 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ during the Arctic air advection with a very small aerosol optical depth. The average aerosol radiative effect during the period of the experiment was about $-15 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$.

Over the same period model aerosol experiments were carried out using the chemical transport COSMO-ART model with 7 km grid step. These simulations enabled us to identify an anthropogenic component of aerosol pollution in the urban environment. Model calculations were compared with measurements of aerosol optical thicknesses and PM10 concentrations in urban and background conditions. Particular attention was paid to the analysis of aerosol concentration dynamics during the precipitation periods, which revealed a significant decrease in PM10 concentrations, and showed no change in black carbon concentration. More effective removal of aerosols from the atmosphere in an insoluble form was shown compared with that in the soluble form.

The work was supported by the Russian Science Foundation, grant № 18-17-00149.

Статистические модели пространственной структуры энергетической яркости облачности различных типов в диапазоне 1.5–2 мкм

Якименко И.В. (Jakigor@rambler.ru), Якименко Ю.И., Жендарев М.В., Найдёнов Е.В.,
Мищенко А.М., Смолин В.А., Рассказа Д.С., Астахов С.П., Корниенко К.Ю.,
Рябина Е.А.

Филиал Национального исследовательского университета «МЭИ» в г. Смоленске; Энергетический проезд 1, 214013 Смоленск, Россия

Представлены статистические модели пространственной структуры энергетической яркости перистой (Ci), перисто-слоистой (Cs), перисто-кучевой (Cc), высококучевой (Ac), слоистой (St), кучевой (Cu), слоисто-кучевой (Sc) и слоисто-дождевой (Ns) облачности в диапазоне 1.5–2 мкм, полученные по результатам экспериментальных наземных исследований, проведенных в г. Смоленске в период с марта по май 2017 года. Экспериментальные наземные исследования проводились в интересах решения прикладной задачи обнаружения малоразмерных объектов оптико-электронными средствами

обнаружения, работающими в диапазоне 1.5–2 мкм, в соответствии с оригинальной методикой, основанной на получении двумерного распределения энергетической яркости участков небосвода, характеризующихся угловыми размерами: $\varepsilon_{\min} = 10^\circ$; $\varepsilon_{\max} = 40^\circ$; $\beta = 40^\circ$. Аппаратное обеспечение экспериментальных наземных исследований было решено за счет использования оригинального измерительно-вычислительного комплекса, состоящего из: радиометра на диапазон 1.5–2 мкм, с полем зрения 24'; программируемого блока сканирования оптической осью радиометра; устройства записи и хранения информации и обеспечивающего получение двумерного массива, каждый элемент которого содержит информацию об уровне энергетической яркости излучения элементарного участка небосвода. Для построения статистических моделей пространственной структуры энергетической яркости, представляющих собой средние значения, дисперсии и среднеквадратические отклонения энергетической яркости облачности, для каждого из типов облачности получены не менее чем 80 реализаций двумерного распределения энергетической яркости участков небосвода в заданных угловых размерах.

Анализ полученных статистических моделей пространственной структуры энергетической яркости облачности в диапазоне 1.5–2 мкм показал, что:

- все типы облачности, относящиеся к облачности нижнего яруса характеризуются меньшей энергетической яркостью по сравнению с облачностью верхних ярусов (при одинаковых условиях наблюдения) ввиду преобладания количества гидрометеоров, находящихся в жидкой фазе;

- с уменьшением угла места наблюдения энергетическая яркость облачности уменьшается, что обусловлено влиянием процессов затухания и рассеяния излучения в атмосфере с увеличением дистанции трассы наблюдения;

- исследованные типы облачности можно разделить на две группы в зависимости от размера неоднородностей: а) в первую группу входят типы облачности, содержащие относительно мелкомасштабные неоднородности (с угловыми размерами порядка 5° – 15°) – кучевая (Cu), высококучевая (Ac), перисто-кучевая (Cc), перистая (Ci); б) во вторую группу входят типы облачности, содержащие крупномасштабные неоднородности, угловой размер которых (как правило – более 30°) сопоставим с размерами исследованных участков небосвода (или превышает их), а именно – слоистая (St), слоисто-дождевая (Ns), слоисто-кучевая (Sc), перисто-слоистая (Cs).

Statistical models of the radiance spatial structure of clouds of different types in the 1.5–2 μm range

I.V. Yakimenko (Jakigor@rambler.ru), Yu.I. Yakimenko, M.V. Zhendarev, E.V. Najdyonov, A.M. Mishchenko, V.A. Smolin, D.S. Rasskaza, S.P. Astahov, K.Yu. Kornienko, E.A. Ryabinina
Smolensk Branch of National Research University "MPEI", 1 Energeticheskoy proezd, 214013 Smolensk, Russia

The statistical models of the radiance spatial structure of the cirrus (Ci), the cirrus-stratified (Cs), the cirrocumulus (Cc), the high-fused (Ac), the stratified (St), the cumulus (Cu), the stratocumulus (Sc), and the layered-rain (Ns) cloudiness in the range of 1.5–2 μm , obtained from the results of experimental ground-based studies conducted in the city of Smolensk, in the period from March to May 2017. Experimental ground studies were carried out in the interests of solving the applied problem of detecting small-sized objects by optical-electronic detection tools operating in the range of 1.5–2 μm , in accordance with the original method based on obtaining the two-dimensional distribution of the radiance of the sky sections, characterized by angular dimensions: $\varepsilon_{\min} = 10^\circ$; $\varepsilon_{\max} = 40^\circ$; $\beta = 40^\circ$. The hardware of the experimental ground research was decided through the use of the original measuring and computing complex consisting of: a radiometer for the range of 1.5–2 μm , with a field of view of 24'; the programmable unit scanning by the optical axis of the radiometer; devices for recording and storing the information and providing a two-dimensional array, each element of which contains the information on the radiance level of an elementary sky section. For constructing statistical models of the radiance spatial structure,

representing mean values, dispersions and standard deviations of the cloud radiance, for each of the types of clouds, no less than 80 realizations of the two-dimensional radiance distribution of the sky sections in specified angular sizes were obtained.

Analysis of the obtained statistical models of the spatial structure of the cloud radiance in the range of 1.5–2 μm has shown that:

- all types of cloudiness related to lower tier cloudiness are characterized by lower radiance compared to the cloudiness of the upper tiers (under the same observation conditions), due to the predominance of the number of hydrometeors in the liquid phase;

- with decreasing the observation angle, the cloud radiance decreases, that is due to the influence of attenuation and scattering of radiation in the atmosphere with increasing distance of the observation path;

- the studied types of clouds can be divided into two groups depending on the size of inhomogeneities: a) the first group includes clouds with relatively small-scale inhomogeneities (with angular dimensions of the order of 5°–15°) – cumulus (Cu), altocumulus (Ac), pinnacular (Cc), cirrus (Ci); b) the second group includes types of clouds that contain large-scale heterogeneity, the angular size of which (usually more than 30°) is comparable to the size of the investigated areas of the sky (or exceeds them) – layered (St), layered rain (Ns), stratocumulus (Sc), pinnate (Cs).

Особенности влияния метеорологических и динамических процессов на внутрисуточную изменчивость концентраций газовых составляющих атмосферы в регионе оз. Байкал

Цыдыпов В.В. (tsydygov@inbox.ru), Заяханов А.С., Жамсуева Г.С., Дементьева А.Л.,
Бальжанов Т.С., Стариков А.В., Сунграпова И.П.

Институт физического материаловедения СО РАН, ул. Сахьяновой 6, 670047 Улан-Удэ, Россия

Важным фактором, определяющим структуру и динамику метеорологических процессов в регионе оз. Байкал, являются местные циркуляции – бризовые, горно-долинные. Они в значительной мере обуславливают перенос и рассеяние атмосферных примесей. На Байкале в летнее время наиболее заметно проявляется бризовая циркуляция в береговой зоне озера, когда наблюдается максимальный приход тепла от солнца днем и длинноволнового излучения с подстилающей поверхности ночью.

В работе приведены результаты экспериментальных исследований суточной динамики приземного озона, окислов азота, диоксида серы, метеорологических и турбулентных характеристик атмосферы на разных высотных уровнях с использованием 30-метровой метеорологической мачты. Измерения проводились на юго-восточном побережье оз. Байкал в летний период 2016–2018 гг. на научном стационаре «Боярский» Института физического материаловедения СО РАН. Проведен сравнительный анализ влияния бризовых явлений на временную изменчивость малых газовых примесей, таких как озон, диоксид серы, окислы азота. Обнаружено существенное влияние температурных инверсий, турбулентных характеристик на условия трансформации, переноса и разрушения приземного озона, особенно вблизи подстилающей земной поверхности. Выявлены особенности высотного распределения озона и других малых газовых примесей.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 18-45-030032 p_a).

Features of the influence of meteorological and dynamic processes on the intra-day variability of concentrations of the gas components of the atmosphere in the Baikal region

V.V. Tsydypov (tsydypov@inbox.ru), A.S. Zayakhanov, G.S. Zhamsueva, A.L. Dementeva,
T.S. Balzhanov, A.V. Starikov, I.P. Sungrapova

Institute of Physical Materials Science SB RAS, Russia, 6 str. Sakhyanovoy, 670047 Ulan-Ude, Russia

In the Baikal region an important factor determining the structure and dynamics of meteorological processes are local circulations such as breeze and mountain-valley. They largely determine the transfer and scattering of atmospheric impurities. In summertime, the breeze circulation in the coastal zone of the lake is most noticeable at Baikal, when there is a maximum heat flux from the sun during the daytime and long-wave radiation from the underlying surface at night.

The paper presents the results of experimental studies of the daily dynamics of surface ozone, nitrogen oxides, sulfur dioxide, meteorological and turbulent characteristics of the atmosphere at different altitude levels using a 30-meter meteorological mast. The measurements were carried out on the southeast coast of Lake Baikal in the summer period of 2016–2018 at the scientific station Boyarskiy. It is station of the Institute of Physical Materials Science of the SB RAS. A comparative analysis of the influence of breeze on the temporal variability of small gas impurities, such as ozone, sulfur dioxide, and oxides of nitrogen was carried out. The significant influence of temperature inversions, turbulent characteristics on the conditions of transformation, transfer and destruction of surface ozone, especially near the underlying earth's surface was found. The features of high-altitude distribution of ozone and other small gas impurities are revealed.

The work has supported by the Russian Fundamental Investigations Foundation (project 18-45-030032 r_a).

Высотное распределение концентраций озона и других малых газовых составляющих в приземном слое атмосферы оз. Байкал

Бальжанов Т.С. (tbalzhanov@gmail.com), Заяханов А.С., Жамсуева Г.С., Цыдыпов В.В.

Институт физического материаловедения СО РАН, ул. Сахьяновой 6, 670047 Улан-Удэ, Россия

В работе представлены результаты измерений приземной концентрации озона, окислов азота вблизи береговой зоны оз. Байкал в 2018 г. Бризовая циркуляция на Байкале наиболее заметно проявляется в береговой зоне озера в летнее время, когда наблюдается максимальный приход тепла от солнца днем и длинноволнового излучения от подстилающей поверхности ночью. По радиационному показателю развитие бризовой циркуляции на юге Байкала возможно даже в апреле: радиационный показатель на склонах южной экспозиции равен 0.86–0.93. Однако весной дней благоприятных для возникновения местных циркуляций значительно меньше, чем в летние месяцы.

Проведен сравнительный анализ влияния бризовых явлений на временную изменчивость малых газовых примесей, таких как озон, диоксид серы, окислы азота, в разные сезоны года. Выявлены некоторые особенности структуры и динамики метеорологических процессов в приземном слое атмосферы в береговой зоне оз. Байкал, влияющих на высотный профиль приземного озона и его суточные вариации. Основное внимание будет уделено влиянию динамических факторов на суточную изменчивость приземного озона, а именно бризовых циркуляций. Структура и динамика метеорологических процессов в приземном слое атмосферы вблизи границы «вода–суша» также имеет специфические особенности, связанные с резкими температурными градиентами в этой области, приводящими к формированию температурных инверсий, восходящих и нисходящих потоков в приземном слое атмосферы, по разному влияющих на высотный профиль приземной концентрации озона. Эти явления должны проявляться не

только в метеорологических характеристиках, но и в динамике приземной концентрации озона вблизи береговой зоны оз. Байкал. Существенные различия наблюдаются в суточных вариациях озона в приповерхностном слое 2 м и в приземном слое на высоте 20 м, где влияние подстилающей поверхности заметно снижается. Суточный ход озона на высотах, удаленных от земли (20 м) более сглаженный, чем у поверхности земли (2 м). Наибольшие расхождения наблюдаются в вечерние, ночные часы. В дневное время с ростом температуры и с усилением турбулентных процессов в приземном слое атмосферы концентрации озона на разных высотах выравниваются. В весенние месяцы концентрации озона в среднем выше, чем летом.

Работа выполнена в рамках госзадания №0336-2019-0007, часть работ по проведению измерений микродисперсного аэрозоля проведена при частичной финансовой поддержке РФФИ (грант № 18-35-00143 мол_а).

The altitude distribution of concentrations of ground-level ozone and other minor gas components of the atmosphere in the surface layer of Lake Baikal

T.S. Balzhanov (tbalzhanov@gmail.com), A.S. Zayakhanov, G.S. Zhamsueva,
V.V. Tsydypov

Institute of Physical Materials of Science SB RAS, 6 Sakhyanovoy str., 670047 Ulan-Ude, Russia

The paper presents the results of measurements of the near-surface concentration of ozone, nitrogen oxides near the coastal zone of Lake Baikal in 2018. The breeze circulation on Baikal is most pronounced in the coastal zone of the lake in the summer, when there is a maximum influx of heat from the sun during the day and long-wave radiation from the underlying surface at night. According to the radiation indicator, the development of breeze circulation in the south of Baikal is possible even in April: the radiation indicator on the slopes of the southern exposure is 0.86–0.93. However, the days favorable for the occurrence of local circulations are significantly less in spring than in the summer months.

A comparative analysis of the effect of breeze phenomena on the temporal variability of small gas impurities, such as ozone, sulfur dioxide, and nitrogen oxides in different seasons of the year, has been carried out. Some features of the structure and dynamics of meteorological processes in the surface layer of the atmosphere in the coastal zone of Baikal, affecting on the altitude profile of ground-level ozone and its daily variations, are revealed. The focus will be on the influence of dynamic factors on the daily variability of ground-level ozone, namely the breeze circulations. The structure and dynamics of meteorological processes in the atmospheric surface layer near the water-land border also have specific features associated with sharp temperature gradients in this area, leading to the formation of temperature inversions, upstream and downstream in the surface layer affecting in different ways on the altitude profile of surface ozone concentration. These phenomena should manifest themselves not only in meteorological characteristics, but also in the dynamics of the surface concentration of ozone near the coastal zone of Baikal. Significant differences are observed in the diurnal variations of ozone in the surface layer of 2 m and in the layer at the height of 20 m, where the influence of the underlying surface is markedly reduced. The diurnal variation of ozone at the height of 20 m is smoother than at the earth surface (2 m). The biggest differences are observed in the evening, night hours. In the daytime, with increasing temperature and turbulent processes in the surface layer of the atmosphere, ozone concentrations at different altitudes equalize. In the spring months, ozone concentrations are on average higher than in summer.

The work was supported by the state assignment №0336-2019-0007, part of the work on the measurement of ultrafine aerosol was partly supported by the Russian Foundation for Basic Research (grant no. № 18-35-00143 - mol_а).

Совместная регистрация световой и электромагнитной компоненты молниевых разрядов

Маркин П.Д (ikiran@mail.ru)

*Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н.Л. Духова, Суцеская ул. 22,
127055 Москва, Россия*

В настоящее время в ряде задач обнаружения импульсных высокоэнергетических явлений на поверхности Земли и в атмосфере широко используются устройства, основанные на оптических системах наблюдения. При этом в используемых методиках становится актуальной задача селекции (разделения) полезного сигнала и импульсных помех природного и техногенного характера. Среди помех природного происхождения наиболее интенсивным источником импульсных оптических сигналов, сопровождающихся электромагнитным излучением, являются грозовые разряды в атмосфере. Генерируемые ими световые и электромагнитные (СИ и ЭМИ) импульсы имеют сложную природу, не позволяющую однозначно соотнести их форму с какой-либо определенной математической моделью. В этих условиях эффективным методом селекции является параметрический метод, основанный на статистических характеристиках параметров сигналов. Для его реализации необходимо располагать репрезентативной выборкой (банком) помеховых сигналов, позволяющей статистически обоснованно разделять полезные сигналы и помехи от грозовых разрядов. Эффективным методом распознавания сигналов является параметрический метод, использующий словари признаков, описывающих форму сигналов. Для повышения эффективности распознавания в его алгоритм включают признаки, описывающие сигналы на максимально больших интервалах времени, что, в свою очередь, приводит к увеличению времени анализа и принятия решения. Если в системе обнаружения критичным является время принятия решения, то возникает необходимость использования начальных участков сигналов СИ. В этом случае появляется возможность совместной обработки сигналов СИ и ЭМИ. Для селекции помеховых сигналов ЭМИ также применяется параметрический метод, однако его эффективность, как известно, ниже светового. Комплексирование методов селекции СИ и ЭМИ является продуктивным средством распознавания высокоэнергетических явлений в атмосфере. До настоящего времени систематическая совместная регистрация сигналов СИ и ЭМИ с целью набора надежной статистики не осуществлялась. На сравнительно небольшой выборке такие работы проводились в России и в Лос-Аламосской лаборатории США в 80-е годы прошлого столетия.

В целях совершенствования методов селекции с 2015 года осуществляется непрерывная совместная регистрация помеховых сигналов СИ и ЭМИ. За текущий период времени с мая по сентябрь в 2015–2018 годах отмечено 84 грозовых дня, в течение которых зарегистрировано более 3500 вспышек грозовых разрядов. При последующей программной обработке из этих вспышек суммарно выделено 14539 отдельных импульсов СИ и ЭМИ с соотношением сигнал/шум импульсов СИ более 10. Диапазон зарегистрированных сигналов СИ составил от 10^{-5} до $2 \cdot 10^{-2}$ Вт/см². Диапазон зарегистрированных амплитуд сигналов ЭМИ составил в напряженностях электрического поля (0.5...80) В/м. По результатам набранной статистики рассмотрены различные корреляционные признаки сигналов СИ и ЭМИ. Статистический анализ признаков позволил получить аналитические зависимости, наилучшим образом аппроксимирующие экспериментально полученные распределения значений времени наступления максимума СИ и ЭМИ излучений. Показано, что они подчиняются логнормальному закону. В результате анализа совместных регистраций сигналов СИ и ЭМИ грозовых разрядов исследовано время задержки максимума сигнала СИ относительно максимума сигнала ЭМИ. Эта величина задержки подчиняется логнормальному закону распределения с наиболее вероятным значением времени задержки 50 мкс при среднем значении задержки 123 мкс. Данный признак является эффективным для распознавания молний как помехи при обнаружении полезных сигналов по сопровождающему их СИ и ЭМИ.

Полученные данные расширяют знания о природе грозových разрядов и позволят повысить надежность разрабатываемых алгоритмов селекции необходимых при построении аппаратуры регистрации и распознавания оптических сигналов на фоне естественных помех.

Complex registration of light and electromagnetic components of lightning discharges

P.D. Markin (ikiran@mail.ru)

N.L. Dukhov All-Russia Research Institute of Automatics, 22 Sushchevskaya str., 127055 Moscow, Russia

Today there is a variety of optical observation systems, which are widely used in a number of challenges that coupled with detection of high-energy pulse effects on the Earth's surface and in the atmosphere. The actual problem of the methods is selection between target signal and impulse interference of natural and technogenic dimension. Lightning discharges in the atmosphere is the most intensive source of optical signals among interference signals of natural origin, which are followed by electromagnetic emission. The light and electromagnetic impulses generated by these interferences have complex nature. The form of these impulses is prevented from being related to any certain mathematical model. In these conditions an effective method of selection is the parametrical method based on statistical characteristics of signals. It is necessary to have the representative selection (bank) of interfering signals that allow us to have statistically based division of target signals and interference from lightning discharges. An effective method of target signal selection is the parametrical method that uses dictionaries of the features that describes signals' form. For increasing its efficiency these dictionaries include the features that describe signals on longer time scales. Time of analysis and decision-making in such situations is being increased. If reaction time is critical in the detection system algorithm, there is need of using initial sections of optical signals from lightning discharges. In this case there is a possibility of simultaneous signal processing both light and electromagnetic impulses. The parametrical method is also applied to select interfering signals by researching their electromagnetic component. However, the efficiency of parametrical method is lower than in the case of optical range. Synergy of selection methods in light and electromagnetic impulses is productive approach of identification of the high-energy effects in the atmosphere. To date systematic simultaneous registration of optical and electromagnetic impulses for the formation of reliable statistics was never applied. In the 80th in Russia and in the Los Alamos laboratory (USA) on relatively small selection such works were applied.

Since 2015 in order to improve the selection method we conducted a complex of continuous registration of noise signals in light and electromagnetic ranges. For the current time from May to September 2015–2018 author's optical observation systems detected 84 storm days and more than 3500 lightning discharges. After subsequent software processing from these discharges we selected 14539 stand-alone impulses of light and electromagnetic complex registrations with a ratio signal to noise of light impulses more than 10. Range of the registered signals of light was from 10^{-5} to $2 \cdot 10^{-2}$ W/cm². Range of the registered amplitudes of fields from electromagnetic signals was from 0.5 to 80 V/m. According to the results of the collected statistics, authors considered various correlation characteristics between light and electromagnetic emission signals. Statistical analysis of features allowed us to obtain analytical dependences approximating experimentally received time-value distributions of light and electromagnetic emission maximums. It is shown that they submit to the logarithmically Gauss law. The result of analysis of simultaneous registrations of light and electromagnetic signals shows the parameter of optical signal maximum delaying relative to the electromagnetic maximum. This delay parameter submits to the logarithmically Gauss distribution law with the most probable value of delay is 50 microseconds and average time of 123 microseconds. This feature is effective to select lightning discharges as interference at detection of nuclear explosions on the basis of their optic and electromagnetic emission.

Obtained results expand our knowledge of lightning discharges nature and allow us to increase the reliability of the developed selection algorithms. These algorithms are necessary in construction of registration and identification systems of optical target signals against the background of natural interference.

Аэрозольный зонд обратного рассеяния для применения в практике аэрологического зондирования

Балугин Н.В. (horst2007@yandex.ru), Штырков О.В., Юшков В.А.

Центральная аэрологическая обсерватория, ул. Первомайская 3, 141700 Долгопрудный Моск. обл., Россия

Для прямых измерений вертикального профиля (до 30 км) коэффициента обратного рассеяния в ФГБУ «Центральная аэрологическая обсерватория» разработан зонд, в состав которого входит один приемник оптического излучения на кремниевом фотодиоде и 2 источника оптического излучения на длинах волн 480 нм и 940 нм. Приемник и излучатели расположены таким образом, что обеспечивается измерение обратно рассеиваемого излучения под углами 175–180°. Вес зонда не превышает 1.2 кг, отношение сигнал к шуму (ОСШ) не менее 100 (на высоте 30 км). Период измерения зонда составляет 3 секунды, что при скорости подъема 5 м/с обеспечивает вертикальное разрешение 15 м. Помимо вышеуказанного зонд комплектуется собственным измерителем температуры атмосферы (точность измерения 0.3° С) и навигационным модулем ГЛОНАСС/GPS, что обеспечивает автономность определения координат зонда. Для обеспечения необходимого ОСШ в приборе применен метод синхронного детектирования с накоплением. Приемник и источники оптического излучения термостатированы при температуре $25 \pm 0.5^\circ \text{C}$. В процессе измерений (полета) осуществляется контроль интенсивности излучения источников. Для уменьшения сторонних засветок от лунного света (испытания проводились как в условиях полнолуния, так и в условиях безлунной ночи) и света городского освещения применена оптическая система, обеспечивающая угол обзора приемника не более 15°.

Был проведен ряд полетных испытаний. Прибор надежно фиксирует облачные образования и их границы, а также аэрозольные слои в отсутствии облачности (например, на высотах до 5 км и в слое под тропопаузой). Важной особенностью прибора является возможность при заданной априорной информации восстанавливать из измерений концентрацию аэрозольного вещества в атмосфере как при фоновых, так и при аномальных концентрациях, обусловленных техногенным воздействием и вулканической деятельностью. Областью применения зонда является также исследование полярных стратосферных облаков в зимне-весенний период с одновременным измерением вертикального профиля озона. Прямые измерения с помощью аэрозольного зонда могут использоваться для валидации данных дистанционных измерений наземного и космического базирования. В зонде используются доступные комплектующие и элементная база, не требующая специальных разработок и сложных конструкторских решений. Эти факторы делают данный зонд экономически эффективным по сравнению с аналогичными зарубежными зондами данного типа.

Aerosol backscatter sonde for use in the practice of aerological sounding

N.V. Balugin (horst2007@yandex.ru), O.V. Shtyrkov, V.A. Yushkov

Central Aerological Observatory, 3 Pervomayskaya str., 141700 Dolgoprudny Moscow reg., Russia

For in-situ night measurements of the vertical profile (up to 30 km) of the backscattering coefficient, the Central Aerological Observatory developed a sonde consisting of one receiver of optical radiation on a silicon photodiode and two sources of optical radiation at wavelengths of

480 nm and 940 nm. The receiver and sources are arranged in such a way that the backscattered radiation is measured at angles of 175–180°. The weight of the sonde does not exceed 1.2 kg, the signal to noise ratio (SNR) is not less than 100 (at an altitude of 30 km). The measurement period of the sonde is 3 seconds, which provides a vertical resolution of 15 m at a vertical ascent speed of 5 m/s. In addition, the probe is equipped with its own atmospheric temperature meter (measurement accuracy of 0.3° C) and a GLONASS/GPS navigation module, which provides autonomy in determining the coordinates of the sonde. To provide the necessary SNR, the device uses the method of synchronous detection with accumulation. The receiver and sources of optical radiation are thermostated at a temperature of $25 \pm 0.5^\circ \text{C}$. During the measurement (flight), the intensity of source radiation is monitored. To reduce the third-party illumination from the moonlight (tests were carried out both in full moon and in moonless night) and the light of urban lighting, an optical system providing a viewing angle of the receiver no more than 15° was used.

A number of flight tests were conducted. The device reliably records cloud formations and their boundaries, as well as aerosol layers in the absence of clouds (for example, at altitudes up to 5 km and in the layer under the tropopause). An important feature of the device is the ability to restore the concentration of aerosol substance in the atmosphere, both at background and at abnormal concentrations due to anthropogenic impact and volcanic activity, at a given apriori information. The scope of the sonde is also the study of polar stratospheric clouds in winter and spring with simultaneous measurement of the vertical profile of ozone. Direct measurements with an aerosol sonde can be used to validate ground-based and space-based remote measurement data. The sonde uses available components and components that do not require special development and complex design solutions. These factors make this sonde cost-effective compared to similar sonde of this type.

Основные очаги грозовой активности над юго-востоком Западной Сибири и их динамика

Нагорский П.М.^{1,2} (npm_sta@mail.ru), Пустовалов К.Н.^{1,2}, Харюткина Е.В.¹,
Логинов С.В.¹

¹*Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, пр. Академический 10/3, 634055 Томск, Россия*

²*Национальный исследовательский Томский государственный университет, пр. Ленина 36, 634050 Томск, Россия*

Представлены оценки плотности распределения разрядов молний над юго-востоком Западной Сибири и проведён анализ их динамики. В исследовании использовались данные плотности разрядов молний с разрешением по долготе и широте $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ (продукт High Resolution Full Climatology), полученные спутниковым детектором Optical Transient Detector (OTD) за период с 1995 по 2000 гг., а также данные координат разрядов молний, зарегистрированных грозопеленгационной сетью World Wide Lightning Location Network (WWLLN) за 2016–2018 гг. На основе данных WWLLN рассчитывалась плотность разрядов молний для сетки с ячейками $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ по долготе и широте как отдельно для каждого года, так и среднее за этот период.

Анализ плотности разрядов молний как по данным OTD, так и по данным WWLLN показал, что над юго-востоком Западной Сибири можно условно выделить пять основных очагов грозовой деятельности – «Алтайский», «Горно-Алтайский», «Салаирский», «Кузнецкий» и «Васюганский». «Алтайский» очаг располагается над Приобским плато, «Горно-Алтайский» – над северо-западными склонами Алтайских гор, «Салаирский» – над северо-западной частью Салаирского кряжа, «Кузнецкий» – над западными и северными склонами Кузнецкого Алатау, а «Васюганский» – в юго-восточной части Васюганской равнины (Большого Васюганского болота). Сравнительный анализ этих очагов показал, что, в целом, «Алтайский», «Салаирский» и «Кузнецкий» очаги являются более устойчивыми и интенсивными по сравнению с «Горно-Алтайским» и «Васюганским» и образуют «основную

ось» перемещения гроз на юго-востоке Западной Сибири, направленную с юго-запада на северо-восток. При этом в отдельные годы могут значительно активизироваться «Горно-Алтайский» и «Васюганский» очаги. Так, в 2018 г. отмечено, что плотность разрядов молний в «Васюганском» очаге значительно превышала аналогичную величину в других очагах. Активизацию этого очага можно объяснить тем, что в июне–июле 2018 г. над юго-востоком Васюганской равнины, согласно спутниковым данным, отмечалось прохождение большого числа мезомасштабных конвективных комплексов, для которых характерна высокая грозовая активность.

Исследование выполнено при частичной финансовой поддержке РФФИ и администрации Томской области в рамках научного проекта № 18-45-703014.

The main centers of thunderstorm activity and their dynamics over the southeastern part of Western Siberia

P.M. Nagorskiy^{1,2} (npm_sta@mail.ru), K.N. Pustovalov^{1,2}, E.V. Kharyutkina¹, S.V. Loginov¹

¹*Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems SB RAS, 10/3 Akademicheskii ave., 634055 Tomsk, Russia*

²*National Research Tomsk State University, 36 Lenin ave., 634050 Tomsk, Russia*

Estimates of the distribution density of lightning discharges and analysis of their dynamics over the southeastern part of Western Siberia are presented. Data of lightning discharges density with spatial resolution of $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ (product of High Resolution Full Climatology), derived by the satellite Optical Transient Detector (OTD) for the period from 1995 to 2000 as well as data of lightning discharges coordinates recorded by the World Wide Lightning Location Network (WWLLN) for 2016–2018 were used. Based on WWLLN data, the density of lightning discharges was calculated for a grid with cells of $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ in longitude and latitude both separately for each year and for the whole period, in general.

An analysis of the lightning discharges density, based on both OTD and WWLLN data, has shown that there are five main areas (centers) of thunderstorm activity in the southeastern part of Western Siberia – “Altayskiy”, “Gorno-Altayskiy”, “Salairskiy”, “Kuznetskiy” and “Vasyuganskiy”. The “Altayskiy” center is located above the Priobsky plateau, “Gorno-Altayskiy” – above the northwestern slopes of the Altai Mountains, “Salairskiy” – above the northwestern part of the Salair ridge, “Kuznetskiy” – above the western and northern slopes of the Kuznetsk Alatau, and “Vasyuganskiy” – in the southeastern part of the Vasyugan Plain (The Great Vasyugan Mire). A comparative analysis of these centers has shown that, in general, the “Altayskiy”, the “Salairskiy” and the “Kuznetskiy” centers are more stable and intensive unlike the “Gorno-Altayskiy” and the “Vasyuganskiy”; they form the “main axis” of thunderstorms moving in the southeast of Western Siberia, directed from southwest to northeast. At the same time, in some years, the “Gorno-Altayskiy” and the “Vasyuganskiy” centers can become more pronounced. Thus, it was noted that in 2018 the density of lightning discharges in the “Vasyuganskiy” center significantly exceeded the corresponding values in other centers. The activation of this center, based on satellite data, can be explained by the fact that in June and July 2018 over the southeastern part of the Vasyugan Plain, a large number of mesoscale convective complexes with high thunderstorm activity, were revealed.

This work is partially supported by RFBR and Tomsk region administration, according to the research project No 18-45-703014 r_mol_a.

Динамика метеорологических и электрических величин приземной атмосферы во время аномальных синоптических ситуаций

Нагорский П.М.^{1,2} (npm_sta@mail.ru), Корольков В.А.¹, Пустовалов К.Н.^{1,2},
Тельминов А.Е.^{1,2}

¹*Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, пр. Академический 10/3,
634055 Томск, Россия*

²*Национальный исследовательский Томский государственный университет, пр. Ленина 36, 634050
Томск, Россия*

Проведено исследование динамики метеорологических и атмосферно-электрических величин приземной атмосферы во время аномальных синоптических ситуаций. Анализ осуществлялся на основе данных измерительно-вычислительной системы ИМКЭС СО РАН, состоящей из 6 пунктов, которые установлены на территории и в окрестностях г. Томска. Измерительная сеть оснащена автоматическими метеостанциями ТАА-01, измеряющими широкий спектр метеорологических и турбулентных величин, оптическими осадкомерами ОПТИОС, а также датчиками напряжённости электрического поля EFS-2/50. Данная система является пилотным образцом системы метеорологического мониторинга, предназначенной для Арктики и районов Крайнего Севера, созданием которой занимается ИМКЭС СО РАН совместно с ООО «Сибаналитприбор». При интерпретации полученных данных привлекались синоптические карты с фронтальным анализом и данные метеорологических спутников.

Результаты мониторинга за 2018–2019 гг. позволили исследовать пространственно-временную динамику метеовеличин при: а) «прорывах» воздушных масс с севера или юга; б) аномальных понижениях или повышении температуры, связанных с блокирующими процессами; в) прохождении мезомасштабных конвективных систем и комплексов. В качестве примера представлен анализ данных, полученных во время аномального вторжения на юго-восток Западной Сибири тропической воздушной массы и быстрой её сменой на арктическую поздней осенью 2018 г. В этот период в г. Томске было зарегистрировано опасное природное явление (ОЯ) «Шквал». Образованию ОЯ способствовали очень большие градиенты температуры воздуха в регионе, катализирующие конвективные процессы. Температура воздуха в г. Томске в период предшествующий возникновению данного ОЯ достигла аномально высоких значений, превышающих среднюю температуру октября более чем на 16° С. В динамике компонент ветра и турбулентных потоков зарегистрированы волны с периодом ~ 12 ч, которые нельзя объяснить суточными изменениями и которые, предположительно, связаны с волновыми движениями в атмосфере при подходе атмосферного фронта. Подобные вариации, обусловленные изменением концентрации аэрозоля, отмечены также в динамике напряжённости электрического поля. Непосредственно перед прохождением приземной линии первого холодного фронта в пунктах мониторинга наблюдались медленные вариации электрического поля, характерные для сильно развитых кучево-дождевых облаков. С небольшим запаздыванием относительно роста электрического поля зарегистрирована серия резких усилений компонент скорости ветра и турбулентных потоков, обусловленные шквалами.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках ФЦП ИР (соглашение № 14.607.21.0205 уникальный идентификатор ПНИ RFMEFI60718X0205).

Dynamics of meteorological and electrical quantities in the surface atmosphere during anomalous synoptic situations

P.M. Nagorskiy^{1,2}, V.A. Korolkov¹, K.N. Pustovalov^{1,2}, A.E. Tel'minov^{1,2}

¹*Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems SB RAS, 10/3 Akademicheskii ave., 634055 Tomsk, Russia*

²*National Research Tomsk State University, 36 Lenin ave., 634050 Tomsk, Russia*

The study of the dynamics of meteorological and atmospheric-electrical quantities in the surface atmosphere during anomalous synoptic situations was carried out. The analysis was carried out based on the data of IMCES SB RAS measuring and computing system, consisting of 6 points, which are installed in and around Tomsk. The measuring network is equipped with TAA-01 automatic weather stations, which measures a wide range of meteorological and turbulent quantities, OPTIOS optical rain gauges, as well as EFS-2/50 electric field strength sensors. This system is a pilot model of a meteorological monitoring system designed for the Arctic and for regions in the Far North, which is created by IMCES SB RAS in cooperation with Sibanalitpribor Ltd. When interpreting the obtained data, weather charts and data from meteorological satellites were used.

Monitoring results for 2018–2019 allowed us to study the spatio-temporal variability of meteorological quantities in such cases as: a) "breakouts" of air masses from the north or the south; b) anomalous decrease or increase in temperature associated with blocking processes; c) the passage of mesoscale convective systems and complexes. For example, an analysis of the data obtained during the anomalous invasion of tropical air mass in the southeastern part of Western Siberia and its rapid change to arctic air mass in late autumn 2018 is presented. During this period, a dangerous natural phenomenon "Squall" was registered in Tomsk. The formation of the dangerous phenomenon has been facilitated by very large gradients of air temperature in the region, accelerating convective processes. The air temperature in the period preceding the occurrence of this dangerous phenomenon reached anomalously high values, exceeding the average temperature in October by more than 16° C. In the dynamics of wind components and turbulent fluxes, waves with a period of ~ 12 hours have been recorded that cannot be explained by diurnal changes and which are presumably related to wave movements in the atmosphere during the passage of atmospheric front. Such variations due to a change in the concentration of aerosol is also well pronounced in the dynamics of the electric field strength. Immediately before the passage of surface line of first cold front in the monitoring points the electric field slow variations associated with highly developed cumulonimbus clouds were registered. A series of sharp amplifications of the components of wind speed and turbulent fluxes, caused by squalls, were registered with a slight delay in relation to the growth of the electric field.

The work was financially supported by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation under the Federal target program (No. 14.607.21.0205, RFMEFI60718X0205).

Динамика лёгких ионов, субмикронного аэрозоля и напряженности электрического поля в приземном слое атмосферы под воздействием конвективных факторов

Нагорский П.М.^{1,2} (npm_sta@mail.ru), Пустовалов К.Н.^{1,2}, Золотов С.Ю.¹,
Ланская О.Г.¹, Смирнов С.В.¹, Оглезнева М.В.²

¹*Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, пр. Академический 10/3, 634055 Томск, Россия*

²*Национальный исследовательский Томский государственный университет, пр. Ленина 36, 634050 Томск, Россия*

Наряду с парниковыми газами легкие ионы и аэрозоль являются климатообразующими факторами, влияющим на радиационный баланс Земли. В контексте проблемы влияния аэрозоля на климат важное значение имеют ситуации, связанные с быстрыми изменениями

его концентрации и вида распределения во время прохождения мощной конвективной облачности, включая Сб.

В работе представлены результаты исследований согласованных вариаций: градиента потенциала электрического поля $PG = -E$, полярных электропроводностей $L+/-$ концентрации и вида распределения аэрозольной компоненты, метеорологических, турбулентных и актинометрических величин в приземном слое. При исследовании привлекались синоптические карты с фронтальным анализом и данные метеорологических спутников. При прохождении Сб без выпадения ливневых осадков зарегистрированы согласованные изменения PG и $L+/-$. Положительному возмущению PG соответствует падение концентрации $L-$, при этом $L+$ не испытывает существенных изменений, а отрицательному возмущению PG – падение концентрации $L+$ при неизменном $L-$. При прохождении Сб, сопровождающихся ливневыми осадками, динамика PG и $L+/-$ изменяется. В моменты усиления интенсивности осадков зарегистрировано уменьшение PG , а во время отрицательных возмущений PG – «аномальный» рост его абсолютной величины. В динамике $L+$ этот эффект проявлялся значительно слабее чем в $L-$. После выпадения осадков установлено, что происходит синхронный рост электропроводностей обеих полярностей. Этот эффект может быть связан с уменьшением стока лёгких ионов на аэрозоль, поскольку во время выпадения осадков происходит падение концентрации аэрозоля.

Таким образом, выпадение интенсивных осадков приводит к вымыванию из атмосферы аэрозоля (ядер конденсации) и снижает сток легких ионов на аэрозоль. Это ведёт к росту полярных электропроводностей. Краткосрочный рост концентрации аэрозоля, совпадающий со шквалистым усилением ветра, приводит к поднятию и перемешиванию ветром аэрозоля, усилению скорости стока легких ионов и падению электропроводности. При прохождении Сб с интенсивным выпадением ливневого снега динамика PG и $L+/-$ существенно отличается от той, что наблюдается при выпадении ливневого дождя. В случае ливневого снега наблюдается синхронное падение L обеих полярностей, а в динамике градиента потенциала в ряде случаев отмечается рост абсолютной величины при положительных возмущениях PG и падение с последующей сменой знака при отрицательных возмущениях PG .

Исследование было выполнено в рамках госбюджетной темы № АААА-А17-117013050031-8.

Dynamics of light ions, submicron aerosol and electric field strength in the surface layer of the atmosphere under the influence of convective factors

P.M. Nagorsky^{1,2} (npm_sta@mail.ru), K.N. Pustovalov^{1,2}, S.Yu. Zolotov¹, O.G. Lanskaya¹, S.V. Smirnov¹, M.V. Oglesneva²

¹*Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems SB RAS, 10/3 Akademicheskii ave., 634055 Tomsk, Russia*

²*National Research Tomsk State University, 36 Lenin ave., 634050 Tomsk, Russia*

Along with greenhouse gases, light ions and aerosol are climate-forming factors that influence on the Earth's radiation balance. In the context of the problem of aerosol influence on climate, situations, associated with rapid changes in its concentration and the type of distribution during the passage of powerful convective cloudiness Cb, play an important role.

The paper presents the results of study in matched/correlated variations: potential gradient of electric field $PG = -E$, polar electric conductivities $L+/-$, concentration and type of distribution of the aerosol component, meteorological, turbulent and actinometrical values PG in the surface layer. Synoptic maps with frontal analysis and meteorological satellite data were also involved. During the passage of Cb without precipitation, consistent changes in PG and $L+/-$ were recorded. A positive PG perturbation corresponds to a decrease in the concentration of $L-$, while $L+$ does not have significant changes, and a negative perturbation PG corresponds to a decrease in the concentration of $L+$ with a constant $L-$. During the passage of Cb, accompanied by heavy rainfall, the dynamics of PG and $L+/-$ was changed. In cases of an increase in precipitation intensity, a decrease in PG was revealed, and during negative PG disturbances – an increase in its absolute value was observed.

In the L+ dynamics, this effect was pronounced much more weaker than in L– one. After precipitation it was found that a synchronous increase in the conductivities of both polarities occurred. This effect may be associated with a decrease in their runoff to the aerosol, since the concentration of aerosol decreases during precipitation.

Thus, the fallout of intense precipitation leads to the leaching of aerosol (condensation nuclei) from the atmosphere and reduces the flow of light ions to the aerosol. This leads to an increase in polar conductivities. A short-term increase in aerosol concentration, which coincides with squally wind intensification, leads to the aerosol rising and mixing by wind, to an increase in the flow rate of light ions and to a decrease in electrical conductivity. During the passage of Cb with intense fall of snow showers, the dynamics of PG and L+/- is significantly different from that observed during the fall of heavy rain. In the case of snow showers, there is a synchronous drop in L of both polarities, and in the dynamics of the potential gradient in some cases an increase in the absolute value with positive PG disturbances and a fall with a subsequent change of sign with negative PG disturbances was recorded.

The research was supported by PFSR SB RAS № AAAA-A17-117013050031-8.

Ультрафиолетовый озонный спектрометр (УФОС). Переоснащение озонметрической сети Росгидромета. Результаты опытной эксплуатации

Соломатникова А.А. (pulsin@mail.ru), Павлова К.Г., Шаламянский А.М, Привалов В.И.
*Главная геофизическая обсерватория им. А.И. Воейкова, ул. Карбышева 7, 194021 Санкт-Петербург,
Россия*

Озонметрическая сеть Росгидромета состоит из 31 станции, является частью мировой озонметрической сети и успешно функционирует уже более 45 лет. Мониторинг общего содержания озона (ОСО) – основная задача лаборатории контроля озонового слоя атмосферы (ЛКОСА) ФГБУ ГГО, сотрудники которой осуществляют методическое руководство сетью, а также её инструментальное и метрологическое обеспечение. Фильтровые озонметры М-124 – основные рабочие инструменты озонметрической сети – простые и надежные приборы, но они физически изношены и морально устарели. С 2015 года происходит постепенное переоснащение озонметрических станций Росгидромета новой автоматизированной аппаратурой российского производства.

Ультрафиолетовый озонный спектрометр УФОС, разработанный и изготовленный на производственной базе ООО «УНП Лазерный центр ИТМО», предназначен для комплексных автоматизированных всепогодных измерений ОСО и спектрального состава ультрафиолетовой радиации (УФР) в диапазоне 290–400 нм. По оптической схеме УФОС является полихроматором на дифракционной решетке с фотодиодной линейкой в качестве регистрирующего элемента. Прибор имеет два оптических канала, которые применяются для регистрации спектрального состава УФР приходящей из полусферы неба (для определения уровней биологически активной УФР) и из зенита неба (для расчета ОСО). Регистрация всего спектра по каждому из каналов осуществляется за доли секунды при высоте Солнца более 5 градусов непрерывно с дискретностью от 5 минут (интервал измерений и другие параметры задаются оператором). Методика расчета ОСО, применяемая в УФОС, базируется на тех же принципах, которые лежат в основе измерений ОСО фильтровыми озонметрами М-124, а калибровка спектрометров осуществляется по эталону российской озонметрической сети – спектрофотометру Добсона №108, что позволяет рассчитывать на сохранение однородности рядов данных при переходе на новое оборудование. При наличии доступа к сети Интернет, данные от приборов в оперативном режиме поступают на сервер ФГБУ ГГО и сохраняются в базе данных «ОЗОН».

На данный момент в опытной эксплуатации на сети находятся 22 спектрометра УФОС. В ходе опытной эксплуатации выявлены и устранены некоторые «детские болезни»

приборов, возникновение которых неизбежно при производстве нового оборудования. Анализ накопленного массива данных показал, что приборы, которые были качественно прокалиброваны перед установкой, и для которых выполнялись основные требования по эксплуатации, сохраняли шкалу в течение всего периода эксплуатации, в том числе после технического обслуживания и ремонта, не затрагивающего оптическую схему приборов. Отклонения в среднедневных значениях ОСО (массив без отбраковки) от значений, полученных по стационарным озонметрам М-124 для таких приборов, в основном, составляли менее 7%, что дает основание для позитивной предварительной оценки результатов опытной эксплуатации спектрометров УФОС.

Ultraviolet Ozone Spectrometer (UVOS). Re-equipment of Russian ozone network. Results of trial operation

A.A. Solomatnikova (pulsin@mail.ru), K.G. Pavlova, A.M. Shalamyansky, V.I. Privalov
A.I. Voeikov Main Geophysical Observatory, 7 Karbyshev str., 194021 Saint-Petersburg, Russia

Ozone network of Roshydromet consists of 31 stations. It is a part of the global ozone network and has been successfully operating for over 45 years. Monitoring of the total ozone content (TOC) is the main task of the Ozone Layer Monitoring Laboratory of the Voeikov Main Geophysical Observatory (MGO). The team of the laboratory carries out methodological guidance of the network, as well as its instrumental and metrological support. Filter M-124 ozonometers are the main working instruments of ozone network, they are simple and reliable devices, but physically worn out and morally obsolete. Since 2015 there is a gradual re-equipment of Roshydromet ozonometric stations with new Russian-made automated instruments.

The UVOS (ultraviolet ozone spectrometer), developed and manufactured at the production base of the ITMO LLC, is intended for integrated automated all-weather TOC measurements and spectral composition of ultraviolet radiation (UVR) in the range of 290–400 nm. According to the optical scheme UVOS is a polychromator on a diffraction grating with a photodiode array as a recording element. The device has two optical channels that are used to record the spectral composition of the UVR coming from the sky hemisphere (to determine the levels of biologically active UVR) and from the sky zenith (to calculate the TOC). Registration of the entire spectrum for each channel is carried out in fractions of a second with the height of the Sun more than 5 degrees continuously with discreteness of 5 minutes (the measurement interval and other parameters are set by the operator). The method of calculating the TOC, used in UVOS, is based on the same principles which are the cornerstone of TOC measurements by filter M-124 ozonometer. Calibration of the spectrometers is carried out according to the Dobson spectrophotometer #108 that is the standard of the Russian ozone network. This allows us to count on maintaining the uniformity of data series upon transition to new equipment. If we have an access to the Internet, the data from UVOS instruments are transferred online to MGO server and stored in the database named "OZON".

There are 22 UVOS spectrometers in trial operation now. In course of that some "childhood diseases" of devices have been identified and eliminated, the occurrence of which is inevitable during the production of new equipment. Analysis of the accumulated data set showed that devices that were properly calibrated before installation, and for which the basic operating requirements were met, maintained the scale throughout the entire period of exploitation, including after maintenance and repair, which did not affect the optical design of the instruments. Deviations in average daily TOC values (array without rejection) for stable UVOS instruments and station ozonometers M-124 were mostly less than 7% that gives grounds for a positive preliminary assessment of the UVOS spectrometers experimental operation results.

Опытная эксплуатация спектрометров УФОС. Результаты параллельных наблюдений с озонόμεтрами М-124. Основные признаки нештатной работы спектрометров и алгоритмы их оперативного обнаружения

Павлова К.Г. (nerline@yandex.ru), Соломатникова А.А., Шаламянский А.М.,
Привалов В.И.

*Главная геофизическая обсерватория им. А.И. Воейкова, ул. Карбышева 7, 194021 Санкт-Петербург,
Россия*

Озонометрическая сеть Росгидромета, являющаяся частью Глобальной службы атмосферы (ГСА), состоит из 31 пункта наблюдений. Метрологическое и методическое руководство сетью осуществляет ФГБУ ГГО. С 1973 года для наблюдений используются фильтровые озонόμεтры М-124. В 2015 году начались работы по переоснащению сети современной отечественной автоматизированной аппаратурой. На данный момент 22 пункта из 31 дополнительно оснащены УФ озонными спектрометрами (УФОС), находящимися в опытной эксплуатации. Ведутся работы по сохранению однородности рядов данных, ведь при измерениях озона важны не столько сами значения ОСО, а определение долгосрочных тенденций и трендов. Методика расчета ОСО, применяемая в УФОС, базируется на тех же принципах, которые лежат в основе измерений ОСО фильтровыми озонόμεтрами М-124, а калибровка спектрометров осуществляется по эталону российской озонометрической сети – спектрофотометру Добсона №108, что позволяет рассчитывать на сохранение однородности рядов данных при переходе на новое оборудование.

Сравнение массивов данных, полученных при одновременных наблюдениях приборами старого и нового образца, является важным этапом работ по обеспечению преемственности рядов данных. Анализ накопленных массивов данных показал, что значительная часть полученных во время опытной эксплуатации значений нуждается в тщательной фильтрации и пересчете с применением специально разработанных алгоритмов, позволяющих по самим результатам измерений обнаружить признаки нештатной работы приборов, ошибок в первичной калибровке или неправильной установки времени на управляющем компьютере. Массив данных, полученный после применения фильтрации и отбраковки, продемонстрировал приличную сходимость рядов данных. Различия в среднесуточных значениях ОСО редко составляли более 7%, что допустимо, поскольку заявленная погрешность озонόμεтров М-124 и спектрометров УФОС составляет 5%.

UVOS spectrometers trial operation. Results of parallel observations UVOS vs. ozonometers M-124. Key signs of incorrect work of spectrometers and algorithms for their rapid detection

K.G. Pavlova (nerline@yandex.ru), A.A. Solomatnikova, A.M. Shalamyansky, V.I. Privalov
A.I. Voeikov Main Geophysical Observatory, 7 Karbyshev str., 194021 Saint-Petersburg, Russia

Roshydromet ozone network, which is part of the Global atmospheric watch program, consists of 31 stations. The Voeikov Main Geophysical Observatory provides the metrological and methodological management of the network. Since 1973, filter M-124 ozonometers have been used for observations. In 2015 works on re-equipment of network as the modern domestic automated equipment began. Currently, 22 points out of 31 are additionally equipped with ultraviolet ozone spectrometers (UVOS) in trial operation. The work on preserving the homogeneity of the data series is underway, because when measuring ozone it is important to determine long-term trends. The method of calculating the total ozone content (TOC), used in UVOS, is based on the same principles which are the cornerstone of TOC measurements by filter M-124 ozonometer. Calibration of the spectrometers is carried out according to the standard of the Russian ozone network, Dobson spectrophotometer #108, what allows to count on maintaining uniformity of data series upon transition to the new equipment.

Comparison of data arrays obtained at simultaneous observations by two instruments (UVOS–M124) is an important stage in the work to ensure the continuity of data series. Analysis of the accumulated data series has shown that a significant part of the values obtained during the trial operation requires careful filtering and recalculation using specially developed algorithms. Moreover, analysis helped in detecting signs of abnormal operation of the instruments, errors in the primary calibration or incorrect time setting on the control computer, using the measurement results themselves. The data array obtained after applying filtering and selection demonstrated a decent convergence of data series. Differences in average daily TOC values rarely exceed 7%, which is acceptable, since the stated error of the M-124 ozonometer and UVOS spectrometers is 5%.

Временная изменчивость характеристик теплового баланса Астраханской области

Коломеец Л.И. (akvarel@rshu.ru), Елизарова А.Ю.

Российский государственный гидрометеорологический университет, Воронежская ул. 79, 192007 Санкт-Петербург, Россия

Государственная наблюдательная сеть насчитывает 39 станций, где в настоящее время проводятся градиентные наблюдения за деятельной поверхностью с целью получения основных характеристик уравнения теплового баланса.

Для периода с 1960 по 2018 гг. были рассчитаны основные интегральные суммы потоков радиационного баланса, затрат тепла на испарение, турбулентного потока тепла и потока тела в почву для станции Астрахань. Были получены средние многолетние нормы для базисного периода ВМО (1960–1990) и обновленные оперативные климатические нормы ВМО (1991–2010). Было выявлено, что основные изменения в интегральных суммах потоков наблюдается в значениях затрат тепла на испарение и турбулентном потоке тепла, что свидетельствует об изменении характера увлажнения данной территории. Частые волны жары Астраханской области способствуют расширению ареалов переносчиков трансмиссионных болезней человека.

Temporal variability of the characteristics of the heat balance of the Astrakhan region

L.I. Kolomeets (akvarel@rshu.ru), A.Y. Elizarova

Russian State Hydrometeorological University, 79 Voronezhskaya, 192007 Saint-Petersburg, Russia

The state observational network has 39 stations, where gradient observations of the active surface are currently being conducted in order to obtain the basic characteristics of the heat balance equation.

For the period from 1960 to 2018, the main integral sums of fluxes of radiation balance, heat consumption for evaporation, turbulent heat flux and body flux into the soil were calculated for Astrakhan station. Average multi-year norms for the WMO base period (1960–1990) and updated WMO operational climate standards (1991–2010) were obtained. It has been found that the main changes in the integral sums of flows are observed in the values of heat consumption for evaporation and turbulent heat flow, which indicates a change in the nature of moistening of this territory. Frequent heat waves of the Astrakhan region contribute to the expansion of the vector areas of human transmission diseases.

Зависимость приходящего коротковолнового излучения от общего содержания озона и облачности

Смирнов С.В. (smirnov@imces.ru)

*Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, пр. Академический 10/3,
634055 Томск, Россия*

Представляются результаты измерений приходящего коротковолнового излучения – ультрафиолетового (УФИ, 280–400 нм), фотосинтетически активного (ФАИ, 400–700 нм) и суммарной радиации в диапазоне 305–2800 нм, общего содержания озона (ОСО) и спектральной прозрачности облачности, проведённых в Томске в 2006–2018 гг. Измерения выполняются в геофизической обсерватории ИМКЭС СО РАН с помощью многоканального фильтрового радиометра NILU-UV-6T и пиранометра Keep & Zonen CM-11, установленных на наблюдательной площадке на крыше одного из корпусов института, с 1-мин временным разрешением.

Анализ данных измерений показал выраженную зависимость приходящего УФИ от величины ОСО, наиболее существенную в диапазоне УФ-В (280–315 нм). Также выявлено влияние облачности на величину суммарной радиации, наибольшее в видимом диапазоне, которое подтверждается статистически значимой зависимостью изменения ФАИ от изменения прозрачности атмосферы на длине волны 380 нм.

Работа была выполнена в рамках проектов IX.135 (№ 0369-2018-0002) и IX.137 (№ 0369-2018-0012) программы ФНИ ГА на 2013–2020 гг.

Dependence of incoming short-wave radiation from total ozone and cloudiness

S.V. Smirnov (smirnov@imces.ru)

*Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems SB RAS, 10/3 Akademicheskii ave., 634055 Tomsk,
Russia*

The measuring results of solar ultraviolet (UV, 280–400 nm), photosynthetically-active (PAR, 400–700 nm), global (305–2800 nm) radiations, total ozone column (TOC), spectral cloudiness transmission carried out in Tomsk in 2006–2018 are presented. The radiation measurements were performed by multifilter radiometer NILU-UV-6T and pyranometer Keep & Zonen CM-11 with temporal 1-min resolution mounted on the roof observation platform in a geophysical observatory of IMCES SB RAS.

The analysis of measurement data showed the significant dependence of incoming UV radiation on TOC, the most in the UV-B range (280–315 nm). The analysis also showed an influence of cloudiness on global radiation, the greatest in a visible range, which is confirmed by statistically significant dependence of PAR on the atmospheric transmission at 380 nm.

This work has been executed within the framework of IX.135 (No. 0369-2018-0002) and IX.137 (No. 0369-2018-0012) projects of the Fundamental Scientific Researches Program of State Academies for 2013–2020.

Региональные и сезонные вариации аэрозольного рассеяния ($\lambda = 1.064$ мкм) на высотных трассах

Осипов В.М. (v.osipov@list.ru)

*НИИ оптико-электронного приборостроения, ул. Ленинградская 29/Т, 188540 Лен. обл. Сосновый Бор,
Россия*

Рассмотрены региональные и сезонные вариации характеристик аэрозольного ослабления и рассеяния в области 1.064 мкм, определяющие эффективность работы лазерного дальнометра воздушного базирования. Для численных оценок коэффициентов ослабления и рассеяния использованы современные экспериментальные результаты [1–3]

дистанционного спутникового зондирования. Представленная в этих работах информация дает возможность рассчитывать (используя соответствующее программное обеспечение) требуемые характеристики аэрозольного рассеяния и поглощения, включая их высотную зависимость, в различных спектральных участках.

В данном докладе это показано на примере интересующих характеристик аэрозольного ослабления в области 1.064 мкм. Выявлена существенная зависимость коэффициентов аэрозольного ослабления и рассеяния от сезонных и региональных условий, показано их отличие от полученных ранее теоретических оценок. Рассчитаны атмосферные факторы уравнения локации, определяющие величину рассеянного назад лазерного излучения.

1. Omar A.H., Winker D.M., Kittaka C. et al. The CALIPSO automated aerosol classification and lidar ratio selection algorithm // J. Atmos. Ocean. Tech. 2009. V. 26. P. 1994–2014.
2. Burton S.P., Ferrare R.A., Vaughan M.A. et al. Aerosol classification from airborne HSRL and comparisons with the CALIPSO vertical feature mask // Atm. Meas. Tech. 2013. V. 6. P. 1397–1412.
3. Yu, H., M. Chin, D.M. Winker et al. Global view of aerosol vertical distributions from CALIPSO lidar measurements and GOCART simulations: Regional and seasonal variations // J. Geophys. Res. 2010. V. 115, D00H30. P. 1–19.

Regional and seasonal variations of aerosol scattering ($\lambda = 1.064 \mu\text{m}$) at high-altitude paths

V.M. Osipov (v.osipov@list.ru)

Scientific Research Institute for Optoelectronic Instrument Engineering, 29 Liter T Leningradskaya str., Sosnovy Bor, Leningrad region, 188540 Russia

Regional and seasonal variations of the aerosol attenuation and scattering characteristics in the neighborhood of 1.064 μm , which determine the efficiency of the air-based laser rangefinder, are considered. Present-day experimental results [1–3] of the satellite remote sensing are used for numerical estimates of the attenuation and scattering coefficients. The information presented in these works makes it possible to calculate (using the appropriate software) the required characteristics of aerosol scattering and absorption in various spectral regions, including the height dependence.

In this report, this is shown by an example of the aerosol attenuation characteristics of interest in the neighborhood of 1.064 μm . A significant dependence of the aerosol attenuation and scattering coefficients on seasonal and regional conditions has been revealed, showing the difference from the theoretical estimates obtained earlier. The atmospheric factors of the location equation, which determine the magnitude of the backscattered laser radiation, have been calculated.

1. Omar A.H., Winker D.M., Kittaka C. et al. The CALIPSO automated aerosol classification and lidar ratio selection algorithm // J. Atmos. Ocean. Tech. 2009. V. 26. P. 1994–2014.
2. Burton S.P., Ferrare R.A., Vaughan M.A. et al. Aerosol classification from airborne HSRL and comparisons with the CALIPSO vertical feature mask // Atm. Meas. Tech. 2013. V. 6. P. 1397–1412.
3. Yu, H., M. Chin, D.M. Winker et al. Global view of aerosol vertical distributions from CALIPSO lidar measurements and GOCART simulations: Regional and seasonal variations // J. Geophys. Res. 2010. V. 115, D00H30. P. 1–19.

СЕКЦИЯ 7. "ХАРАКТЕРИСТИКИ ВОЛН, МАКРОЦИРКУЛЯЦИЯ и ДИНАМИЧЕСКИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ в АТМОСФЕРАХ ЗЕМЛИ и ДРУГИХ ПЛАНЕТ"

Председатель: д.ф.-м.н. **А.И. Погорельцев** (РГГМУ, СПб, Россия)

Сопредседатель: д.ф.-м.н. **Н.М. Гаврилов** (СПбГУ, СПб, Россия), д.т.н. **Ю.В. Кулешов** (ВКА, СПб, Россия), Prof. **Christoph Jacobi** (University of Leipzig, Germany)

SESSION 7. "WAVE CHARACTERISTICS, MACROCIRCULATION and DYNAMICS INTERACTIONS in ATMOSPHERES of the EARTH and OTHER PLANETS"

Chairman: Prof. **A.I. Pogoreltsev** (RSHU, SPb, Russia)

Co-chairmen: Prof. **N.M. Gavrilov** (SPbSU, SPb, Russia), Prof. **Yu.V. Kuleshov** (Mozhaisky MAA, SPb, Russia), Prof. **Christoph Jacobi** (University of Leipzig, Germany)

Анализ взаимодействия электромагнитных шумов Земли с атмосферными процессами

Малышков С.Ю. (msergey@imces.ru), Гордеев В.Ф., Чередыко Н.Н., Тартаковский В.А.,
Крутиков В.А.

*Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Академический пр. 10/3,
634055 Томск, Россия*

При наблюдаемой нестабильности климата оптимизация мониторинга климатических изменений, развитие мониторинга предвестников и алгоритмов выявления закономерностей формирования режимов резких погодно-климатических изменений в различных регионах являются естественным и необходимым шагом в обеспечении безопасности любой территории. Наши многолетние измерения в различных регионах показали, что естественное импульсное электромагнитное поле Земли (ЕИЭМПЗ) литосферного происхождения имеет ярко выраженный устойчивый суточный и сезонный ход [1]. Это объясняется тем, что деформационные волны в земной коре связаны с неравномерным вращением Земли вокруг своей оси и вокруг Солнца. Суточный ход зависит от календарной даты, географических координат местности, ее геофизических особенностей. Импульсные электромагнитные поля могут меняться при изменении состояния грунтов и при изменении воздействия на источники полей.

Анализ временного хода ЕИЭМПЗ, зарегистрированного с направления запад-восток, показал, что большую часть рассмотренного периода он согласован с ходом ЕИЭМПЗ по каналу север-юг. Можно заключить, что, несмотря на то, что антенны принимают сигнал с разных направлений, электромагнитное поле модулируется одним крупномасштабным процессом, связанным с вращением Земли вокруг своей оси и вокруг Солнца. Тем не менее, выделяются некоторые участки временного хода, когда происходит рассогласование регистрируемых с разных направлений сигналов. Такое рассогласование может быть связано с динамическими процессами в литосфере [2] или условиями распространения электромагнитных волн в волноводе земля-ионосфера.

В смысле влияния условий приземного слоя атмосферы выявлено, что наиболее выраженные рассогласования временного хода ЕИЭМПЗ разных направлений наблюдаются при меридиональном южном типе циркуляции (по классификации Б.Л. Дзердзеевского – элементарный циркуляционный механизм 13з). При таком механизме над районом расположения регистратора ЕИЭМПЗ наблюдаются устойчивые антициклональные условия. Для двух удаленных друг от друга на расстояние более 100 км регистраторов, также показано, что есть импульсы крупномасштабных внешних воздействий, модулирующие электромагнитное поле, которые приходят одновременно на оба регистратора. Но наряду с ними, есть импульсы, которые формируются в непосредственной близости от места регистрации и несут информацию о локальных процессах в точке измерения.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Администрации Томской области в рамках научного проекта № 18-47-700005p_a.

1. Малышков Ю.П., Малышков С.Ю. Периодические вариации геофизических полей и сейсмичности, их возможная связь с движением ядра земли // Геология и геофизика. 2009. Т. 50, № 2. С. 152–172.

2. Gordeev V.F, Malyshkov S.Yu, Shtalin S.G et al. Detection of geodynamic activity areas based on the Earth's electromagnetic noise parameters // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 2016. V. 48. 012026. doi:10.1088/1755-1315/48/1/012026.

Analysis of the interaction of electromagnetic earth noises with atmospheric processes

S.Yu. Malyshkov (msergey@imces.ru), V.F. Gordeev, N.N. Cheredko, V.A. Tartakovsky,
V.A. Krutikov

*Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems SB RAS, 10/3 Akademicheskii ave., 634055 Tomsk,
Russia*

With the observed climate instability, development and optimization of monitoring of climate change warnings, and algorithms for identifying patterns in the formation of weather and climate changes in different regions are a natural and necessary step in ensuring the security of any territory. Our long-term measurements in various regions have shown that the natural pulsed electromagnetic field of the Earth of lithospheric origin has a marked steady diurnal and seasonal variation [1]. This is explained by the fact that the deformation waves in the Earth's crust are associated with the uneven rotation of the Earth around its axis and around the Sun. The daily variation depends on the calendar date, the geographical coordinates of the area, its geophysical features. Pulsed electromagnetic fields can change with a change in the state of the soil and with a change in the impact on the sources of the fields.

An analysis of the time course of the natural pulsed electromagnetic field of the Earth registered from the west-east direction showed that most of the considered period was coordinated with the variations of the field along the north-south channel. It can be concluded that, despite the fact that antennas receive a signal from different directions; the electromagnetic field is modulated by single large-scale process associated with the rotation of the Earth around its axis and around the Sun. Nevertheless, some sections of the time course are distinguished when a mismatch of signals recorded from different directions occurs. Such a mismatch may be associated with dynamic processes in the lithosphere [2] or the conditions of propagation of electromagnetic waves in the Earth-ionosphere waveguide.

In terms of the influence of the conditions of the surface layer of the atmosphere, it has been revealed that the most marked mismatch of the time course of the natural pulsed electromagnetic field of the Earth in different directions is observed in the meridional southern type of circulation, according to the classification B.L. Dzerdzhevski it is elementary circulation mechanism 13z. With such a mechanism, stable anticyclonic conditions are observed over the location of the electromagnetic field recorder. For two recorders distant from each other over a distance of more than 100 km, it is also shown that there are pulses of large-scale external influences modulating the electromagnetic field that come simultaneously to both recorders. At the same time, there are impulses that are formed in the immediate vicinity of the place of registration and carry information about local processes at the point of measurement.

This work was carried out with the partial support of the Russian Foundation for Basic Research (Grant No. 18-47-700005p_a).

1. Malyshkov Yu.P., Malyshkov S.Yu. Periodic variations of geophysical fields and seismicity, their possible connection with the movement of the earth's core // *Geology and Geophysics*. 2009. V. 50, № 2. P. 152–172 (in Russian).
2. Gordeev V.F, Malyshkov S.Yu, Shtalin S.G et al. Detection of geodynamic activity areas based on the Earth's electromagnetic noise parameters // *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. 2016. V. 48. 012026. doi:10.1088/1755-1315/48/1/012026.

Численное моделирование вертикального распространения в верхнюю атмосферу акустико-гравитационных волн от атмосферных фронтов

Курдяева Ю.А.^{1,2} (kamenokamen@mail.ru), Кшевецкий С.П.¹, Куличков С.Н.^{3,4},
Борчевкина О.П.^{1,2}

¹Филиал института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова
РАН, пр. Победы 41, 236017 Калининград, Россия

²Балтийский федеральный университет им. И. Канта, ул. А. Невского 14, 236041 Калининград, Россия

³Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Пыжевский пер. 3, 119017 Москва, Россия

⁴Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Ленинские горы 1, 119234 Москва, Россия

В работе представлены результаты моделирования вертикального распространения в верхнюю атмосферу акустико-гравитационных волн (АГВ) от вариаций атмосферного давления, вызванных неустойчивостями в атмосферном фронте в московском регионе. Для численных расчетов использовались данные экспериментальных наблюдений вариаций атмосферного давления на поверхности Земли, зарегистрированных на сети из 4-х микробарографов, расположенных в московском регионе, при прохождении атмосферного фронта. Зарегистрированные волновые формы вариаций атмосферного давления, которые в данном исследовании ассоциированы с метеорологическими источниками, используются для построения моделей приземных источников АГВ, генерирующих волны, распространяющиеся в верхние слои атмосферы.

Известно, что метеорологические источники возбуждают сравнительно короткопериодные акустико-гравитационные волны. При моделировании процессов обычно пространственно-временная картина и спектр рассчитанного волнового процесса хорошо согласуются с наблюдениями. Однако амплитуды создаваемых АГВ достаточно сложно оценить вследствие недостатка детальной информации о тропосферных источниках. Оценка амплитуд атмосферных волн, распространяющихся от тропосферных источников в верхнюю атмосферу, необходима не только для изучения самих волн, но и для исследования влияния этих волн на различных высотных уровнях в верхней атмосфере.

На основе экспериментальных данных построены эмпирические аппроксимации колебаний поля атмосферного давления. Полученные аппроксимирующие функции использованы в качестве нижнего граничного условия для численного расчета распространения акустико-гравитационных волн в верхнюю атмосферу. Даны оценки амплитуды температурных возмущений в верхней атмосфере, вызванных акустико-гравитационными волнами от атмосферного фронта. Полученные оценки для амплитуды температурных возмущений, вызванных наблюдаемыми экстремальными вариациями приземного давления, принимают значения около 170 К. В то время как амплитуда температурных возмущений в верхней атмосфере, вызываемых фоновыми вариациями давления на поверхности Земли, оценена в 4–5 К.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ, проекты № 17-05-00574 (построение эмпирических аппроксимаций и численное моделирование), 18-05-00184 (анализ региональной метеорологической обстановки в нижней атмосфере в исследуемый период) и 18-05-00576 (экспериментальные данные о вариациях давления). Расчеты выполнены с использованием оборудования Центра коллективного пользования сверхвысокопроизводительными вычислительными ресурсами МГУ имени М.В. Ломоносова.

Numerical modeling of vertical propagation of acoustic-gravity waves from atmospheric fronts into the upper atmosphere

Yu.A. Kurdyayeva^{1,2} (kamenokamen@mail.ru), S.P. Kshevetskii¹, S.N. Kulichkov^{3,4},
O.P. Borchevkina^{1,2}

¹*Branch of N.V. Pushkov Institute of Earth Magnetism, Ionosphere and Radio-Wave Propagation, 41 Pobeda ave., 236017 Kalinigrad, Russia*

²*I. Kant Baltic Federal University, 14 A. Nevsky str., 236041 Kalinigrad, Russia*

³*A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics RAS, 3 Pyzhevsky per., 119017 Moscow, Russia*

⁴*M.V. Lomonosov Moscow State University, 1 Leninsky gory, 119234 Moscow, Russia*

The report presents the results of modeling the vertical propagation of acoustic-gravity waves (AGWs) into the upper atmosphere due to variations in atmospheric pressure caused by instabilities in the atmospheric front in the Moscow region. For numerical simulations, we use data of experimental observations of variations in atmospheric pressure on the Earth's surface recorded on a network of 4 microbarographs located in the Moscow region as the atmospheric front passes. The registered waveforms of variations in atmospheric pressure, which in this study are associated with meteorological sources, are used to build models of surface sources of AGWs, generating waves propagating to the upper atmosphere.

It is known that meteorological sources excite relatively short-period acoustic-gravity waves. When modeling processes, usually the space-time pattern and spectrum of the simulated wave process are in good agreement with observations. However, the amplitudes of the generated AGWs are difficult to estimate due to the lack of detailed information on tropospheric sources. Estimation of the amplitudes of the atmospheric waves propagating from tropospheric sources to the upper atmosphere is necessary not only to study the waves themselves but also to study the effect of these waves at various altitude levels in the upper atmosphere.

Based on experimental data, empirical approximations of atmospheric pressure field oscillations are constructed. The obtained approximating functions were used as the lower boundary condition for the numerical simulation of the propagation of acoustic-gravity waves to the upper atmosphere. Estimates of the amplitude of temperature disturbances in the upper atmosphere caused by acoustic-gravity waves from the atmospheric front are performed. The obtained estimates for the amplitude of temperature disturbances caused by the observed extreme variations in surface pressure take values around 170 K. At the same time, the amplitudes of temperature perturbations in the upper atmosphere caused by background pressure variations on the Earth's surface is estimated at 4–5 K.

The work was partially supported by the Russian Foundation for Basic Research, projects No. 17-05-00574 (empirical approximations and numerical modeling), 18-05-00184 (analysis of regional meteorological conditions in the lower atmosphere during the study period) and 18-05-00576 (experimental data about pressure variations). The research is carried out using the equipment of the shared research facilities of HPC computing resources at Lomonosov Moscow State University.

Атмосферные внутренние волны над Тихоокеанским побережьем Российской Федерации

Скороходов А.В.¹ (vazime@yandex.ru), Курьянович К.В.^{1,2}, Матвеев В.Е.²

¹*Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, пл. Ак. Зуева 1, 634055 Томск, Россия*

²*Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, пр. Ленина 40, 634050 Томск, Россия*

Атмосферные волны представляют собой вид волновых движений в устойчиво стратифицированной атмосфере. Основными факторами генерации подобных волновых движений является наличие слоев температурной инверсии и струйных течений нижнего уровня. Атмосферные волны могут возникать на различных высотах, начиная от тропосферы и до термосферы. Традиционными методами регистрации рассматриваемых явлений

является акустическое, лидарное и радиолокационное зондирование, которые обеспечивают достаточно регулярное, но локальное наблюдение за ними. В настоящее время стали активно использоваться результаты спутниковой съемки. На изображениях из космоса в видимом диапазоне спектра атмосферные волны проявляются в виде упорядоченных квазипараллельных полос протяженностью до нескольких сотен километров. Эти сигнатуры образованы облаками нижнего и среднего яруса с высотой их верхней границы менее 5 км. Такие атмосферные волны называются внутренними.

Согласно современным представлениям, указанные волновые процессы имеют орографическую природу возникновения или гравитационную. В первом случае устойчивость воздушных слоев нарушается при встрече с различными препятствиями, например, горами или островами. Во втором случае причиной генерации атмосферных внутренних волн являются различные процессы окружающей среды, например, конвекция или океанический апвеллинг. Несмотря на это, рассматриваемые волновые процессы остаются одними из наименее изученных явлений. Основной причиной этого является сложность их детектирования из-за времени их «жизни», изменчивости структуры их сигнатур, балла облачности и другого. При этом облачные проявления атмосферных внутренних волн регулярно наблюдаются над различными регионами Земли. Необъяснимо высокая повторяемость рассматриваемых явлений характерна для побережья Аравийского полуострова, Мозамбикского пролива, Северо-Западного побережья Австралии и Тихоокеанского побережья Российской Федерации. Для установления причин частого появления атмосферных внутренних волн над указанными территориями необходимо проводить анализ характеристик их сигнатур, а также соответствующих параметров окружающей среды. Это позволит улучшить понимание механизмов генерации и распространения рассматриваемых волновых процессов. Актуальность задачи обуславливается еще и тем фактом, что атмосферные внутренние волны относятся к авиационным факторам риска.

В докладе рассматриваются результаты спутниковой съемки MODIS и Himawari-8 сигнатур исследуемых волновых процессов над Тихоокеанским побережьем Российской Федерации. Данный регион характеризуется регулярным наблюдением и орографических атмосферных внутренних волн, и гравитационных. Приводятся оценки повторяемости возникновения рассматриваемых волновых процессов над различными участками рассматриваемой территории в период с 2000 по 2017 год. Представлены методы и алгоритмы восстановления характеристик атмосферных внутренних волн и их сигнатур по спутниковым данным и результатам аэрологического зондирования. При этом рассматриваются геометрические свойства облачных проявлений и физические параметры окружающей среды. Приводятся серии изображений из космоса Himawari-8, демонстрирующие изменчивость сигнатур рассматриваемых волновых процессов во время их распространения. Обсуждаются результаты восстановления характеристик атмосферных внутренних волн и их облачных проявлений. Выдвигаются гипотезы относительно механизмов возникновения рассматриваемых волновых процессов в исследуемом регионе и частоты их генерации.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента РФ для молодых российских ученых – кандидатов наук № МК-1745.2018.5.

Atmospheric internal waves over the Pacific coast of the Russian Federation

A.V. Skorokhodov¹ (vazime@yandex.ru), K.V. Kuryanovich^{1,2}, V.E. Matveenko²

¹V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics SB RAS, 1 Ac. Zuev sq., 634055 Tomsk, Russia

²Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, 40 Lenina pr., 634050 Tomsk, Russia

Atmospheric waves are a form of wave motion in a stably stratified atmosphere. The main factors generating such wave motions are a presence of temperature inversion layers and lower-

level jet streams. Atmospheric waves can occur at various altitudes ranging from the troposphere to the thermosphere. The traditional methods of recording the considered phenomena are acoustic, lidar and radar sensing which provide a fairly regular, but local observation of them. Currently, remote sensing results have been actively used. Atmospheric waves appear as ordered quasi-parallel bands up to several hundred kilometers in length on images from space in the visible light spectrum. These signatures are formed by clouds of the lower and middle layer with the top height less than 5 km. Such atmospheric waves are called internal.

These wave processes are of an orographic origin or gravitational according to modern concepts. In the first case, the stability of air layers is disturbed when meeting with various barriers, for example, mountains or islands. In the second case, the cause of an atmospheric internal waves generation are various environmental processes, for example, convection or oceanic upwelling. Despite this, the wave processes under consideration remain one of the least studied phenomena. The main reason for this is the complexity of their detection due to the “life time”, the structure variability of their signatures, the number of clouds and others. At the same time, cloud manifestations of atmospheric internal waves are regularly observed over various regions of the Earth. The inexplicably high frequency of phenomena occurrence under consideration is characteristic of the Arabian Peninsula coast, the Mozambique Channel, the Northwest coast of Australia and the Russian Federation Pacific Coast. It is necessary to analyze the characteristics of atmospheric internal waves and their signatures, as well as the corresponding environmental parameters to establish the reasons for their frequent occurrence over these areas. This will improve the understanding of the mechanisms of the generation and propagation of the considered wave processes. The task urgency is also due to the fact that atmospheric internal waves are related to aviation risk factors.

The report discusses the results of remote sensing by MODIS and Himawari-8 of the wave processes signatures over the Russian Federation Pacific coast. This region is characterized by regular observation of orographic atmospheric internal waves and gravitational. Estimates of the occurrence frequency of the considered wave processes over different parts of the territory under consideration are given in the period from 2000 to 2017. Methods and algorithms for recovering the characteristics of atmospheric internal waves and their signatures using satellite data and results of upper-air sounding are presented. At the same time, geometric properties of cloud manifestations and physical parameters of the environment are considered. An image series from the Himawari-8 are given which demonstrate the signatures variability of the wave processes under consideration during their propagation. The results of the retrieval of atmospheric internal wave characteristics and their cloud manifestations are discussed. Hypotheses regarding the mechanisms of the occurrence of the wave processes under consideration and the frequency of their generation in the studied region are put forward.

This work was done with the financial support of a grant from the President of the Russian Federation for young Russian scientists-candidates of sciences No. MK-1745.2018.5.

Тенденции изменения характеристик аномальных явлений погоды в Северном полушарии

Логинов С.В. (LogSV13@gmail.com), Харюткина Е.В., Усова Е.И., Поднебесных Н.В.
*Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Академический пр. 10/3,
634055 Томск, Россия*

В работе проводится анализ временного поведения полей характеристик аномальных явлений погоды (АЯП) в период 1960–2016 гг., получены тенденции и выявлены территории их максимальных изменений. Проводится сравнение полученных характеристик с данными натурных измерений. Рассматривались компоненты, характеризующие изменчивость синоптического масштаба (СИ), с периодом 2–7 суток, и волновым вектором $6 \leq k \leq 9$. СИ, как правило, связана с проявлением циклонической и антициклонической деятельности в

тропосфере. Оценки характеристик изменчивости флуктуаций геопотенциала, температуры и компонент скорости ветра (зональной, меридиональной и вертикальной в изобарических координатах) были рассчитаны по 6 часовым данным реанализа Era-Interim с 1979 по 2017 гг. с разрешением 1.125°.

Установлено, что за период 1979–2017 гг. в Северном полушарии наибольшее число аномалий атмосферных характеристик наблюдается в зимний сезон, при этом максимальные значения приходятся на зоны полярного и субэкваториального климата, преимущественно на границе континента с океаном. Минимальное количество аномалий наблюдается в зонах конвергенции Атлантического и Тихого океанов. Показано, что в начале 21 века число аномалий увеличивается в средних широтах Сибири в 2 раза. Наибольший вклад в изменчивость общего количества аномалий атмосферных характеристик вносят аномалии удельной влажности воздуха. Результаты анализа выявили, что изменение числа аномалий основных метеовеличин в Сибири связано с изменением типа атмосферной циркуляции, вызванное уменьшением морского льда на поверхности Северного Ледовитого океана.

Методом ручной обработки приземных синоптических карт для региона Сибири (50–70° с.ш.; 60–110° в.д.) за 1976–2017 гг. выявлена межгодовая изменчивость характеристик циклонов и антициклонов (количество и давление в центре), из которой следует, что в 2012–2017 гг. на этой территории имел место аномальный рост количества циклонов и антициклонов с их одновременной интенсификацией, что может быть связано с усилением неустойчивости погоды.

Исследование выполнено при поддержке ПФНИ Президиума РАН № 51.

Tendencies in changes of anomalous weather events characteristics in the Northern Hemisphere

S.V. Loginov (LogSV13@gmail.com), E.V. Kharyutkina, E.I. Usova, N.V. Podnebesnykh
Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems SB RAS, 10/3 Akademicheskoy ave., 634055 Tomsk, Russia

In the study, the temporal behavior of the characteristics fields of anomalous weather phenomena from 1960 to 2016 was analyzed. Also trends were obtained and the territories of their maximum changes were identified. The derived characteristics were compared with the observational data. The components characterizing the variability of the synoptic scale (SV) – with the period of 2–7 days, and the wave vector of $6 \leq k \leq 9$ were considered. SV is usually associated with the cyclonic and anticyclonic activity in the troposphere. Estimates of the characteristics of fluctuation variability in geopotential, temperature and wind velocity components (zonal, meridional, and vertical ones in isobaric coordinates) were calculated using 6-hour Era-Interim reanalysis data from 1979 to 2017 with a resolution of 1.125°.

It was established, that for the period of 1979–2017 in the Northern Hemisphere, the major number of anomalies in atmospheric characteristics was observed in winter season, with maximum values in the zones of polar and subequatorial climate, mainly along the border between the continent and the ocean. The minimum number of anomalies was revealed in the convergence zones of the Atlantic Ocean and the Pacific Ocean. It was shown that at the beginning of the 21st century the number of anomalies increased by 2 times in the middle latitudes of Siberia. The most significant contribution to the variability of the total number of anomalies in atmospheric characteristics belongs to anomalies of specific air humidity. The analysis results has revealed that the changes in the number of anomalies of the main meteorological variables in Siberia are associated with the changes in the type of atmospheric circulation, that caused by a decrease in sea ice concentration in the Arctic Ocean.

Based on the method of surface synoptic maps manual processing for the region of Siberia (50–70° N, 60–110° E) over 1976–2017, the interannual variability of cyclones and anticyclones characteristics (the number and the pressure in the center) was revealed. It follows that during 2012–2017 an anomalous increase in the number of cyclones and anticyclones with their

simultaneous intensification took place in this region. It could be caused by the increase in weather instability.

The research was supported by RAS Program 51.

Анализ воспроизведения динамического взаимодействия стратосферы и тропосферы в расчетах совместной климатической модели ИВМ РАН

Варгин П.Н.¹ (p_vargin@mail.ru), Кострыкин С.В.² (s_kostr@mail.ru),
Володин Е.М.² (volodin@inm.ras.ru)

¹Центральная аэрологическая обсерватория Росгидромета, ул. Первомайская 3, 141700 Долгопрудный, Моск. обл., Россия

²Институт вычислительной математики им. Г.И. Марчука РАН, ул. Губкина 8, 119333 Москва, Россия

Современные климатические модели являются основным инструментом исследования наблюдаемых и ожидаемых изменений климата и их последствий. Совершенствование воспроизведения ими динамического взаимодействия стратосферы и тропосферы является актуальной задачей. Анализируется воспроизведение такого взаимодействия в пяти 50-летних ансамблевых расчетах климатической модели ИВМ РАН 5-й версии с улучшенным вертикальным разрешением в верхней стратосфере и нижней мезосфере и интерактивным океаном для условий современного климата [1].

В модельных экспериментах частота возникновения внезапного стратосферного потепления (ВСП) по классическому определению близка к выявленной в данных реанализа NCER: ~ 0.4 в год. В стратосфере Антарктики во всех экспериментах не выявлено ни одного ВСП с изменением направления зонального ветра на 60° ю.ш. не только на 10 гПа, но и выше на 7, 5, 3 гПа. Не выявлено каких-либо существенных изменений в частоте ВСП между 25-ти летними периодами с 1965 г. по 1989 г. и с 1990 г. по 2014 г. Такие изменения могли быть обусловлены ростом содержания парниковых газов, снижением температуры стратосферы и изменениями её циркуляции. Влияющими на тропосферу считались те события, у которых нормированные значения аномалий геопотенциальной высоты в области $60\text{--}90^\circ$ с.ш. превышали по модулю 1.5 среднеквадратичного отклонения, и которые, начиная с 30 гПа, непрерывно распространялись в нижнюю стратосферу и достигали тропосферу (300 гПа). Не выявлено различия в датах возмущений, связанных как с усилением, так и ослаблением полярного вихря, которые распространяются и не распространяются в тропосферу.

Количество событий, связанных с усилением и ослаблением полярного вихря и влиянием на тропосферу в ~ 3 раза меньше, чем без него. Этот результат соответствует [2], где события, влияющие на тропосферу, в данных ансамблевых расчетов двух климатических моделей с химическим блоком и данных реанализа ERA40 были выявлены еще реже: $\sim$ в 20% случаев (с «пороговым» уровнем давления 700 гПа). Некоторые события, не попавшие в категорию влияющих на тропосферу, в данных моделирования и реанализа тем не менее характеризуются непрерывным распространением аномалий циркуляции стратосферы того же знака в тропосферу в течение нескольких недель.

В предшествующие событиям с ослаблением/усилением полярного вихря 30–50 дней наблюдались события противоположного знака, т.е. усилению предшествовало ослабление, а ослаблению – усиление вихря. Перед событиями, влияющими на тропосферу, возмущения полярной стратосферы слабее, а перед событиями, не влияющими на тропосферу, сравнимы по своей силе. Не выявлено зависимости распространения аномалий из стратосферы в тропосферу от силы и продолжительности возмущений полярной стратосферы. Отклик тропосферы зависит от её сильной внутренней изменчивости.

По сравнению с данными реанализа в модельных расчетах распространение аномалий циркуляции стратосферы в тропосферу, связанных с усилением/ослаблением стратосферного полярного вихря, занижено. Выявлены особенности в долготном распределении отклика

температуры поверхности в феврале–марте на ослабление полярного вихря с влиянием на тропосферу: отрицательные аномалиями до 2.5° в Скандинавии, северо-западе России, большей части Северной Евразии (кроме Чукотки) и центральной части Северной Америки, а положительные аномалии – в Гренландии, на Чукотке и Аляске, северо-западе и северо-востоке Канады. Для композита с усилением полярного вихря аномалии температуры поверхности в этих регионах противоположные по знаку.

1. Варгин П.Н., Кострыкин С.В., Володин Е.М. Анализ воспроизведения динамического взаимодействия стратосферы и тропосферы в расчетах климатической модели ИВМ РАН // Метеорология и гидрология. 2018. № 11. С. 100–109.
2. Runde T., Dameris M., Garny H., Kinnison D. Classification of stratospheric extreme events according to their downward propagation to the troposphere // Geophys. Res. Lett. 2016. V. 43. P. 6665–6672.

Lower troposphere impact of stratospheric perturbations in historical simulations of INM climate model

P.N. Vargin¹ (p_vargin@mail.ru), S.V. Kostykin² (s_kostr@mail.ru),
E.M. Volodin² (volodin@inm.ras.ru)

¹Central Aerological Observatory, 3 Pervomayskaya str., 141700 Dolgoprudny Moscow reg., Russia

²Marchuk Institute of Numerical Mathematics RAS, 8 Gubkin str., 119333 Moscow, Russia

Observational data of stratosphere are limited by ~ 50 years. Model data have an advantage of longer time series and possibility to produce several simulations over the same period. The simulation of stratosphere-troposphere dynamic coupling is considered in five 50-year realizations of ensemble calculations with the 5th version of the INM-CM5 climate model. The model also includes the ocean model and the improved vertical resolution in the upper stratosphere and lower mesosphere.

With a composite analysis we investigate a propagation of extreme Arctic stratospheric polar vortex weakening and strengthening (Weak/Strong) events into the troposphere using INM climate model simulations (250 winters) and NCEP-R data (50 winters) for the present climate [1]. Both analyzed data sets correspond to the present climate. Our method of study is similar to [2] but among other differences we used different model and reanalysis date and our composites were constructed in different way – members of composite were arranged relatively to date of beginning of downward propagation from 30 hPa instead of central date. We define as Weak-Trop events if normalized anomalies of the geopotential height in the region of $60\text{--}90^{\circ}$ S exceed in module 1.5 of the standard deviation and continuously distribute in the lower stratosphere (since the 30 hPa) and reach the troposphere (300 hPa). Similar Strong-Trop events are negative anomalies less than -1.5 sigma. If anomalies propagating downward do not reach to 300 hPa than they are described as Weak-No-Trop and Strong-No-Trop events. For model data and for NCEP-R 10 Weak-Trop, 30 Weak-No-Trop, 8 Strong-Trop, 28 Strong-No-Trop events and 7 Weak-Trop, 8 Weak-No-Trop, 4 Strong-Trop and 11 Strong-No-Trop events, respectively, were revealed.

As a result of the simulation, the following conclusions can be drawn:

- Only $\sim 30\%$ of extreme stratospheric polar vortex weakening and strengthening events propagate to the troposphere.
- INM model data display weaker propagation of Weak/Strong events in the lower troposphere in comparison with NCEP-R data.
- Revealed Weak-No-Trop and Strong-No-Trop events nevertheless display clear uninterrupted propagation of anomalies of the same sign into the troposphere.
- Differences between composite Weak/Strong Trop and No-Trop events of both analyzed data sets are significant on 95% confidence level with Student's test in middle-lower troposphere.

1. Vargin P.N., Kostykin S.V., Volodin E.M. Analysis of realization of stratosphere-troposphere dynamical coupling in simulations of INM RAS climate model // Rus. Met. Hydr. 2018. No 11. P. 780–786.
2. Runde T., Dameris M., Garny H., Kinnison D. Classification of stratospheric extreme events according to their downward propagation to the troposphere // Geophys. Res. Lett. 2016. V. 43. P. 6665–6672.

Взаимодействие интегральных компонент спектра Хаяши с макроциркуляционными процессами в нижней и средней атмосфере

Гурьянов В.В. (vv@kpfu.ru), Елисеев А.В., Переведенцев Ю.П.

Казанский федеральный университет, ул. Кремлевская 18, 420008 Казань, Россия

Волновые движения в атмосфере способны переносить энергию и импульс. При этом, во-первых, характеристики этих волн определяются, в том числе, состоянием климата, во-вторых, волновые процессы могут давать вклад в климатические изменения. Цель данной работы – анализ пространственно-временных спектров Хаяши геопотенциала в атмосфере Северного полушария от поверхности до изобарического уровня 1 гПа по данным реанализа для холодных сезонов в 1979–2016 гг. С использованием зимних (ноябрь–март) данных реанализа ERA-Interim для геопотенциала в тропосфере и стратосфере с 1979 по 2016 гг. проведен анализ спектров волновых возмущений с зональными числами $1 \leq k \leq 10$. При этом выделен вклад волн, распространяющихся на восток (E) и на запад (W), а также стационарных волн (S). В тропосфере и стратосфере тропиков, а также в верхней стратосфере всего Северного полушария выявлена интенсификация волновой активности. В тропиках и субтропиках это связано со всеми типами волн (E, W, S), тогда как в средних и высоких широтах – преимущественно со стационарными волнами и волнами, распространяющимися на восток. В области субтропической тропопаузы выявлено общее увеличение энергии стационарных волн в последние десятилетия. Кроме того, в тропосфере тропиков и субтропиков и в субтропической нижней стратосфере энергия распространяющихся на восток волн в годы Эль-Ниньо может быть в полтора–два раза больше, чем в годы Ла-Нинья.

Осредненное по спектру зональное волновое число для всех типов волн (E, W, S) максимально в верхней тропосфере субтропиков. При этом осредненное по спектру зональное волновое число для W- и S-волн связано с индексом Атлантической междесятилетней осцилляции и изменяется на 15% в 1979–2016 гг. (на междесятилетнем временном масштабе). Осредненный по спектру период волн в стратосфере больше, чем в тропосфере. Он максимален в средней стратосфере внетропических широт. Отмечена связь осредненных по спектру периодов волн с активностью внезапных стратосферных потеплений. Знак этой связи зависит от географической широты, слоя атмосферы и зонального волнового числа.

Были также рассмотрены корреляционные связи волновых параметров с квазидвухлетней цикличностью, представленной индексом QBO-50. На высотно-широтном распределении выделяется очаг высоких значимых положительных связей в средней стратосфере внетропических широт для всех типов волн (особенно для волн типа E и S). Следует отметить, что интегральные (проинтегрированные по волновому числу и частоте) распределения волновых характеристик позволяют получить более высокие статистически значимые связи с климатическими индексами по сравнению со значениями для отдельных частот и волновых чисел.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ (проекты №№ 18-05-00721 и 18-45-160009).

The interaction of integral components of Hayashi spectrum with macro-circulation processes in the lower and middle atmosphere

V.V. Guryanov (vv@kpfu.ru), A.V. Eliseev, Y.P. Perevedentsev

Kazan Federal University, 18 Kremlevskaja str., 420008 Kazan, Russia

Atmospheric wave motions are able to transfer energy and momentum. At first, the characteristics of these waves are determined by the state of climate; secondly, the wave processes may contribute to climate changes. The goal of this work is to analyze space-time Hayashi spectra of the geopotential height in the Northern Hemisphere atmosphere from the underlying surface to the 1-hPa pressure level from reanalysis data for the cold seasons of 1979–2016. An analysis of

spectra of wave disturbances with zonal wave numbers $1 \leq k \leq 10$ is carried out using winter (November to March) ERA-Interim reanalysis geopotential data in the troposphere and stratosphere for 1979–2016. Contributions of eastward-traveling (E), westward-traveling (W), and stationary (S) waves are estimated. The intensification of wave activity is observed in the tropical troposphere and stratosphere and in the upper stratosphere of the entire Northern Hemisphere. The intensification of wave activity in the tropics and subtropics is noted for waves of all types (E, W, and S), while in the middle and higher latitudes it is related mainly to stationary and eastward waves. Near the subtropical tropopause, the energy of stationary waves has increased in recent decades. In addition, in the tropical and subtropical troposphere and in the subtropical lower stratosphere, the energy of the eastward-traveling waves in El Niño years may be one and a half to two times more than in La Niña years.

The spectrally weighted zonal wave numbers for waves of all types (E, W, and S) are the largest in the upper subtropical troposphere. The spectrally weighted zonal wave number for W and S waves is correlated with the Atlantic Multidecadal Oscillation index and varies by 15% in 1979–2016 (on an interdecadal time scale). The spectrally weighted wave period is larger in the stratosphere than in the troposphere. It is maximal in the middle extratropical stratosphere. The spectrally weighted wave periods correlate with the activity of sudden stratospheric warmings. The sign of this correlation depends on the latitude, atmospheric layer, and zonal wave number.

We have also examined correlations of wave parameters with Quasi-Biennial Oscillation provided by the QBO-50 index. At height-latitude distribution of correlation fields allocated significant positive relations in the middle stratosphere extratropical latitudes for all types of waves (especially for waves of type E and S). It should be noted that the integral (integrated on the wave number and frequency) distributions of wave characteristics allow to get higher statistically significant associations with climate indices, compared with values for individual frequencies and wave numbers.

This work was supported by the Russian Foundation for Basic Research, grant nos. 18-05-00721 and 18-45-160009.

Сопоставление активности внутренних гравитационных волн в области мезопаузы согласно наблюдениям на станции Маймага с температурными данными EOS MLS (AURA)

Сивцева В.И. (verasivtseva@gmail.com), Аммосов П.П., Гаврильева Г.А.,
Колтовской И.И., Аммосова А.М.

*Институт космических исследований и астрономии им. Ю. Г. Шафера СО РАН, пр. Ленина 31,
677980 Якутск, Россия*

Исследованы температурные данные области мезопаузы, полученные за период 2013–2018 гг. на станции Маймага (63.04° N, 129.51° E). В зимний период сезона наблюдений 2014–2015 гг. характеристика активности внутренних гравитационных волн (ВГВ) σ_{gw} имеет более низкие значения, чем в другие сезоны, а среденочная температура области мезопаузы, наоборот, превышает аналогичные значения в другие сезоны.

Для сопоставления приведены спутниковые данные температурных профилей, полученные EOS MLS (Aura). После выделения и вычитания вклада гравитационной составляющей из температурных профилей EOS MLS для области над станцией Маймага заметно отличие в зимней стратопause сезона 2014–2015. В этот сезон зимняя стратопause имеет более низкие температуры, чем в остальные сезоны, с учетом вычета вклада флуктуаций температуры обусловленных ВГВ.

Comparison of internal gravity waves activity in the mesopause region according to observations at the Maimaga station with EOS LS (AURA) temperature data

V.I. Sivtseva (verasivtseva@gmail.com), P.P. Ammosov, G.A. Gavril'yeva, I.I. Koltovskoi,
A.M. Ammosova

*Yu.G. Shafer Institute of Cosmophysical Research and Aeronomy SB RAS, 31 Lenin ave., 677980 Yakutsk,
Russia*

The temperature data of the mesopause region obtained for the period of 2013–2018 at the station Maimaga (63.04° N, 129.51° E) was investigated. During the winter period of the 2014–2015 observation season, the characteristic of the internal gravity waves (IGW) activity σ_{gw} has lower values than in other seasons, and the average night temperature of the mesopause region, on the contrary, exceeds corresponding values in other seasons.

For comparison, satellite data of temperature profiles obtained by EOS MLS (Aura) are given. After isolating and subtracting the contribution of the gravitational component from the EOS MLS temperature profiles for the region above the Maymaga station, the difference in the winter stratopause of the 2014–2015 season is noticeable. During this season, the winter stratopause has lower temperatures than in other seasons, taking into account the deduction of the contribution of temperature fluctuations due to IGW.

Анализ взаимодействия планетарных волн во время событий ВСП в средней и верхней атмосфере

Диденко К.А.¹ (didenko.xeniya@yandex.ru), Погорельцев А.И.¹, Швед Г.М.²

¹*Российский государственный гидрометеорологический университет, Малоохтинский пр. д. 98, 195196
Санкт-Петербург, Россия*

²*Санкт-Петербургский государственный университет, физ. фак., Университетская наб. 7/9, 199034
Санкт-Петербург, Россия*

В атмосфере наблюдается взаимосвязь между изменениями амплитуд стационарных планетарных волн с зональными волновыми числами 1 и 2 (СПВ1 и СПВ2). Эта взаимосвязь обусловлена, главным образом, нелинейными взаимодействиями по типу волна-волна и волна-средний поток. Кроме взаимодействия СПВ1 и СПВ2 между собой и со средним потоком, они взаимодействуют с высокочастотными планетарными волнами – с суточным или полусуточным мигрирующим приливом, генерируя суточный и полусуточный немигрирующий прилив.

Чтобы оценить эффект нелинейных взаимодействий волновых движений в атмосфере, были изучены слагаемые в балансе возмущения потенциальной энтропии. Общая форма уравнения баланса была получена в случае отказа от квазигеострофического приближения с использованием возмущения потенциального вихря Эртеля. Были также учтены слагаемые, содержащие возмущение вертикальной составляющей скорости геострофического ветра. Для того чтобы показать поведение слагаемых в балансе вихревой потенциальной энтропии, было решено рассмотреть данные реанализа ERA5 Европейского центра среднесрочных прогнозов (ECMWF). Расчеты производились для зимы 2012–2013 года, когда наблюдалось сильное внезапное стратосферное потепление (ВСП). Во время этого явления волновая активность обычно усиливается. В первой половине января 2013 года произошло сильное увеличение амплитуды СПВ1 и 2, сопровождающееся изменением среднего зонального потока в стратосфере. Как следствие несколько дней спустя наблюдалось сильное стратосферное потепление.

Первые результаты расчета в балансе вихревой потенциальной энтропии показали существенный вклад слагаемых, содержащих возмущение вертикальной составляющей скорости геострофического ветра. Эти слагаемые, в свою очередь, могут влиять на баланс во время событий ВСП и/или в случае нелинейного взаимодействия между высокочастотными

планетарными волнами. Кроме того, расчеты показали необходимость преобразования слагаемых, отвечающих за взаимодействие волна-средний поток, чтобы правильно описывать нелинейные взаимодействия как СПВ, так и солнечных приливов.

Analysis of planetary wave interactions during SSW events in the middle and upper atmosphere

K.A. Didenko¹ (didenko.xeniya@yandex.ru), A.I. Pogoreltsev¹, G.M. Shved²

¹Russian State Hydrometeorological University, 79 Voronezhskaya str., 192007 Saint-Petersburg, Russia

²Saint-Petersburg State University, Physics Faculty, 7/9 Universitetskaya nab., 199034 Saint-Petersburg, Russia

In the atmosphere, there is a relationship between changes in the amplitudes of stationary planetary waves with zonal wave numbers 1 and 2 (SPW1 and SPW2). This relationship is mainly due to nonlinear wave-wave and wave-mean flow interactions. In addition to the interactions of SPW1 and SPW2 between themselves and with the mean flow, they interact with high-frequency planetary waves – diurnal or semidiurnal migrating tide, generating diurnal and semidiurnal non-migrating tide.

To estimate the effect of nonlinear interactions of wave motions in the atmosphere, the terms in the eddy enstrophy balance equation were investigated. The general form of the balance equation was obtained in case of quasi-geostrophic approximation refusal, using the perturbation of the Ertel's potential vorticity. The terms containing the perturbation of the vertical component of the wind speed were also taken into account. In order to show the behavior of different terms in the balance of potential enstrophy, it was decided to consider the ERA5 reanalysis data of the European Center for Medium-Range Forecasts (ECMWF). Calculations were made for the winter 2012–2013, when a strong sudden stratospheric warming (SSW) was observed. Wave activity usually intensifies during this phenomenon. In the first half of January 2013, there was a strong increase in the amplitude of SPW1 and 2, which was accompanied by reversal of the zonal mean flow in the stratosphere. As a consequence, the sudden stratospheric warming was observed several days later.

The first results of the calculation in the eddy potential enstrophy balance equation demonstrate a significant contribution of terms containing the perturbation of the vertical component of the wind speed. These terms, in turn, can affect the balance during SSW events and/or in the case of nonlinear interaction between higher-frequency planetary waves. In addition, the calculations showed the need of reexpression the terms responsible for the wave-mean flow interaction for a correct description of nonlinear interactions for both the SPW and solar tides.

Сравнение значений скорости ветра в верхней атмосфере, полученных на основе данных оптических и радиофизических наблюдений и моделей

Артамонов М.Ф. (artamonov.maksim@iszf.irk.ru), Васильев Р.В., Медведев А.В.,
Ратовский К.Г., Толстиков М.В.

Институт солнечно-земной физики СО РАН, ул. Лермонтова 126-а, 664033 Иркутск, Россия

Восстановление значений полного вектора скорости ветра в верхней атмосфере с помощью наземных средств измерений задача нетривиальная, и сравнение этих величин, полученных на географически близко расположенных инструментах, имеющих разный принцип действия, является одним из лучших методов верификации. В настоящем исследовании ставилась цель провести покомпонентный сравнительный анализ значений ветров на высотах ~ 250 км, ~ 100 км и ~ 90 км, восстановленных при помощи интерферометра Фабри-Перо КЕО Scientific «Arinae», Иркутского радара некогерентного рассеяния, дигизонда DPS4, метеорного радара МК-31. Решение задачи стало возможным благодаря наличию данных разных инструментов за достаточно большой период – с 2010 по 2019 гг. Интерферометр Фабри-Перо использовался для наблюдения собственного свечения

ночного неба с длинами волн 557.7 нм, 630.0 нм и 843 нм (зеленая, красная линии атомарного кислорода и инфракрасная линия гидроксила с максимумами высвечивания на высотах ~ 100 км, ~ 250 км и ~ 90 км соответственно) и определения ветра по доплеровскому смещению линии при наблюдении с разных ракурсов (пяти). Данные радиофизических инструментов – Иркутского радара некогерентного рассеяния и дигизонда DPS4 – использовались совместно. Вектор скорости на высоте ~ 250 км восстанавливался косвенно из параметров внутренних гравитационных волн (ВГВ), наблюдаемых с помощью этих инструментов. Метеорный радар МК-31 позволил исследовать скорость метеорных следов на высотах ~ 90 км по доплеровскому сдвигу частот радиолокатора. Помимо экспериментальных, для сравнения использовались данные моделей HWM14 (Horizontal Wind Model 2014) и GITM2 (Global Ionosphere Thermosphere Model v.2).

В ходе сравнительного анализа поведения усредненных скоростей ветров по времени суток для зональных (до 75 м/с) и меридиональных (до 60 м/с) компонент было выявлено хорошее соответствие как между отдельными инструментами, так и данных инструментов с используемыми моделями. Напротив, полученные значения вертикального ветра в ~ 10 м/с хорошо коррелировали у интерферометра Фабри-Перо и Иркутского радара некогерентного рассеяния с дигизондом, но не совпадали со значениями используемой модели GITM2, позволяющей моделировать вертикальные ветры. Были обнаружены суточные вариации вертикального ветра ~ 10 м/с на высотах ~ 250 км и сезонные вариации на высотах ~ 100 км. По итогам проведенного анализа меридиональных, зональных и вертикальных компонент ветров, накопленных за три года, сделано предположение о наличии циркуляционных ячеек на высотах порядка 100 км и 250 км с временами эволюции один год и одни сутки, соответственно. В верхней атмосфере, на высотах ~ 250 км двумя инструментами подтверждается наличие вертикального ветра в ~ 10 м/с, что превышает значения, предсказываемые моделью.

Результаты наблюдений получены с использованием оборудования Центра коллективного пользования «Ангара» <http://ckpr-rf.ru/ckpr/3056/>. Обработка результатов радиофизических наблюдений выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ №18-05-00594 А, обработка результатов оптических наблюдений выполнена в рамках базового финансирования программы ФНИ П.16.

Comparison of wind speed values in the upper atmosphere obtained from optical and radiophysical observations and models

M.F. Artamonov (artamonov.maksim@iszf.irk.ru), R.V. Vasilyev, A.V. Medvedev,
K.G. Ratovsky, A.V. Tolstikov

Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS, 126 Lermontov str., 664033 Irkutsk, Russia

Restoring the values of the total wind velocity vector in the upper atmosphere using ground-based measuring instruments is a nontrivial task, and comparing these values obtained on geographically closely spaced instruments having a different principles of operation is one of the best verification methods. This study goal was to carry out an component-wise comparative analysis of wind values at heights of ~ 250 км, ~ 100 км and ~ 90 км, reconstructed using a KEO Scientific “Arinae” Fabry-Perot interferometer (FPI), Irkutsk Incoherent Scatter Radar (IISR), ionosonde DPS4, meteor radar MK- 31. The data from these tools were accumulated for a fairly long period – from 2010 to 2019 for different ones. The FPI was used to observe the night airglow with wavelengths of 557.7 nm, 630.0 nm and 843.0 nm (green, red lines of atomic oxygen and an infrared line of hydroxyl with emission maxima at altitudes of ~ 100 км, ~ 250 км and ~ 90 км respectively) and the subsequent winds calculation using the Doppler shift of the line watched from different angles (just five). The data of radiophysical instruments – IISR’s and DPS4’s – were used together. The velocity vector at an altitude of ~ 250 км was reconstructed indirectly from the parameters of internal gravitational waves (IGWs) observed with these tools. The meteor radar MK-31 was used to investigate the speed of meteor tracks at altitudes of ~ 90 км from the Doppler radar

frequency shift. In addition to the experimental ones, data of HWM14 (Horizontal Wind Model 2014) and GITM2 (Global Ionosphere Thermosphere Model v.2) models were used for comparison.

Comparative analysis of an average wind speeds behavior by time of day, for the zonal (up to 75 m/s) and meridional (up to 60 m/s) components showed a good agreement between both individual instruments and these instruments with the models used. On the contrary, the obtained values of the vertical wind at ~ 10 m/s correlated well with the FPI and the IISR in conjunction with PS4, but did not coincide with the values predicted by the GITM2, which allows simulating vertical winds. Daily variations of vertical wind ~ 10 m/s at altitudes ~ 250 km and seasonal variations at altitudes ~ 100 km were found. According to the analysis results of the meridional, zonal and vertical wind components accumulated over three years, it has been suggested that there are circulation cells at altitudes of about 100 km and 250 km with evolution times of one year and one day, respectively. In the upper atmosphere, at altitudes of ~ 250 km, two instruments confirm the presence of a vertical wind of ~ 10 m/s, which exceeds the values predicted by the model GITM2.

The observation results were obtained using the equipment of CUC «Angara» <http://ckp-rf.ru/ckp/3056/>. Processing of the IISR and DPS4 radiophysical data were performed at the financial support RFBR grant №18-05-00594 A. Processing of the optical data was performed with budgetary funding of Basic Research program II.16.

Параметры долгоживущих метеорных следов, полученные по данным оптических и радиофизических наблюдений

Васильев Р.В. (roman_vasilyev@iszf.irk.ru), Белецкий А.Б., Еселевич М.В.,
Мерзляков Е.Г., Михалёв А.В., Подлесный А.В.

Институт солнечно-земной физики СО РАН, ул. Лермонтова 126-а, 664033 Иркутск, Россия

Долгоживущие метеорные следы, образующиеся в результате сгорания и взрыва крупных болидов в верхней атмосфере Земли, наблюдаются достаточно редко, поэтому такие события уникальны, и их природа в настоящее время до конца не ясна. Патрульные наблюдения за быстрыми геофизическими явлениями, выполняющиеся в ИСЗФ СО РАН в последние два года в рамках проекта по исследованию быстрых оптических вспышек в атмосфере Земли, позволили выявить четыре события такого рода, преимущественно из потока Леонидов.

Стереоскопические наблюдения событий позволили составить картину распространения светящегося следа в верхней атмосфере, характер которой говорит о том, что наблюдаемые долгоживущие следы движутся не под действием ветра, дующего на высоте их распространения. По всей видимости, такие явления являются ударной волной, свечение которой происходит в результате интенсификации химических реакций на уплотнённом волновом фронте. Результаты радиофизических наблюдений метеорных следов указывают на то, что светящаяся и зараженная компоненты следа имеют различную динамику и, следовательно, различную физико-химическую природу.

Результаты наблюдений получены с использованием оборудования Центра коллективного пользования «Ангара» <http://ckp-rf.ru/ckp/3056/>. Обработка результатов оптических наблюдений выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ №17-05-00492 А. Обработка результатов радиофизических наблюдений и определение фоновых параметров атмосферы выполнены в рамках базового финансирования программы ФНИ II.16.

Parameters of long-lived meteor trails obtained from optical and radio-physical observation data

R.V. Vasilyev (roman_vasilyev@iszf.irk.ru), A.B. Beletsky, M.V. Eselevich,
E.G. Merzlyakov, A.V. Mikhalev, A.V. Podlesnyi

Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS, 126 Lermontov str., 664033 Irkutsk, Russia

Long-lived meteor trails are the results of the burn or blast of the relatively large meteoroids in the Earth's upper atmosphere. They are unique and rarely observed so the nature of the events is not fully defined now. The patrol observations for search fast optical flashes in the Earth's atmosphere performed by the ISTP SB RAS in the framework of project dedicated to investigating fast atmospheric phenomena got us four such events mostly arrived from Leonides meteor flux.

Stereoscopic observations allow us to build up the picture of the trail propagation in the upper atmosphere, and the character of the picture tells us that observed long-lived trails move not due to the wind blowing at their height. Apparently such events are the shock waves and the glowing of the waves is due to the intensification of the chemical reactions in the dense wave front. The radiophysical observations shows the different dynamic of meteor trails in compared with the optical data so they apparently have different physico-chemistry nature.

The observational results are obtained using equipment of "CKP-Angara" <http://ckp-rf.ru/ckp/3056/>. Processing of the optical data were performed at the financial support RFBR grant №17-05-00492 A. Processing of the radiophysical data and defining the background parameters of the atmosphere were performed at the financial support of base program FNI II.16.

Вариации ионосферы во время метеорологических возмущений в Калининградской области

Карпов М.И. (mikhailkarpov@hotmail.com), Борчевкина О.П., Карпов И.В.,
Якимова Г.А., Коренькова Н.А.

*КФ Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН,
ул. Пионерская 61, 236035 Калининград, Россия*

Представлены результаты мониторинга параметров атмосферы и ионосферы во время метеорологических возмущений в Калининградской области. Для анализа локальных вариаций использовались измерения полного электронного содержания (ПЭС) ионосферы собственным приемником сигналов глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС), а также измерения критической частоты F2-слоя методом вертикального зондирования. Для анализа пространственно-временных вариаций использовались измерения ПЭС ионосферы с помощью европейской сети ГНСС и реанализ метеонаблюдений.

Показано, что во время усиления ветра до 17 м/с и более наблюдаются локальные увеличения ПЭС, достигающие двух и более среднеквадратичных отклонений от спокойных значений. Увеличения критической foF2 не превышали 1.6 от среднеквадратичного отклонения. Возмущения ионосферы наблюдались в течение светлого времени суток на протяжении 2–3 часов. Отмечаются также случаи понижения ПЭС и foF2 относительно фоновых значений на 33% и 15%, соответственно. Размеры возмущенной области достигали нескольких сотен километров, при этом проявлялись и в приэкваториальных широтах. Обсуждаются механизмы генерации наблюдаемых возмущений, в т.ч. посредством распространения акустико-гравитационных волн от приземного источника, и их диссипации на высотах 180–200 км.

Работа выполнена при финансовой поддержке грантов РФФИ 18-05-00184 а.

Variations of the ionosphere during meteorological disturbances in the Kaliningrad region

M.I. Karpov (mikhailkarpov@hotmail.com), O.P. Borchevkina, I.V. Karpov, G.A. Yakimova,
N.A. Korenkova

*Branch of N.V. Pushkov Institute of Earth Magnetism, Ionosphere and Radio-Wave Propagation, 61
Pionerskaya str., 236016 Kalinigrad, Russia*

The results of the atmosphere and ionosphere monitoring during meteorological disturbances in the Kaliningrad region are presented. For the analysis of local variations, measurements of the total electron content (TEC) by the own global navigation satellite systems (GNSS) receiver, as well as measurements of the critical frequency of the F2-layer (foF2) by the vertical sounding were used. For the analysis of the spatio-temporal variations, TEC estimations derived by the European GNSS network and the reanalysis of meteorological observations were used.

It is shown, that during wind amplifications up to 17 m/s and more, local increases in TEC are observed, reaching two or more standard deviations from the quiet values. Increases in foF2 did not exceed 1.6 of the standard deviation. Perturbations of the ionosphere were observed during daylight for 2–3 hours. Decrease in TEC and foF2 relative to background values by 33% and 15%, respectively, were registered in some cases. The size of the perturbed region reached several hundred kilometers, and it also manifested itself in the near-equatorial latitudes. The generation mechanisms of observed disturbances, including the propagation of acoustic-gravitational waves from the near-surface source, and their dissipation at heights of 180–200 km are discussed.

The work was supported by the Russian Foundation for Basic Research (grant No. 18-05-00184 a).

Влияние напряженности геомагнитного поля и положения его полюсов на параметры верхней атмосферы Земли

Клименко М.В.¹ (maksim.klimenko@mail.ru), Клименко В.В.¹, Бессараб Ф.С.¹,
Суходолов Т.В.^{1,2,3}, Розанов Е.В.^{1,2,3}

¹*КФ института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН,
ул. Пионерская 61, 236017 Калининград, Россия*

²*Physikalisch-Meteorologisches Observatorium, World Radiation Center, Davos, Switzerland*

³*Institute for Atmospheric and Climate Science, ETH Zurich, Zurich, Switzerland*

В данной работе представлены результаты модельных расчетов влияния изменения напряженности и конфигурации геомагнитного поля на систему термосфера-ионосфера. Результаты получены с использованием моделей ГСМ ТИП и EAGLE, которая включает в себя модель ГСМ ТИП в виде блока расчета параметров верхней атмосферы и электрического поля магнитосферного и ионосферного происхождения. С использованием модели ГСМ ТИП были проведены расчеты параметров системы термосфера-ионосфера для условий 22 декабря 2009 г. Расчеты проводились до получения установившегося решения. Было рассмотрено 5 вариантов модельных расчетов: 1) базовый вариант; 2) вариант с базовой конфигурацией геомагнитного поля и напряженностью, уменьшенной в 2 раза; 3) вариант с базовой конфигурацией геомагнитного поля и напряженностью, уменьшенной в 5 раз; 4) вариант с базовым значением напряженности геомагнитного поля и совмещенными осями геомагнитного диполя и вращения Земли; 5) вариант с базовым значением напряженности геомагнитного поля и смещением геомагнитных полюсов на географический экватор.

Модельные исследования показали, что уменьшение напряженности геомагнитного поля приводит: 1) к усилению экваториальной аномалии вследствие углубления провала на геомагнитном экваторе и к смещению гребней аномалии от экватора; 2) к ослаблению динамо электрического поля и в то же время к росту скорости вертикального электромагнитного дрейфа на низких широтах за счет уменьшения напряженности магнитного поля; 3) к ослаблению вечернего всплеска восточного электрического поля, что

приводит к усилению в это время обратного фонтан-эффекта; 4) к усилению проникновения электрического поля магнитосферной конвекции к экватору в утреннем секторе местного времени; 5) к смещению главного ионосферного провала к экватору. При совмещении географической и геомагнитной осей заметно ослабляются долготная и УТ вариации ионосферных параметров. Главный ионосферный провал и экваториальная аномалия практически одинаково проявляются на всех долготах.

Наиболее необычные и интересные для интерпретации результаты были получены при помещении геомагнитных полюсов на географический экватор. В этом случае, экваториальная аномалия формируется в области летнего географического полюса с минимумом в геомагнитном полюсе и гребнями на геомагнитных широтах $\pm 15 - 20^\circ$. Главный ионосферный провал проявляется как в северном, так и в южном геомагнитном полушарии. Механизм формирования зимней аномалии четко проявляется в долготной структуре распределения O/N_2 в магнитной системе координат. Скорость меридионального ветра в достаточно большой области летнего полушария направлена от летнего полюса к зимнему. Зональное электрическое поле на средних, низких и экваториальных широтах имеет четко выраженную четырехволновую структуру в долготном распределении в магнитной системе координат. В высоких геомагнитных широтах долготная вариация зонального электрического поля представляет собой структуру с одним максимумом.

С использованием модели EAGLE было проведено два варианта модельных расчетов: 1) базовый вариант; 2) вариант с базовым значением напряженности геомагнитного поля и совмещенными осями диполя и вращения Земли. Сравнение результатов расчетов моделей EAGLE и ГСМ ТИП в очередной раз подтвердило ключевую роль атмосферно-ионосферного взаимодействия в формировании четырехволновой структуры долготных вариаций ионосферных параметров в низкоширотной ионосфере. Эта особенность в долготном распределении ионосферных параметров лучше проявляется при совпадении географической и геомагнитной осей.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ №17-17-01060.

Influence of the poles position of geomagnetic field and its intensity on the parameters of the Earth's upper atmosphere

M.V. Klimenko¹ (maksim.klimenko@mail.ru), V.V. Klimenko¹, F.S. Bessarab¹,
T.V. Sukhodolov^{1,2,3}, E.V. Rozanov^{1,2,3}

¹Branch of N.V. Pushkov Institute of Earth Magnetism, Ionosphere and Radio-Wave Propagation, 61 Pionerskaya str., 236016 Kalinigrad, Russia

²Physikalisch-Meteorologisches Observatorium, World Radiation Center, Davos, Switzerland

³Institute for Atmospheric and Climate Science, ETH Zurich, Zurich, Switzerland

⁴Instituto de Astrofísica de Andalucía, CSIC, Granada, Spain

This report presents the model calculation results of the effect of changes in the intensity and configuration of the geomagnetic field on the thermosphere-ionosphere system. These results were obtained with using the Global Self-consistent Model of the Thermosphere, Ionosphere, Protonosphere (GSM TIP) and new Entire Atmosphere GLocal model (EAGLE), which includes a GSM TIP model in the form of a unit for calculating the upper atmosphere parameters and the electric field of magnetospheric and ionospheric origin. We performed GSM TIP model runs for the December 22, 2009. At that the steady-state solution was obtained. In total, we performed 5 model runs using GSM TIP: 1) basic variant; 2) variant with the basic configuration of geomagnetic field and geomagnetic field intensity, reduced by 2 times; 3) variant with the basic configuration of the geomagnetic field and its intensity reduced by 5 times; 4) variant with the base geomagnetic field intensity and the coinciding magnetic and geographic poles; 5) variant with the base geomagnetic field intensity placing geomagnetic poles at the geographic equator.

Our model studies have shown that reducing the intensity of the magnetic field results in: 1) an enhance the equatorial ionization anomaly due to the form of deepening the trough at the geomagnetic equator and a displacement of the anomaly crests from the equator; 2) a weakening the

dynamo electric field and at the same time an increasing the vertical velocity of the electromagnetic drift at low latitudes due to reducing the magnetic field strength; 3) a weakening of the pre-reversal enhancement of the eastward electric field, which leads to an increase in the reverse plasma-fountain effect at this time; 4) an increasing the prompt penetration of the magnetospheric convection electric field to the equator in the morning sector of local time; 5) a shifting the main ionospheric trough to the equator. At the matching of the geographic and geomagnetic poles, the longitudinal and UT variations are noticeably weakened. The main ionospheric trough and equatorial ionization anomaly are almost unchanged with longitude.

The most unusual and interesting for interpretation results were obtained when we placed the geomagnetic poles at the geographic equator. In this case, the equatorial ionization anomaly forms in the region of the summer geographic pole with a minimum in the geomagnetic pole and its crests are formed at $\pm 15 - 20^\circ$ of geomagnetic latitude. The main ionospheric trough is formed both in the northern and southern geomagnetic hemispheres. The formation mechanism of the F region winter anomaly is clearly manifested in the longitudinal structure of the O/N₂ distribution in the magnetic coordinate system. The meridional wind velocity in the summer hemisphere is directed from the summer pole to the winter one. The zonal electric field at middle, low and equatorial latitudes has a clear four-peak longitudinal structure in the magnetic coordinate system. At high geomagnetic latitudes, the longitudinal variation of the zonal electric field has a structure with one maximum.

In addition we performed two EAGLE model runs: 1) basic variant; 2) variant with the base geomagnetic field intensity and the coinciding magnetic and geographic poles. Comparison of the EAGLE and GSM TIP model's results once again confirmed that the atmosphere-ionosphere coupling play the key role in the formation of the four-peak structure in the longitudinal variations of the ionospheric parameters in the low-latitude ionosphere. This feature in the longitudinal distribution of ionospheric parameters is better manifested when the geographic and geomagnetic poles are matched.

This work was supported by the grant of the Russian Science Fund No. 17-17-01060.

Высотно-сезонные структуры суточного и полусуточного приливов по данным метеорных радаров в Казани (56° N, 49° E) и Колме (51° N, 13° E)

Коротышкин Д.В.¹ (dmitry-kor@mail.ru), Мерзляков Е.Г.^{1,2}, Ch. Jacobi³, F. Lilienthal³

¹Казанский (Приволжский) федеральный университет, Кремлевская ул. 18, 420008 Казань, Россия

²Институт экспериментальной метеорологии НПО "Тайфун", ул. Победы 4, 249038 Обнинск, Россия

³Институт Метеорологии, Университет Лейпцига, г. Лейпциг, Германия

Совместные ветровые наблюдения верхней мезосферы–нижней термосферы в Казани (Россия, 56° N, 49° E) и Колме (Германия, 51°N, 13°E) выполняются с июля 2015 года на одинаковых метеорных радаров типа Skiymet. Радары расположены практически на одной широте, но имеют значительный долготный разнос (36 градусов или около 2700км).

С помощью гармонического разложения получены временные ряды амплитуд приливов для высотного интервала 80–100 км для более чем трех лет наблюдений (2015–2019 гг.) с малочисленными пропусками в данных (менее нескольких дней каждый). Высотно-сезонная структура среднемесячных значений приливных движений повторяется из года в год. Наблюдаются сильные полусуточные приливы зимой с их ослаблением летом и очень слабые полусуточные приливы. Различаются приливы в Казани и в Колме преимущественно в величинах амплитуд. Суточный прилив весьма слаб в средних широтах. В Колме суточный прилив несколько больше по амплитуде, чем в Казани, а также меридиональный прилив сильнее зонального.

Классический анализ не учитывает временные вариации фазы. В этой работе данный недостаток устранен с помощью анализа временных рядов комплексных амплитуд приливов. Проведен спектральный анализ этих рядов для периодов 2–12 месяцев. Найдены

значительные годовые вариации в амплитуде полусуточного прилива, а также колебания с периодами 3–4 месяца. Эти 3–4-месячные колебания проявляются с сентября по январь (с соответствующей вертикальной длиной волны полусуточного прилива около 20 км) и распространяются вверх со скоростью около 6 км за 100 дней. Складываясь со среднегодовым приливом и годовыми вариациями полусуточного прилива, эти 3–4-месячные колебания в октябре находятся в противофазе, но приблизительно с одинаковыми амплитудами, что приводит к падению амплитуды полусуточного прилива в октябре практически до нуля. Анализ спектров для суточных приливов показывает наличие только среднегодовых, годовых и полугодовых компонентов спектра со значительной их высотной изменчивостью.

Данная работа поддержана грантом РФФИ N 18-505-12048. Ch. Jacobi, F. Lilienthal признательны поддержке Немецкого Научно-Исследовательского Сообщества (грант JA 836/38-1 NOSTHEM).

Height and seasonal structure of diurnal and semi-diurnal tides as seen by meteor radars in Kazan (56° N, 49° E) and Collm (51° N, 13° E)

D.V. Korotyshkin¹ (dmitry-kor@mail.ru), E.G. Merzlyakov^{1,2}, Ch. Jacobi³, F. Lilienthal³

¹Kazan (Volga Region) Federal University, 18 Kremlevskaya str., 420008 Kazan, Russia

²Institute for Experimental Meteorology, 4 Pobeda str., 249038 Obninsk, Russia

³Institute for Meteorology, Universität Leipzig, Leipzig, Germany

Mutual observations of the wind regime of upper mesosphere–lower thermosphere in Kazan (Russia, 56° N, 49° E) and Collm (Germany, 51° N, 13° E) have been performed since July 2015 using Skiymet meteor radars. These radars are situated almost on the same latitude but with significant longitudinal separation (36 degrees or ~ 2700 km).

Time series of tidal wind amplitudes are obtained using harmonics analysis for the 80–100 km height interval and 2015–2019 (more than 3 years) with only small gaps of not more than few days. Height and seasonal distributions of the monthly mean tidal amplitudes have regular structure. We can see strong semidiurnal tides during the winter months and weak semidiurnal tides in the summer. Besides, monthly mean amplitudes of semidiurnal tide are found very small for October. The difference between Kazan and Collm tides is mainly in the magnitudes of tidal amplitudes. The diurnal tide is very weak at mid-latitudes. Over Collm, the diurnal tide is a bit stronger than over Kazan, and the meridional tide is a bit stronger than zonal one.

A classical analysis does not consider phase temporal variations. In this work this lack is eliminated by considering time series of complex tidal amplitudes. We performed the spectral analysis of these complex tidal amplitudes for periods 2–12 months. Strong annual oscillations are found for semidiurnal tides as well as oscillations with periods of 3–4 months. These 3–4 months oscillations appear mainly from September till January (with corresponding vertical wavelength for the tide around 20 km) and propagate upward with speed around 6 km per 100 days. Superposing with the mean annual tide and annual oscillations, those are in opposite phase with a similar amplitude in October that leads to the resulting monthly mean tidal amplitude value to drop to zero. Diurnal tides show only the presence of significant mean annual values and annual and semi-annual oscillations with significant height variability.

The work was partly supported by RFBR through grant 18-505-12048. Ch. Jacobi and F. Lilienthal acknowledge support by DFG through grant JA 836/38-1 (NOSTHEM).

Динамика средних зональных характеристик циркуляции в стратосфере и мезосфере в зимний период

Зоркальцева О.С.¹ (meteorologist-ka@yandex.ru), Мордвинов В.И.¹, Погорельцев А.И.²,
Домбровская Н.С.¹

¹*Институт солнечно-земной физики СО РАН, ул. Лермонтова 126-а, 664033 Иркутск, Россия*

²*Российский государственный гидрометеорологический университет, Малоохтинский пр. д. 98, 195196 Санкт-Петербург, Россия*

В работе по данным архива ERA-interim и расчетам модели средней и верхней атмосферы (МСВА) исследованы динамические процессы в стратосфере и мезосфере. Сопоставление модельных расчетов и данных архива ERA-interim показало, что использованная модель адекватно воспроизводит основные особенности циркуляционных процессов в зимней стратосфере. По данным наблюдений и модельным расчетам выполнен анализ вариаций средних зональных характеристик атмосферы. В стратосфере и мезосфере в диапазоне 10–30 суток выделяются синхронные колебания в температуре, занимающие протяженные широтные зоны по горизонтали и имеющие значительную протяженность по вертикали. Знак вариаций меняется по горизонтали в области струйных течений (и не меняется на экваторе), а по вертикали смена знака происходит в областях стратопавзы и мезопавзы. Характер вариаций практически не зависит от фазы квазидвухлетнего цикла в экваториальной стратосфере. Колебания имеют глобальный масштаб и напоминают колебания в меридиональных ячейках циркуляции со сменой знака вертикальных скоростей через 15–20 суток. С этими квазирегулярными колебаниями циркуляции согласованы динамические процессы разрушения полярного вихря – внезапные стратосферные потепления.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ №17-29-05047.

Dynamics of mean zonal characteristics of circulation in the stratosphere and mesosphere in the boreal winter

O.S. Zorkaltseva¹ (meteorologist-ka@yandex.ru), V.I. Mordvinov¹, A.I. Pogoreltsev²,
N.S. Dombrovskaya¹

¹*Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS, 126a Lermontova str., 664033 Irkutsk, Russia*

²*Russian State Hydrometeorological University, 98 Maloohinsky ave., 195196 Saint-Petersburg, Russia*

In the work, according to the ERA-interim archive data and calculations of the middle and upper atmosphere model (MUAM) were studied dynamic processes in the stratosphere and mesosphere. Comparison of model calculations and data from the ERA-interim archive has shown that the model used adequately reproduces the main features of the circulation processes in the winter stratosphere. According to observational data and model calculations, an analysis of variations in the mean zonal characteristics of the atmosphere was performed. In the stratosphere and mesosphere in the range of 10–30 days, synchronous oscillations in temperature are distinguished, occupying extended latitudinal zones horizontally and having a considerable length along the vertical. The sign of variations varies horizontally in the region of jet streams (and does not change at the equator), while the vertical sign change occurs in the areas of the stratopause and mesopause. The nature of variations is practically independent of the phase of the quasi-two-year cycle in the equatorial stratosphere. Oscillations have a global scale and resemble fluctuations in the meridional circulation cells with a change in the sign of the vertical velocity in 15–20 days. Dynamic processes of destruction of the polar vortex – sudden stratospheric warming – were coordinated with these quasi-regular oscillations of the circulation.

The work is supported by RFBR grant №17-29-05047.

Численное моделирование распространения нестационарных акустико-гравитационных волн через критические уровни в верхнюю атмосферу

Гаврилов Н.М.¹ (n.gavrilov@spbu.ru), Кшевецкий С.П.² (renger@mail.ru)

¹*Санкт-Петербургский государственный университет, физ. фак., Университетская наб. 7/9, 199034 Санкт-Петербург, Россия*

²*Балтийский федеральный университет им. Иммануила Канта, каф. теор. физики, А. Невского ул. 14, 236016, Калининград, Россия*

С использованием численной модели высокого разрешения выполнено моделирование распространения в верхние слои атмосферы акустико-гравитационных волн (АГВ), для которых фоновый профиль ветра содержит критические уровни, где горизонтальная скорость ветра равна горизонтальной фазовой скорости АГВ. Согласно традиционной теории атмосферных волн вблизи этих уровней стремится к нулю вертикальная длина волны, распространяющиеся из тропосферы АГВ сильно диссипируют и не могут доходить до высоких слоев атмосферы. Указанная теория предполагает стационарность волнового процесса, когда амплитуды и другие параметры АГВ не меняются во времени. Численное моделирование выполняется для волновых источников в виде плоских волновых возмущений вертикальной скорости, распространяющихся вдоль земной поверхности. После включения волнового источника возникает первоначальный импульс АГВ, который в течение нескольких минут распространяется до высот 100 км и выше и диссипирует там под действием сильной вязкости и теплопроводности. Вслед за этим возникает интервал установления волнового процесса на всех высотах атмосферы, который может длиться до нескольких десятков периодов волнового источника. Во время этого переходного периода волновой процесс имеет нестационарный характер.

Результаты численного моделирования показывают, что критические уровни фонового ветра не являются непроницаемыми барьерами для нестационарных неустановившихся АГВ. Такие волны могут распространяться до больших высот и оказывать существенное влияние на динамический и тепловой режим верхней атмосферы.

Данное исследование было поддержано Российским фондом фундаментальных исследований (грант № 17-05-00458).

Numerical simulation of the propagation of nonstationary acoustics-gravity waves through the critical levels into the upper atmosphere

N.M. Gavrilov¹ (n.gavrilov@spbu.ru), S.P. Kshevetskii² (renger@mail.ru)

¹*Saint-Petersburg State University, Physics Faculty, 7/9 Universitetskaya nab., 199034 Saint-Petersburg, Russia*

²*Immanuel Kant Baltic Federal University, Theoretical Physics Department, 14 Alexander Nevsky Str., 236016, Kaliningrad, Russia*

The high-resolution numerical model is used to simulate the propagation of acoustic-gravitational waves (AGWs) to the upper atmosphere layers for which the background wind profile contains critical levels, where the horizontal wind velocity is equal to the horizontal AGW phase velocity. According to traditional theories of atmospheric waves, vertical wavelengths approaches to zero near critical levels and AGWs propagating from the troposphere are strongly dissipated and they cannot reach the upper atmosphere. The mentioned theories assume stationary wave process, when the amplitudes and other AGW parameters do not change in the time. Numerical simulations are carried out for the wave sources in the form of plain wave perturbations of vertical velocity, which are propagating along the earth's surface. After the switching on the wave source, initial AGW pulses appear, which during several minutes may propagate to altitudes 100 km and above, where they dissipate under the action of strong viscosity and thermal conductivity. Following interval of the establishment of the wave process at all heights of the atmosphere, can last up to several tens periods of the wave source. During this transition interval, wave process is non-stationary.

Results of the numerical simulation show that the critical levels of background wind are not barriers for unsteady AGW. Such waves can propagate to high altitudes and have an essential effect the dynamic and thermal conditions in the upper atmosphere.

This study was supported by the Russian Basic Research Foundation (grant #17-05-00458).

Исследование влияния солнечной активности на стационарные планетарные волны в средней атмосфере

Коваль А.В.¹ (koval_spbu@mail.ru), Гаврилов Н.М.¹, Погорельцев А.И.²

¹Санкт-Петербургский государственный университет, физ. фак., Университетская наб. 7/9, 199034
Санкт-Петербург, Россия

²Российский государственный гидрометеорологический университет, Воронежская ул. 79, 192007
Санкт-Петербург, Россия

Перенос энергии атмосферными волнами планетарного масштаба является одним из наиболее важных факторов динамики и теплового режима атмосферы. В данном исследовании мы выполняем численное моделирование общей циркуляции атмосферы с использованием трехмерной нелинейной модели общей циркуляции средней и верхней атмосферы МСВА. Моделирование циркуляции производится на высотах от поверхности до 300 км. Чтобы учесть изменения солнечной активности (СА), в модели задаются различные значения потока радиоизлучения Солнца на длине волны 10.7 см. Чтобы учесть влияние заряженных частиц в ионосфере, в МСВА внедрены ионосферные проводимости для различных уровней СА, и учтены их пространственные и временные зависимости. Основное внимание уделено изучению изменений амплитуд стационарных планетарных волн (СПВ) с зональными волновыми числами 1–4 в средней атмосфере при различной солнечной активности для января–февраля. Для анализа результатов численного моделирования рассчитаны показатели преломления СПВ и потоки Элиассена-Пальма.

Численное моделирование показывает, что амплитуды СПВ в средней атмосфере значительно различаются для разных уровней солнечной активности. Максимальные изменения амплитуд СПВ достигают 10% на средних широтах северного полушария. Различия в пространственных структурах СПВ соответствуют рассчитанным изменениям показателей преломления для СПВ и потокам Элиассена-Пальма.

Investigation of the influence of solar activity on the stationary planetary waves in the middle atmosphere

A.V. Koval (koval_spbu@mail.ru), N.M. Gavrilov¹, A.I. Pogoreltsev^{1,2}

¹Saint-Petersburg State University, Physics Faculty, 7/9 Universitetskaya nab., 199034 Saint-Petersburg, Russia

²Russian State Hydrometeorological University, 79 Voronezhskaya str., 192007 Saint-Petersburg, Russia

Energy transfer by atmospheric planetary-scale waves is one of the important factors of atmospheric dynamics and thermal regime. We perform numerical modeling of the atmospheric general circulation using improved three-dimensional nonlinear circulation model of the middle and upper atmosphere MUAM, covering the altitudes from the surface to 300 km. In order to take into account changes in solar activity (SA), various values of the solar radio emission flux at a wavelength of 10.7 cm are set in the model. To include the influence of charged particles in the ionosphere on the neutral gas dynamics, conductivities of the ionosphere and their longitudinal, latitudinal and temporal dependences are calculated for different SA levels and implemented into the MUAM. We focus on changes in amplitudes of stationary planetary waves (SPW) with zonal wave numbers of 1–4 in the middle atmosphere under different solar activity for January–February. To analyze the results of the numerical simulation, the planetary wave's refractivity indices and Eliassen-Palm fluxes are calculated.

Numerical simulations show that SPW in the middle atmosphere vary significantly for the different solar activity levels. Maximum changes in SPW amplitudes reach 10% at middle latitudes

of Northern hemisphere. Differences in the SPW structures correspond to the calculated changes in the refractivity indices of the atmosphere for the SPW and their Eliassen-Palm fluxes.

Долгопериодные изменения интенсивности мезомасштабных вариаций вращательной температуры гидроксила вблизи мезопаузы как индикатор динамических процессов в нижележащих слоях атмосферы

Попов А.А.¹, Гаврилов Н.М.¹ (n.gavrilov@spbu.ru), Перминов В.И.² (v.i.perminov@yandex), Перцев Н.Н.², Медведева И. В.³

¹Санкт-Петербургский государственный университет, физ. фак., Университетская наб. 7/9, 199034 Санкт-Петербург, Россия

²Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Пыжевский пер. 3, 119017 Москва, Россия

³Институт солнечно-земной физики СО РАН, ул. Лермонтова 126а, 664033 Иркутск, Россия

Метод цифровых разностных фильтров использован для анализа данных спектральных наблюдений вращательной температуры колебательно-возбужденного гидроксила на высотах 85–90 км на Звенигородской научной станции ИФА РАН (56° с.ш., 37° в.д.) в 2004–2016 гг. и в Геофизической обсерватории ИСЗФ СО РАН (52° с.ш., 103° в.д., Торы) в 2012–2017 гг. Исследованы сезонные и междугодовые изменения средней температуры и интенсивности вариаций в области периодов 0.4–5.4 ч. Эти изменения могут быть связаны с распространением внутренних гравитационных волн (ВГВ) в области мезопаузы. Для выделения мезомасштабных вариаций использована численная фильтрация путем вычисления разностей между последовательными значениями вращательной температуры ОН, осредненных по интервалам длительностью 0.17–2 ч. Вычисляются среднемесячные значения и относительные дисперсии полученных разностей. С помощью полуэмпирических формул вводятся поправки для исключения инструментальных шумов. По формулам теории ВГВ оцениваются амплитуда колебаний скорости и волновая энергия для каждого календарного месяца наблюдений ночного свечения гидроксила.

Выявлено, что среднемесячные дисперсии мезомасштабных вариаций вращательной температуры ОН по данным ст. Торы больше, чем в Звенигороде. В среднем сезонном ходе относительных мезомасштабных дисперсий наблюдаются два максимума – зимой и летом, причем для ст. Торы летний максимум сдвинут ближе к весенним месяцам. Причинами расхождений могут быть различия орографии и струйных течений в нижней и средней атмосфере, а также различия в спектрах горизонтальных длин ВГВ из-за различий геометрии наблюдений на обсерваториях Торы и Звенигород.

Данная работа была поддержана Российским фондом фундаментальных исследований №17-05-00458. Использованы экспериментальные данные ЦКП «Ангара» <http://ckp-rf.ru/ckp/3056/> (данные наблюдений на ст. Торы), полученные в рамках базового финансирования программы ФНИ П.16.

Long-term changes in the intensity of mesoscale variations in hydroxyl rotational temperature near the mesopause as indicators of dynamic processes in the underlying atmosphere

A.A. Popov¹, N.M. Gavrilov¹ (n.gavrilov@spbu.ru), V.I. Perminov² (v.i.perminov@yandex), N.N. Pertsev², I.V. Medvedeva³

¹Saint-Petersburg State University, Physics Faculty, 7/9 Universitetskaya nab., 199034 Saint-Petersburg, Russia

²A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics RAS, 3 Pyzhevsky per., 119017 Moscow, Russia

³Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS, 126a Lermontov st., 664033 Irkutsk, Russia

We used the method of digital difference filters for the data analysis of the spectral observations of the rotational temperature of vibrationally excited hydroxyl at altitudes 85–90 km at the Zvenigorod scientific station of IAP RAS (56° N, 37° E) in 2004–2016 and at the Geophysical observatory of ISTP SB RAS (52° N, 103° E, Tory) in 2012–2017. Seasonal and interannual

changes in the mean temperature and intensity of variations with periods 0.4–5.4 h are studied. These changes may be associated with the propagation of internal gravity waves (IGWs) in the mesopause region. For the extraction of mesoscale variations, we used numerical filtration by taking differences between the sequential values of the OH rotational temperature, averaged over the intervals by duration from 0.17–2 h. Average monthly values and relative dispersions of the obtained differences are calculated. Semi-empirical formulas are used to include corrections and eliminate instrumental noise. According to the formulas of the IGW theory, the amplitude of the velocity oscillations and the wave energy for each calendar month of observations the hydroxyl nightglow are estimated.

It has been revealed, that the average monthly variances of mesoscale variations in the OH rotational temperature obtained at the Tory station are larger than in Zvenigorod. Average seasonal changes of relative mesoscale variances demonstrate two maxima in winter and in summer, with the summer maximum shifted closer to spring months for the Tory station. The reasons for the differences could be different orography and jet streams in the lower and middle atmosphere, also different spectra of IGW horizontal wavelengths due to different geometry of observations at the Tory and Zvenigorod stations.

This study was supported by the Russian Basic Research Foundation #17-05-00458. Experimental data recorded by the equipment of Center for Common Use «Angara» <http://ckp-rf.ru/ckp/3056/> at the ISTP SB RAS (Tory Station) obtained within the Basic Research program II.16 were used.

Вертикальная структура внутригодовых вариаций температуры в атмосфере над Европейской частью России в 2010 г.: совместный анализ аэрологических и спутниковых данных

Ситнов С.А.¹ (sitnov@ifaran.ru), Мохов И.И.^{1,2}, Лупо А.Р.³

¹Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Пыжевский пер. 3, 119017 Москва, Россия

²Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, физ. факультет, Ленинские горы 1, 119992 Москва, Россия

³Department of Atmospheric Sciences, University of Missouri, Columbia, MO 65211, USA

Анализируются внутригодовые вариации температуры в диапазоне высот от земли до нижней термосферы над европейской частью России в 2010 г. по данным радиозондирования и данным микроволнового лимбового зондирования MLS спутника Ауга. Отмечена противофазность синоптических и внутрисезонных вариаций в тропосфере и нижней стратосфере, в частности, в периоды атмосферных блокирований повышение температуры в тропосфере сопровождается понижением температуры в нижней стратосфере [1, 2]. В средней и верхней атмосфере выявлены вариации температуры, связанные с полугодовым колебанием (ПГК) и внезапным стратосферным потеплением (ВСП) зимнего сезона 2009/2010 гг. Указанные вариации ранее всего проявляются в верхней атмосфере и со временем распространяются вниз до тропопаузы. Скорость опускания вариаций температуры, связанных с ВСП, составляет 0.9–1.3 км/сутки, а вариаций температуры, связанных с ПГК, – 0.3–0.4 км/сутки [3].

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ, соглашение № 14.616.0082 (RFMEFI61617X0082).

1. Sitnov S.A., Mokhov I.I., Lupo A.R. Evolution of water vapor plume over Eastern Europe during summer 2010 atmospheric blocking // *Advances in Meteorology*. 2014. V. 2014. Article ID 253953, 11 pages. doi: 10.1155/2014/253953
2. Sitnov S.A., Mokhov I.I., Lupo A.R. Ozone, water vapor, and temperature anomalies associated with atmospheric blocking events over Eastern Europe in spring–summer 2010 // *Atmospheric Environment*. 2017. V. 164. P.180–194. doi: 10.1016/j.atmosenv.2017.06.004.
3. Sitnov S. A., Mokhov I. I. Vertical structure of temperature variations over European Russia in 2010 derived from MLS satellite observations // *Proc. of SPIE*. 2018. V. 10833. No. 1083396. P. 1–10. doi: 10.1117/12.2501460.

Vertical structure of intra-annual temperature variations over European Russia in 2010: A joint analysis of aerological and satellite data

S.A. Sitnov¹ (sitnov@ifaran.ru), I.I. Mokhov^{1,2}, A.R. Lupo³

²M.V. Lomonosov Moscow State University, Physics Faculty, 1 Leninsky gory, 119234 Moscow, Russia

³Department of Atmospheric Sciences, University of Missouri, Columbia, MO 65211, USA

Intra-annual temperature variations in the altitude range from the ground up to the lower thermosphere over the European part of Russia in 2010 are analyzed using radiosonde measurements and satellite measurements from the microwave limb sounder (MLS) onboard the Aura platform. The variations at synoptic and intra-seasonal scales in the troposphere and lower stratosphere are found to be predominantly in antiphase, in particular, during atmospheric blocking events the troposphere warming is accompanied by cooling of the lower stratosphere [1, 2]. In the middle and upper atmosphere, temperature variations associated with the semiannual oscillation (SAO) and also with sudden stratospheric warming (SSW) of the winter season 2009/2010 are manifested. These variations are revealed in first in the upper atmosphere and descend with time down to the tropopause. The rate of the descent of temperature variations associated with SSW is 0.9–1.3 km/day, whereas that associated with SAO is 0.3–0.4 km/day [3].

This study was supported by the Russian Ministry of Education and Science, agreement № 14.616.21.0082 (RFMEFI61617X0082).

1. Sitnov S.A., Mokhov I.I., Lupo A.R. Evolution of water vapor plume over Eastern Europe during summer 2010 atmospheric blocking // *Advances in Meteorology*. 2014. V. 2014. Article ID 253953, 11 pages. doi: 10.1155/2014/253953
2. Sitnov S.A., Mokhov I.I., Lupo A.R. Ozone, water vapor, and temperature anomalies associated with atmospheric blocking events over Eastern Europe in spring–summer 2010 // *Atmospheric Environment*. 2017. V. 164. P. 180–194. doi: 10.1016/j.atmosenv.2017.06.004.
3. Sitnov S. A., Mokhov I. I. Vertical structure of temperature variations over European Russia in 2010 derived from MLS satellite observations // *Proc. of SPIE*. 2018. V. 10833. No. 1083396. P. 1–10. doi: 10.1117/12.2501460.

Механизм контроля циклонической и муссонной активности на границе Восточной Сибири и Монголии в середине летнего периода

Антохина О.Ю.¹ (olgayumarchenko@gmail.com), Мордвинов В.И.²
(v_mordv@mail.iszf.irk.ru)

¹Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, пл. Ак. Зуева 1, 634055 Томск, Россия

²Институт солнечно-земной физики СО РАН, ул. Лермонтова 126а, 664033 Иркутск, Россия

Циклоническая активность в Монголии и на юге Восточной Сибири вызывает огромный интерес благодаря тому, что эта зона, относящаяся к Саяно-Алтайской области циклогенеза, является местом возникновения глубоких циклонов с максимальной среди всех прочих внетропических циклонов повторяемостью в летний период [1]. Существуют указания на то, что возникновение здесь циклонов и их дальнейшее смещение напрямую определяет интенсивность муссона Восточной Азии, т.н. «сдвиг» на север середины лета [2]. Одним из нерешенных вопросов является вопрос о причинах изменчивости циклонической активности. Для ответа на этот вопрос мы проанализировали изменения со временем суммарных дневных осадков за каждый июль с 1982 по 2016 гг., просуммированных в области бассейна Селенги. Сток Селенги является, на наш взгляд, хорошим интегральным показателем преобладания циклонической и антициклонической активности. Были выбраны 67 событий с сильными осадками (92-ой перцентиль) и 32 засушливых периода. Для анализа были использованы композитные карты, построенные по среднесуточным данным. На первую карту наносилось распределение осадков и линии тока на уровне 850 гПа; на вторую карту – распределение потенциальной температуры на динамической тропопаузе (PV- θ) и линии тока на уровне 500, 250 гПа. Известно, что PV- θ является лучшим индикатором воздушных масс, обладающих различными свойствами [3].

Мы выяснили, что в период формирования и усиления циклонов в исследуемой области находится циклонический прогиб, возникающий при смещении вдоль оси струйного течения (СТ) областей с более низкой, чем окружающая, потенциальной температурой. Распространение этих областей приводит к возникновению и/или усилению фронтальных процессов, в том числе, за счет адвекции воздушных масс из области муссона. Возникающие на фронтах циклоны могут смещаться на восток или северо-восток, где и выпадают основные осадки, но могут и стационарироваться. Источником возмущений с низкой потенциальной температурой является полярная область. Если вторжение полярной воздушной массы (ПВМ) в более низкие широты и смещение на восток вдоль струи барических аномалий происходит быстро, холодный воздух не успевает трансформироваться и хорошо виден на картах (температура воздуха в отсеченных областях ниже 326 К). При более южных траекториях ПВМ трансформируется гораздо сильнее (температура воздуха в ПВМ > 326 К). В случае, если исследуемая область оказывалась под влиянием стационарного антициклона над Монголией, в районе СТ регистрировался антициклонический прогиб, а величина потенциальной температуры была характерной для тропиков, возникала засуха. Причем, как правило, области ПВМ не проникали далеко на восток. Во всех случаях вариации циклонической активности можно было связать с характеристиками Полярного вихря – его глубиной (и, следовательно, интенсивностью струйного течения, «оконтуривающего» Полярный вихрь) и направлением вторжения полярного воздуха (и, следовательно, «конфигурацией» Полярного вихря). Обе эти характеристики Полярного вихря, очевидно, подлежат исследованию в первую очередь.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда проект №17-77-10035.

1. Chen, Shou-Jun, L. Lazić. Numerical Case Study of the Altai-Sayan Lee Cyclogenesis over East Asia // *Meteorology and Atmospheric Physics*. 1990. V. 42, № 3-4. P. 221–229.
2. Chen H., Teng F., Zhang W., Liao H. Impacts of Anomalous Midlatitude Cyclone Activity over East Asia during summer on the Decadal Mode of East Asian Summer Monsoon and Its Possible Mechanism // *Journal of Climate*. 2017. V. 30. P. 739–753.
3. Masato G., Hoskins B.J., Woollings T.J. Wave-breaking characteristics of midlatitude blocking. *Quart. J. Royal Met. Soc.* 2011. V. 138, № 666. P. 1285–1296.

The mechanism of controlling the cyclonic and monsoonal activity on border of Eastern Siberia and Mongolia in the midsummer

O.Yu. Antokhina¹ (olgayumarchenko@gmail.com), V.I. Mordvinov²
(v_mordv@mail.iszf.irk.ru)

¹V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics SB RAS, 1 Ac. Zuev sq., 634055 Tomsk, Russia

²Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS, 126 Lermontov str., 664033 Irkutsk, Russia

The cyclonic activity that occurs in Mongolia and in the south of Eastern Siberia is of great interest due to the fact that this zone belonging to the Sayano-Altai region of cyclogenesis, is the site of the occurrence of deep cyclones with the highest frequency among all other extratropical cyclones in the summer period [1]. There are evidences that the occurrence of cyclones here and their further moving determine the intensity of the East Asian monsoon, so-called "midsummer Northward shift" [2]. To investigate the causes of cyclonic activity variability we have analyzed the total daily precipitation for each July from 1982 to 2016 summarized in the Selenga basin area which is a good indicator of the predominance of cyclonic or anticyclonic activity. 67 events with heavy precipitation (92nd percentile) and 32 dry periods were selected. For the analysis we used composite maps based on daily average data. On the first map, the distribution of precipitation and the streamline at the level of 850 hPa were plotted; on the second map, the potential temperature on the dynamic tropopause (PV- θ) and the streamline at 500 hPa (or 250 hPa) were plotted. It is known that PV- θ is the best indicator of air masses with different properties [3].

We founded that in the period of the formation and amplification of cyclones, a region of cyclone-curved subtropical jet stream was in the area under study. This curvature takes place when the regions with a temperature lower than the surrounding potential temperature move along the jet stream (JS) axis. The moving of this specific θ -area leads to the formation and/or amplification of

the frontal processes (including, due to the advection of air masses from the monsoon region). The cyclonic series could shift to the east or northeast, where the main precipitations fall, but they could also be stationary. The source of disturbances with low potential temperature is the polar region. If the advection of polar air mass (PAM) into mid-latitudes (or even subtropical area) and eastward moving along the jet stream of temperature anomalies was rapid, the cold air did not have time to transform and was clearly visible on the maps. The air temperature in the cut-off areas was below 326 K. When PAM's path was more to the south, the PAM transformed much more strongly and the air temperature in the PAM was about 326 K. If the area under study was influenced by a stationary anticyclone centered on Mongolia, the JS had an anticyclonic curvature, and the potential temperature was characteristic for the tropics, and a drought occurred. Moreover, as a rule, the PAM areas seemed to be «stuck» to the west. In all cases, the variations of cyclonic activity can be associated with the characteristics of the polar vortex – with its depth (and therefore with the intensity of the Jet stream around the polar vortex) and with the direction of advection of polar air (and, therefore, with the "configuration" of polar vortex). Obviously, both of these characteristics of the polar vortex are subject to study first of all.

The study was supported by the Russian Scientific Foundation Project No. 17-77-10035.

1. Chen, Shou-Jun, L. Lazić. Numerical Case Study of the Altai-Sayan Lee Cyclogenesis over East Asia // *Meteorology and Atmospheric Physics*. 1990. V. 42, № 3–4. P. 221–229.
2. Chen H., Teng F., Zhang W., Liao H. Impacts of Anomalous Midlatitude Cyclone Activity over East Asia during summer on the Decadal Mode of East Asian Summer Monsoon and Its Possible Mechanism // *Journal of Climate*. 2017. V. 30. P. 739–753.
3. Masato G., Hoskins B.J., Woollings T.J. Wave-breaking characteristics of midlatitude blocking. *Quart. J. Royal Met. Soc.* 2011. V. 138, № 666. P. 1285–1296.

Влияние осцилляции Маддена-Джулиана на динамические процессы в стратосфере во время весенней перестройки циркуляции

Кандиева К.К. (kanykeikandieva@gmail.com), Анискина О.Г., Погорельцев А.И.

Российский государственный гидрометеорологический университет, Воронежская ул. 79, 192007 Санкт-Петербург, Россия

Проведено исследование связи осцилляции Маддена-Джулиана (ОМД) и смены циркуляции стратосферы с зимнего на летний режим. Показано существование значимой корреляционной связи между датами весенней перестройки и амплитудой стационарных планетарных волн с волновыми числами 1 и 2 (СПВ1 и СПВ2). Статистически значимый коэффициент корреляции был получен для амплитуды ОМД и даты ранней весенней перестройки $r = -0.39$ (уровень значимости 95%). Установлено существование линейной связи между слабыми СПВ1, СПВ2 и амплитудой ОМД на высоте 30 км. Коэффициент корреляции Пирсона для ОМД и СПВ1 составил 0.43, для ОМД и СПВ2 – 0.38, связь статистически значима с вероятностью 96%.

На основе полученных результатов можно предположить, что ОМД связана со стационарными волнами с малыми амплитудами, стратосферное струйное течение остается стабильным во время зимнего периода, а дата перестройки циркуляции стратосферы с зимнего на летний режим наблюдается в конце апреля–мае.

Исследование было выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-05-01050.

Influence of the Madden-Julian oscillation on dynamic processes during the spring-time transition of stratosphere circulation

K.K. Kandieva (kanykeikandieva@gmail.com), O.G. Aniskina, A.I. Pogoreltsev

Russian State Hydrometeorological University, 79 Voronezhskaya str., 192007 Saint-Petersburg, Russia

Correlation analysis between the Madden-Julian oscillations (MJO) and the change in the stratospheric circulation from winter to summer regime has been performed. The existence of a

significant correlation between the dates of spring transition and the amplitude of stationary planetary waves with wave numbers 1 and 2 (SPW1 and SPW2) has been shown. A statistically significant correlation coefficient was obtained for the amplitude of the MJO and the date of the early spring transition $r = -0.39$ (a significance level of 95%). The existence of a connection between weak SPW1, SPW2 and the amplitude of MJO at an altitude of 30 km has been established. The Pearson correlation coefficient for MJO and SPW1 was 0.43, for MJO and SPW2 – - 0.38, the relationship is statistically significant with a probability of 96%. Based on the obtained results, it can be assumed that the MJO is associated with stationary waves with small amplitudes, the stratospheric jet stream remains stable during the winter period, and the date of the transition of the stratospheric circulation from winter to summer is observed in late April-May.

The study was carried out with the financial support of the Russian Foundation for Basic Research in the framework of research project No. 18-05-01050.

Поиск признаков атмосферных волн в вариациях силы тяжести по синхронным совмещенным барометрическим и гравиметрическим измерениям

Новиков С.С. (ssn2694ssn@mail.ru), Гаврилов Н.М. (n.gavrilov@spbu.ru),

Швед Г.М. (g.shved@spbu.ru)

Санкт-Петербургский государственный университет, физ. фак., Университетская наб. 7/9, 199034 Санкт-Петербург, Россия

В силу действия закона всемирного тяготения Ньютона гравиметры и сейсмометры реагируют на изменения массы атмосферы над ними и, тем самым, показывают, как меняется сила тяжести за счет атмосферных движений. Сейсмологи исключают влияние синоптических процессов из показаний этих приборов, используя измерения приземного давления атмосферы p_s , синхронные и совмещенные с гравиметрическими измерениями. Сравнением частотных спектров записей показаний барометра и сверхпроводящего гравиметра (СГ) продолжительностью более года также установлено влияние гармоник солнечного теплового прилива S_m (m – номер гармоники), на величину ускорения свободного падения g . Данное исследование является первой попыткой оценить возможность использования гравиметрических измерений в качестве дополнительного метода изучения атмосферных волн в диапазоне периодов ~ 10 мин – ~ 10 ч. Кроме гармоник S_m в данный диапазон периодов попадают также внутренние гравитационные волны (ВГВ) атмосферы. Потенциально гравиметрические измерения могут оказаться в отношении исследования волн более информативными, чем измерения p_s . Это связано с тем, что гравиметры и сейсмометры регистрируют волновое возмущение в *некотором объеме* атмосферы, тогда как барометры дают сведения о волновом процессе только в *одной точке* (у поверхности) при непременном требовании выполнения гидростатичности возмущения, не обязательной для волнового процесса.

В данной работе представлены теоретические оценки возмущения g , создаваемого горными волнами и ВГВ от струй и конвективных облаков. Показано, что чувствительность СГ позволяет регистрировать ВГВ, генерируемые указанными источниками. Выполнен также поиск признаков атмосферных волн в многолетних записях вариаций g и p_s , измеренных на станции Мокса, Германия, (50.6° N, 11.6° E) с использованием СГ и высокочувствительного барометра соответственно. Для определения интенсивности волн в разных областях частотного спектра записей g and p_s применяется цифровая фильтрация путем вычисления разностей между последовательными значениями измеряемых величин, отстоящими один от другого на некоторый временной интервал. Для каждого месяца за 2000–2018 гг. и интервалов 5, 10, 15 и 30 мин и 1, 2, 4 и 8 ч вычислены среднеквадратичные значения указанных разностей для g и p_s . Исследованы межгодовые и сезонные изменения этих среднеквадратичных величин. Наиболее естественное объяснение годового хода возмущения g для всех рассмотренных интервалов требует учета воздействия атмосферных волн на g .

Search for signs of atmospheric waves in the variations of gravity by colocated simultaneous barometric and gravimetric measurements

S.S. Novikov (ssn2694ssn@mail.ru), N.M. Gavrilov (n.gavrilov@spbu.ru),
G.M. Shved (g.shved@spbu.ru)

Saint-Petersburg State University, Physics Faculty, 7/9 Universitetskaya nab., 199034 Saint-Petersburg, Russia

Gravimeters and seismometers react to the change of air mass over them by virtue of Newton's law of universal gravitation and thus show the atmospheric forcing on gravity. Seismologists exclude the influence of synoptic processes from the records of these instruments, using the colocated simultaneous measurements of atmospheric surface pressure p_s . By comparing the frequency spectra of the records of barometers and superconducting gravimeters (SG), lasting over a year, the influence of the harmonics of the solar thermal tide S_m (m is the harmonic number) on the free fall acceleration g has also been defined. This study is the first attempt to assess the possibility of using the gravimetric measurements as an additional method for studying the atmospheric waves in the range of periods of ~ 10 min – ~ 10 h. In addition to S_m harmonics, the internal gravitational waves (IGW) of the atmosphere also fall into this period range. Gravimetric measurements may turn out to be more informative with respect to the study of waves than measurements of p_s . This is due to the fact that gravimeters and seismometers detect a wave *in some volume* of the atmosphere, whereas barometers provide information about the wave only *at one point* (near the surface) with the necessary requirement that the hydrostatic condition for the wave is satisfied. However, this condition for waves is not necessarily fulfilled.

This report presents theoretical estimates of the g perturbation generated by mountain waves and IGWs from jets and convective clouds. It is shown that the sensitivity of SGs allow to detect IGWs generated by these sources. A search was also made for signs of atmospheric waves in many-year records of variations of g and p_s , measured at Moxa, Germany, (50.6° N, 11.6° E), using SG and highly sensitive barometer, respectively. To determine the wave intensity in different regions of the frequency spectra of the g and p_s records, digital filtering is applied by calculating the differences between successive measured values that are separated from one another by some time interval. For each month of 2000–2018 and the intervals of 5, 10, 15, and 30 min and 1, 2, 4, and 8 h, the root-mean-square values of these differences for g and p_s have been calculated. The interannual and seasonal changes of these rms values have been studied. The most natural explanation of the seasonal variation of the g perturbation for all the intervals considered requires taking into account the effect of atmospheric waves on g .

Влияние крупных тропических циклонов 2014 на ионосферу на примере данных спутников SWARM

Захаров В.И.^{1,2} (zvi_555@list.ru), Пилипенко В.А.^{3,4}, Грушин В.А.⁴

¹Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, физ. факультет, Ленинские горы 1, 119992 Москва, Россия

²Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Пыжевский пер. 3, 119017 Москва, Россия

³Институт физики земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Б. Грузинская ул. д. 10/1, 123242 Москва, Россия

⁴Институт космических исследований РАН, ул. Профсоюзная 84/32, 117997 Москва, Россия

На ионосферу Земли оказывает значительное влияние космическая погода. Одновременно считается доказанным, что крупные явления, протекающие в системе геосфера – литосфере и атмосфере – также могут оказывать влияние на ионосферу. Механизмы передачи на ионосферные высоты атмосферных воздействий изучены недостаточно и представляют собой набор нескольких физически оправданных и, в ряде случаев, экспериментально подтверждаемых предположений. Особый интерес при этом имеют поиски влияния на ионосферу сильных метеорологических возмущений, поскольку в этом случае удастся достаточно надежно определить источник возможного влияния. В качестве механизмов передачи воздействия принято рассматривать два. Во-первых,

возникновение атмосферной турбулентности (вихря) сопровождается генерацией волновых, в том числе и акустических, структур, которые распространяются на высоты ионосферы. С другой стороны, турбулентные движения в атмосфере приводят к увлечению заряженных частиц в нижней атмосфере и к локальной генерации электрических токов. Это приводит к возмущениям плотности плазмы на высотах слоя E . Возбуждаемые при этом продольные токи переносят возникшее возмущение в верхнюю ионосферу.

В нашей работе рассмотрены самые крупные тропические тайфуны и циклоны (ТЦ) 2014 г, из которых 6 достигли 5-ой категории по шкале Саффира-Симпсона и 13 – 4-ой. Для изучения проявлений атмосферно-ионосферного взаимодействия созданы оригинальные методы анализа плазменных измерений электронной концентрации, проведенных спутниками SWARM на высотах 450–500 км в спокойных гео-гелиомагнитных условиях. Суть первого метода заключается в рассмотрении ионосферного отклика во временном диапазоне, соответствующем характерным волновым возмущениям в атмосфере, связанным с ТЦ. Второй подход использует возможности системы позиционирования группировки ИСЗ SWARM для оценки пространственных производных электронной концентрации.

Наше рассмотрение показало, что в периоды развития мощных ТЦ наблюдаются различные проявления атмосферно-ионосферных связей, что свидетельствует, скорее всего, о действиях разных механизмов передачи возмущения в ионосферу в разные периоды. Так, нами зарегистрированы колебания электронной концентрации в полосе частот 10...200 сек с локализацией и масштабами, характерными для АГВ. Размер области возмущения в ионосфере в этих случаях больше размеров области шторма. Относительная величина возмущения достигает 10% в выбранной полосе частот. В ряде случаев, методики выделяют области, которые можно объяснить полевыми механизмами передачи возмущения. Более того, в условиях вечерней и ночной ионосферы в ряде случаев наблюдались квази-волноподобные возмущения, захватывающие всю область действия ТЦ. Полученная нами статистика (около 100 различных случаев проявления ионосферно-атмосферных связей) может рассматриваться как иллюстрация сложной системы передачи возмущений разных масштабов из нижней атмосферы на ионосферные высоты, причем она, скорее всего, не исчерпывается только двумя рассмотренными выше механизмами.

Работа выполнена в рамках Государственного задания ИКИ РАН и МГУ, при частичной поддержке грантами РФФИ 18-05-00108 (ПВА) и 19-05-00941 (ЗВИ).

Influence of large tropical cyclones 2014 on the ionosphere with examples of SWARM satellite data

V.I. Zakharov^{1,2} (zvi_555@list.ru), V.A. Pilipenko^{3,4}, V.A. Grushin⁴

¹M.V. Lomonosov Moscow State University, Physics Faculty, 1 Leninsky gory, 119234 Moscow, Russia

²A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics RAS, 3 Pyzhevsky per., 119017 Moscow, Russia

³O.Yu. Schmidt Institute of Physics of the Earth RAS, 10-1 B. Gruzinskaya str., 123242 Moscow, Russia

⁴Space Research Institute RAS, 84/32 Profsovnaya st., 117997 Moscow, Russia

Space weather has a significant effect on the Earth's ionosphere. At the same time, it is considered proven that the major phenomena occurring in the system of the geospheres (lithosphere and atmosphere) can also influence on the ionosphere. The mechanisms of atmospheric effects transmission to ionospheric heights have not been studied enough and now we can see a collection of several physically justified and experimentally confirmed assumptions in the some cases. Strong meteorological disturbances that produced perturbations in the ionosphere have a particular interest, since in this case it is possible to reliably determine the source of effects of the possible influence. Two mechanisms are usually considered as mechanisms of transmission for impacts. First, the onset of atmospheric turbulence (vortex) is accompanied by the generation of wave structures including acoustic structures that extend to the height of the ionosphere. On the other hand, turbulent motions in atmosphere lead to the entrainment of charged particles in the lower atmosphere and to the local generation of electric currents. This leads to perturbations of the plasma density at the heights of the

layer *E*. The longitudinal currents excited in this case transfer the disturbance that has arisen to the upper ionosphere.

In our work, the largest tropical typhoons and cyclons (TC) in 2014 were considered, of which 6 events reached the 5th category on the Saffir-Simpson scale and 13 – the 4th. To study the manifestations of the atmospheric-ionospheric interaction, we created original methods for analyzing plasma measurements of electron density, measured by SWARM satellites at altitudes of 450–500 km in quiet geo-heliomagnetic conditions. The essence of the first method is to consider the ionospheric response in the time range corresponding to the characteristic wave disturbances in the atmosphere associated with the TCs. The second approach uses the capabilities of the positioning system of the grouping of the AES SWARM satellite for estimation of the electron density spatial derivatives. Our consideration has shown that in the periods of development of powerful TCs, various manifestations of atmospheric-ionospheric connections are observed, which most likely testifies to the actions of different mechanisms for transmitting disturbances to the ionosphere in different periods. So, we recorded oscillations of the electron density in the frequency band of 10 ... 200 s with localization and scales characteristic of AGW. The size of the perturbation region in the ionosphere in these cases is larger than the size of the storm region. The relative magnitude of the disturbance reaches up to 10% in the selected frequency band. In a number of cases, our techniques identify areas that can be explained by mechanisms of electric field perturbation transfer. Moreover, in a number of cases in the conditions of the evening and night ionosphere, we can observe quasi wavelike disturbances, that captured the entire range of TC. The statistics obtained by us (about 100 different cases of manifestation of ionospheric-atmospheric connections) can be considered as an illustration of a complex system of transmitting disturbances of different scales from the lower atmosphere to ionospheric heights. Highly likely, this mechanisms are not limited of the two discussed above.

The study was done in the framework of the state scientific task of MSU and SRI RAS and partial supported by the Russian Foundation for Basic Research (projects 19-05-00941 (ZVI) and 18-05-00108 (PVA)).

Восстановление характеристик атмосферной турбулентности и волнового фронта в скрещенных оптических пучках

Шиховцев А.Ю. (uzel@iszf.irk.ru), Ковадло П.Г.

Институт солнечно-земной физики СО РАН, ул. Лермонтова 126-а, 664033 Иркутск, Россия

Для расширения представлений об атмосферной турбулентности, приводящей к формированию оптических искажений в широком поле зрения астрономического телескопа, были выполнены исследования локальных искажений волнового фронта точечного и протяженного источника света. В алгоритме восстановления характеристик атмосферной турбулентности используется излучение, центрированное на длину волны 0.5 мкм.

Выявлены закономерности в формируемых оптических искажениях в разных частях апертуры телескопа. Полученные закономерности формирования оптических искажений в скрещенных оптических пучках позволяют определять характеристики атмосферной турбулентности на разных удалениях от приемной апертуры.

Работа выполнена при поддержке гранта Президента МК-227.2019.8.

Restoration of the characteristics of atmospheric turbulence and wave front in crossed optical beams

A.Yu. Shikhovtsev (uzel@iszf.irk.ru), P.G. Kovadlo

Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS, 126 Lermontov str., 664033 Irkutsk, Russia

To improve knowledge about atmospheric turbulence which produce optical distortions in a wide field of view of an astronomical telescope studies of local distortions of the wavefront of a

point and extended light sources were carried out. The algorithm for restoring the characteristics of atmospheric turbulence uses the radiation centered at the wavelength of 0.5 μm .

The patterns in the formed optical distortions in different parts of the telescope aperture are revealed. The obtained dependencies of the formation of optical distortions in crossed optical beams make it possible to determine the characteristics of atmospheric turbulence at different distances from the receiving aperture.

Анализ стратосферно-тропосферного динамического взаимодействия

Алексеева Е.Г. (E.Alekseeva-rshu@yandex.ru)

*Российский государственный гидрометеорологический университет, Воронежская ул. 79, 192007
Санкт-Петербург, Россия*

Для оценки влияния стратосферы на тропосферу используется поток Элиасена-Пальма, который позволяет оценить волновую активность в тропосфере и стратосфере и их взаимодействие. Очень долгое время для расчёта потока Эллиасена-Пальма использовался подход Пламба, который рассматривает стационарный поток с учётом зонального осреднения для каждого высотного уровня и геострофическое приближение. Такой подход неприменим в экваториальной зоне, где согласно последним исследованиям возникают возмущения, влияющие на внетропическую стратосферу, например колебания Маддена-Джулиана [1, 2].

В данном исследовании рассматриваются два варианта расчета потока Эллиасена-Пальма – по методу Пламба и с учётом агеострофических отклонений [3]. Исследования проводились для холодного периода года с октября по апрель за 1979–2018 гг. для высот с 1000 гПа до 0.01 гПа по данным реанализа ERA-interim. Данные (температура, геопотенциальная высота, зональный и меридиональный ветер на 37 уровнях давления) первоначально представлены на сетке точек с разрешением по долготе 30, по широте 20. Рассматривалось влияние волновой активности в стратосфере на стационарные волны в тропосфере, с которыми связывается наличие блокирующего антициклона.

На основе проведённого анализа можно сделать вывод о том, что блокирующие антициклоны чаще всего возникают при усилении вертикальной составляющей потоков волновой активности. При этом существует значительная вариация отклика тропосферы на воздействие стратосферы, которая связана с географическим расположением усиления вертикальной составляющей потоков Эллиасена-Пальма.

1. Kandieva K.K., Aniskina O.G., Pogoreltsev A.I. et al. Effect of the Madden–Julian Oscillation and Quasi-Biennial Oscillation on the Dynamics of Extratropical Stratosphere // *Geomagnetizm i Aeronomiya*. 2019. V. 59, No 1. P. 114–124.
2. Pogoreltsev A.I., Savenkova E.N., Aniskina O.G. et al. Interannual and intraseasonal variability of stratospheric dynamics and stratosphere–troposphere coupling during northern winter // *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.* 2015. V. 136. P. 187–200.
3. Kinoshita, T., and K. Sato. A formulation of threedimensional residual mean flow applicable to both inertiagravity waves and to Rossby waves // *J. Atmos. Sci.* 2013. V. 70. P. 1577–1602.

Analysis of the stratospheric-tropospheric dynamic interaction

E.G. Alekseeva

Russian State Hydrometeorological University, 79 Voronezhskaya str., 192007 Saint-Petersburg, Russia

To assess the influence of the stratosphere on the troposphere, the Eliassen-Palma stream is used, which allows us to estimate the wave activity in the troposphere and the stratosphere and their interaction. For a very long time, the Plamba approach was used to calculate the flow of Elliasena-Palma, which considers the stationary flow taking into account the zone averaging for each altitude level and the geostrophic approximation. Such an approach is not applicable in the equatorial zone, where, according to recent studies, disturbances arise that affect the extratropical stratosphere, for example, Madden-Julian vibrations [1, 2].

In this study, two options are considered for calculating the Eliassen-Palma flow – using the Plumb method and taking into account the ageostrophic deviations [3]. The studies were carried out according to the data for the cold period of the year from October to April for 1979–2018 for heights from 1000 hPa to 0.01 hPa according to the ERA-interim reanalysis data. The data (temperature, geopotential height, zonal and meridional wind at 37 pressure levels) are initially presented on a grid of points with a resolution in longitude 30, in latitude 20. The influence of wave activity in the stratosphere on stationary waves in the troposphere, with which the presence of a blocking anticyclone is associated, was considered.

Based on the analysis performed, it can be concluded that blocking anticyclones most often occur when the vertical component of the wave activity flows is enhanced. At the same time, there is a significant variation in the response of the troposphere to the impact of the stratosphere, which is associated with the geographical location of the amplification of the vertical component of the Eliassen-Palma flows.

1. Kandieva K.K., Aniskina O.G., Pogoreltsev A.I. et al. Effect of the Madden–Julian Oscillation and Quasi-Biennial Oscillation on the Dynamics of Extratropical Stratosphere // *Geomagnetizm i Aeronomiya*. 2019. V. 59, No 1. P. 114–124.
2. Pogoreltsev A.I., Savenkova E.N., Aniskina O.G. et al. Interannual and intraseasonal variability of stratospheric dynamics and stratosphere–troposphere coupling during northern winter // *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.* 2015. V. 136. P. 187–200.
3. Kinoshita, T., and K. Sato. A formulation of threedimensional residual mean flow applicable to both inertiagravity waves and to Rossby waves // *J. Atmos. Sci.* 2013. V. 70. P. 1577–1602.

Стратосферно-тропосферное взаимодействие

Анискина О.Г. (Olga.aniskina@mail.ru)

*Российский государственный гидрометеорологический университет, Воронежская ул. 79, 192007
Санкт-Петербург, Россия*

Рассматривается влияние Северной кольцевой моды (СКМ) с изменчивостью зонального потока и вертикальной структурой многих метеорологических величин. Для исследования влияния СКМ на процессы в тропосфере и стратосфере использовались данные реанализов NCEP/NCAR, ERA-Interim, ERA-20century, JRA55. Индекс Северной кольцевой моды определялся как первый коэффициент разложения по естественным ортогональным функциям (ЕОФ) поля давления на уровне моря севернее 20° с.ш. Поскольку проявление СКМ наиболее сильно в холодное время года, то рассматривались значения индекса СКМ за период с ноября по март всех лет.

Для характеристики полярного стратосферного вихря рассчитаны индекс ИПВ, основанный на максимальной завихренности поля ветра, и площадь полярного стратосферного вихря. Согласно проведённому анализу можно сделать предположение о преобладающем влиянии СКМ на Атлантический сектор. Положительные значения индекса СКМ связаны с отрицательными аномалиями в поле давления над Арктикой и увеличением аномалий западного ветра вдоль широтного круга 50–60° с.ш. Выявлена значительная связь между интенсивностью СКМ, ИПВ и температурой у поверхности земли. Положительные аномалии СКМ вызывают возникновение антициклона в нижней тропосфере и значительное повышение температуры, связанное с внезапными стратосферными потеплениями..

Исследование было выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-05-01050.

Stratosphere-troposphere interaction

O.G. Aniskina (Olga.aniskina@mail.ru)

Russian State Hydrometeorological University, 79 Voronezhskaya str., 192007 Saint-Petersburg, Russia

The influence of the Northern ring mode (NRM) with the variability of the zonal flow and the vertical structure of many meteorological variables is considered. To study the effect of NRM on

processes in the troposphere and stratosphere, data from the NCEP/NCAR, ERA-Interim, ERA-20century, JRA55 reanalyses were used. The NRM index was defined as the first expansion coefficient in terms of the natural orthogonal functions of the pressure field at sea level north of 20° C. Since NRM is most pronounced during the cold season, the values of the NRM index for the period from November to March for all years were considered.

To characterize the polar stratospheric vortex, the IPV index based on the maximum vorticity of the wind field, and the area of the polar stratospheric vortex were calculated. According to the analysis performed, it is possible to make an assumption about the prevailing influence of NRM on the Atlantic sector. Positive values of the NRM index are associated with negative anomalies in the pressure field over the Arctic and an increase in the anomalies of the westerly wind along the latitudinal range of 50–60° N. Revealed a significant relationship between the intensity of the NRM, IPV and temperature at the surface of the earth. The positive NRM anomalies cause the occurrence of an anticyclone in the lower troposphere and a significant increase in temperature associated with sudden stratospheric warmings.

The study was carried out with the financial support of the Russian Foundation for Basic Research in the framework of research project No. 18-05-01050.

Сопоставление некоторых наблюдаемых физико-химических характеристик нейтральной и заряженной компоненты нижней термосферы

Васильев Р.В. (roman_vasilyev@iszf.irk.ru), Артамонов М.Ф., Ратовский К.Г.
Институт солнечно-земной физики СО РАН, ул. Лермонтова 126-а, 664033 Иркутск, Россия

Учёт взаимного влияния заряженной и нейтральной компоненты нижней термосферы Земли важен в задачах исследования космической погоды. Одновременные исследования заряженной и нейтральной компоненты могут быть выполнены при помощи оптических и радиофизических средств, просматривающих некий общий объём. В работе сопоставляется поведение ночного ветра на высоте около 250 км, полученное по данным наблюдений за доплеровским смещением линии кислорода ОI 630 нм при помощи интерферометра Фабри-Перо, и поведение высоты максимума F2 слоя ионосферы, полученное из данных вертикальных профилей электронной концентрации при помощи ионозонда. Оба прибора установлены на расстоянии около 100 км в средних широтах центральной Евразии (52° с.ш., 103° в.д.). Временное разрешение обеих устройств позволяет провести сравнение суточной динамики характеристик, усреднённых на протяжении зимы. Зимний сезон выбран для максимизации эффективного времени наблюдения оптических средств. Динамика вертикального и меридионального ветра нейтральной компоненты соответствует динамике максимума F2 слоя ионосферы, а интенсивность линии ОI 630 нм в целом соответствует поведению электронной концентрации на высоте 250 км.

Результаты наблюдений получены с использованием оборудования Центра коллективного пользования «Ангара» <http://ckp-rf.ru/ckp/3056/>. Обработка результатов радиофизических наблюдений выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ №18-05-00594 А, обработка результатов оптических наблюдений выполнена в рамках базового финансирования программы ФНИ И.16.

Matching of some observed physics-chemical characteristics of the neutral and charged components of the lower thermosphere

R.V. Vasilyev (roman_vasilyev@iszf.irk.ru), M.F. Artamonov, K.G. Ratovsky
Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS, 126 Lermontov str., 664033 Irkutsk, Russia

The consideration of the interconnection between charged and neutral components of the lower thermosphere is very important in the studying of the space weather. Simultaneous studying of the neutral and charged components can be performed using optical and radiophysical means

observing the some common volume of the atmosphere. We compare the behavior of the night wind at the height of about 250 km obtained from the Doppler shift of the OI 630 airglow line by the Fabry-Perot interferometer and behavior of height of F2 ionosphere layer maximum obtained from electron concentration height profiles by ionosond. Both instruments are installed about 100 km apart at the middle latitudes of the central Eurasia. The time resolution of both instrument allow us to compare the averaged diurnal dynamic of the characteristics during the winter. The winter was chosen for maximization of the effective time of the observation of optical instrument. The dynamic of vertical neutral wind more in consistent with dynamic of the F2 ionosphere layer maximum in compared with the meridional neutral wind, and the behavior of the intensity of the OI 630 line is in consistent with the electron concentration behavior at the 250 km.

The observational results are obtained using equipment of "CKP-Angara" <http://ckp-rf.ru/ckp/3056/>. Processing of the radiophysical data were performed at the financial support RFBR grant №18-05-00594 A. Processing of the optical data were performed at the financial support of base program FNI II.16.

Аномальные эффекты в вариациях потока атмосфериков и интенсивности потока гамма-квантов перед землетрясением 14 сентября 2018 г. M5.2

Салихов Н.М.¹ (N1_NazyF@mail.ru), Щепетов А.Л.², Пак Г.Д.¹

¹Институт ионосферы АО НЦКИТ, Каменское плато 050020, Алматы, Республика Казахстан

²Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Ленинский проспект 53, 119991 Москва, Россия

В настоящей работе представлены результаты мониторинга потока атмосфериков в диапазоне очень низких радиочастот (1.5–11.5 кГц) в горной местности вблизи Тянь-Шаньской высокогорной научной станции (ТШВНС) на высоте 3700 м вдали от промышленных радиопомех. В основу идеи обнаружения аномалий, связанных с подготовкой землетрясения, были положены результаты наблюдений [1] об изменении условий распространения радиосигнала в волноводе Земля-ионосфера над эпицентрами землетрясений. Мониторинг атмосфериков, распространяющихся в сферическом волноводе Земля-ионосфера, позволил исследовать закономерности фоновых вариаций и обнаружить аномальные эффекты при активизации сейсмических процессов перед землетрясением, произошедшим 14 сентября 2018 г. в 22 ч 15 мин 04.2 с GMT на глубине 5 км, магнитудой $M_b = 5.2$. Координаты эпицентра: 41.9171°N, 77.1926° E.

Во временном ходе фоновых вариаций потока атмосфериков прослежена четкая суточная ритмика, также хорошо видны присутствующие на протяжении суток значительно меньшие по амплитуде высокочастотные колебания, в которых отчетливо видны эффекты восхода и захода Солнца. Спектральный анализ этих высокочастотных колебаний позволил выделить четыре значимых спектральных пика с периодами 9274 с, 3862 с, 2496 с, 1594 с. Часть спектра в интервале периодов 33–200 с оказалась шумоподобной. Отметим, что именно в этой части спектра нам удалось обнаружить отклик на активизацию сейсмических процессов перед землетрясением. Расчет динамического спектра мощности в интервале 33–200 с выявил нарушение суточной ритмики за 6 дней до землетрясения и заметный всплеск спектра мощности за 4–5 дней. Важно отметить, что в районе наблюдений в это время не было гроз и резкого изменения метеоусловий, которые могли бы оказать влияние на вариации потока атмосфериков.

Одновременно на территории ТШВНС ($h = 3340$ м) проводилась регистрация вариаций интенсивности потока гамма-квантов в скважине (43.0435° N, 76.9414° E) на глубине 39 м и рядом на поверхности земли с помощью сцинтилляционных гамма-детекторов (NaI) в диапазоне энергий 50–1500 кэВ. Сравнительный анализ показал, что аномальные эффекты в вариациях потока гамма-квантов перед землетрясением наиболее отчетливо проявились в скважине. За шесть дней до землетрясения произошел значительный рост динамического спектра мощности потока гамма-квантов в скважине с максимумом 8 сентября, т.е.

одновременно с нарушением суточной ритмики в вариациях динамического спектра мощности потока атмосфериков. Измерительная скважина находилась на расстоянии 126 км от эпицентра землетрясения, в пределах расчетного радиуса Добровольского, который определяет размер зоны деформационных процессов в литосфере при подготовке землетрясения и для землетрясения M5.2 равен 172.18 км. По данным оперативных каталогов сейсмологических служб других землетрясений с магнитудой $M \geq 5$ в пределах радиуса Добровольского в этот период не зарегистрировано.

Таким образом, обнаружены возмущения в вариациях потока атмосфериков, распространяющихся в волноводе Земля-ионосфера, и в вариациях интенсивности потока гамма-квантов в скважине и приземной атмосфере за 6 дней до землетрясения M5.2 14 сентября 2019 г. Важно отметить, что именно одновременность появления аномальных эффектов в различных геофизических полях предполагает их связь с активизацией сейсмических процессов в период подготовки и во время землетрясения.

1. Садовский М.А., Соболев Г.А., Мигунов Н.И. Изменения естественного излучения радиоволн при сильном землетрясении в Карпатах // Доклады АН СССР. 1979. Т. 244, № 2. С. 316–319.

Anomalous effects in atmospherics and gamma ray fluxes preceding the 14 September 2018 earthquake M5.2

N.M. Salikhov¹ (N1_NazyF@mail.ru), A.L. Shepetov², G.D. Pak¹

¹*Institute of the Ionosphere, Kamenskoe Plateau, 050020 Almaty, Kazakhstan*

²*P.N. Lebedev Physics Institute, 53 Leninsky pr., 119991 Moscow, Russia*

This paper presents the observations of atmospherics flux variations in the range of very low frequencies (VLF) radio signals (1.5–11.5 kHz) which were made in mountainous areas near the Tien-Shan mountain scientific station (TMSS) at an altitude of 3700 m away from industrial radio interference. The results of observations of changing the conditions of radio signal propagation in the Earth-ionosphere waveguide over earthquakes epicenters [1] were the basis for the idea of detecting the anomalies connected with earthquake preparation. Monitoring of atmospherics in VLF interval allowed us to investigate the background flux patterns and to reveal anomalous effects in atmospherics flux preceding the 14.08.2018 earthquake (magnitude is $M_b = 5.2$; 41.9171° N, 77.1926° E).

A clear daily rhythm is traced in the time course of background atmospherics flux. Also there are visible high-frequency variations of smaller amplitude that present throughout the day, and in which the effects of sunrise and sunset are clearly visible. Spectral analysis of these high-frequency variations allowed us to identify four significant spectral peaks with periods of 9274 s, 3862 s, 2496 s, and 1594 s. Part of the spectrum in the period range 33–200 s was noise-like. In this part of spectrum, we were able to detect the response to activation of seismic processes preceding the earthquake. Calculation of dynamic spectrum power in the period interval of 33–200 s showed the disruption of daily rhythm 6 days before earthquake and a noticeable increase of dynamic spectrum power 4–5 day before it. There were no thunderstorms and no abrupt of weather conditions changes, which could affect atmospherics flux variations in the area of observations during an analyzed period.

Simultaneously with atmospherics measurements, a monitoring of intensity of gamma ray flux in the range of 50–1500 keV has been carry out at a depth of 39 m in the well (43.0435° N, 76.9414° E) and nearby the well on earth surface. Scintillation gamma ray detectors (NaI) placed at TMSS ($h = 3340$ m). A comparative analysis showed anomalous effects more clearly in gamma ray flux in the well before the earthquake. There was a significant increase of dynamic spectrum power of gamma ray flux in the well 6 days before the earthquake with its maximum on 8 September, that is, simultaneously with a violating of dynamic spectrum power of atmospherics daily rhythm. Measuring well was located at a distance of 126 km from earthquake epicenter, within calculated Dobrovolsky radius, which for the M5.2 earthquake is 172.18 km. Note that according to

seismological services, the earthquakes with $M \geq 5$ were not registered within Dobrovolsky radius during this period.

Thus, before the earthquake M5.2 anomalous effects were recorded in variations of gamma ray flux in the well and in surface layer of atmosphere, and simultaneously in variations of atmospherics propagating over the Earth-ionosphere waveguide. Simultaneous occurrence of perturbations in various geophysical fields may serve as a basis for assumption on the connection between recorded anomalous effects and the activation of seismic processes preceding the earthquake.

1. Sadovskiy M.A., Sobolev G.A., Migunov N.I. *Izmeneniya yestestvennogo izlucheniya radiovoln pri sil'nom zemletryasenii v Karpatakh // Doklady AN SSSR. 1979. T. 244, № 2. P. 316–319 (in Russian).*

Наблюдение внутренних гравитационных волн в тропосфере в Калининграде в период солнечного затмения 20.03.2015

Борчевкина О.П. (olgaborchevkina@gmail.com), Карпов И.В. Курдяева Ю.А.
*КФ Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН,
ул. Пионерская 61, 236035 Калининград, Россия*

Акустико-гравитационные (АГВ) и внутренние гравитационные волны (ВГВ) в настоящее время рассматриваются как важный физический механизм, реализующий связи динамических процессов в различных атмосферных слоях. Так, например, в наблюдениях вариаций параметров верхней атмосферы и ионосферы отмечается появление возмущений, обусловленных метеорологическими возмущениями в тропосфере, прохождением солнечного терминатора, усилением сейсмической активности. Гипотезы о механизмах формирования таких возмущений основываются на представлениях о генерации ВГВ в нижней атмосфере и их распространении в верхнюю атмосферу. В наблюдениях ионосферы в периоды солнечных затмений (СЗ) также отмечается появление возмущений с периодами АГВ и ВГВ. Однако, одновременные наблюдения вариаций нижней атмосферы в такие периоды весьма малочисленны.

Целью работы являлось проведение наблюдений в тропосфере в условиях СЗ 20.03.2015. В Калининграде (54.4° с.ш., 20.3° в.д.) солнечное затмение началось в 10:50 и закончилось 13:10, максимальное перекрытие солнечного диска составляло 70%. Наблюдения выполнялись с применением двухволнового атмосферного лидара (532 нм, 1064 нм). В наблюдениях регистрировалась интенсивность рассеянного в атмосфере лидарного сигнала. Для анализа результатов наблюдений применялись методы гармонического и вейвлет анализа с целью выделения частотных характеристик вариаций с периодами АГВ и ВГВ и их динамики в период прохождения СЗ.

Применяемые методы анализа результатов показали отчетливое разделение составляющих с периодами акустико-гравитационных и внутренних гравитационных волн. В период прохождения главной фазы СЗ отмечалось повышение амплитуд вариаций с периодами менее 5 и 10–15 мин и их быстрое уменьшение по окончании основной фазы СЗ. Выполненные наблюдения показывают, что усиление составляющих АГВ и ВГВ в вариациях атмосферных параметров отмечается на начальной и заключительной фазах затмения. Это, очевидно, связано с быстрым изменением потоков солнечного излучения. В нижней атмосфере в рассматриваемом частотном диапазоне основной вклад вносят гармоники с периодами менее 5 и 10–15 минут.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, грант 18-05-00184.

Gravity waves observation in troposphere in Kaliningrad during solar eclipse on 20.03.2015

O.P. Borchevkina (olgaborchevkina@gmail.com), I.V. Karpov, Yu.A. Kurdyaeva
*Branch of N.V. Pushkov Institute of Earth Magnetism, Ionosphere and Radio-Wave Propagation, 61
Pionerskaya str., 236035 Kalinigrad, Russia*

Gravity and acoustic-gravity waves are important physical mechanism of the atmosphere-ionosphere coupling. For example, in variations of the upper atmosphere and ionosphere parameters observations the appearance of disturbances due the meteorological disturbances in the troposphere, the passage of the solar terminator and an increase in seismic activity are noted. Hypotheses about the mechanisms of formation of such disturbances are based on ideas about the generation of GWs in the lower atmosphere and their propagation to the upper atmosphere. In ionosphere observations during the solar eclipses (SE) the disturbances with AGWs and GWs periods are also noted. However, simultaneous observations of the lower atmosphere variations during such periods are very few.

The main goal of the work was to conduct observations in the troposphere during solar eclipse. In Kaliningrad (54.4° N, 20.3° E) the solar eclipse began at 10:50 and ended at 13:10, the maximum overlap of the solar disk was 70%. The observations were performed using a two-wave atmospheric lidar (wavelengths 532 nm, 1064 nm). The observations recorded the intensity of the scattered lidar signal in the atmosphere. To analyze the observations results the methods of harmonic and wavelet analysis were used in order to identify the frequency characteristics of variations with the AGWs and GWs periods and their dynamics during the SE.

The applied methods for analyzing the results showed a clear separation of the components with periods of acoustic-gravity and internal gravity waves. An increase in the amplitudes of variations with periods less than 5 min and 10–15 min during the passage of the SE main phase and their rapid decrease after the end of the SE main phase were noted. Completed observations show that the increasing in the GWs and AGWs components in the atmosphere parameters variations was observed at the initial and final phases of the eclipse. This is obviously due to the rapid change in solar radiation flux. In the lower atmosphere in the frequency range under consideration the harmonics with periods less than 5 and 10–15 minutes make the main contribution.

This work was supported by the Russian Foundation for Basic Research (project no. 18-05-00184).

Глобальные атмосферные волны в полях температуры на основе данных эксперимента COSMIC/FORMOSAT-3 и данных реанализов

Зарубин А.С. (a-zarubin@mail.ru), Погорельцев А.И.
*Российский государственный гидрометеорологический университет, Воронежская ул. 79, 192007
Санкт-Петербург, Россия*

Одной из важнейших задач физики атмосферы является изучение волн различных временных и пространственных масштабов. Интерес к данной теме связан с тем, что при распространении волны переносят энергию и импульс, которые передают среде при диссипации. Таким образом, атмосферные волны воздействуют на тепловой режим и циркуляцию атмосферы и осуществляют взаимодействие между разными слоями.

В качестве источника информации о глобальном распределении полей температуры были выбраны данные эксперимента по радиозатменному зондированию атмосферы COSMIC/FORMOSAT-3. Основная трудность при использовании спутниковых данных для анализа динамических процессов в атмосфере заключается в их крайне неравномерном распределении в пространстве и времени. Это особенно ощутимо при рассмотрении высокочастотных возмущений. Предлагается методика, позволяющая выделять и анализировать глобальные атмосферные волны по данным о температуре эксперимента

COSMIC. Верификация полученных результатов осуществляется с помощью данных реанализов ERA-5 и Merra-2.

Global atmospheric waves in temperature fields based on COSMIC/FORMOSAT-3 experiment and reanalyses data

A.S. Zarubin (a-zarubin@mail.ru), A.I. Pogoreltsev

Russian State Hydrometeorological University, 79 Voronezhskaya str., 192007 Saint-Petersburg, Russia

Studying of waves with different temporal and spatial scales is one of the most important atmospheric physics tasks. The need for this topic research is due to the fact that propagating waves transfer energy and momentum, which are transmitted to the environment during the dissipation. Thus, atmospheric waves affect the thermal regime and the circulation of the atmosphere and interact between different layers.

The COSMIC/FORMOSAT-3 experiment data have been chosen as a source of information about the global distribution of temperature fields. The main difficulty in using satellite data to analyze dynamic processes in the atmosphere lies in their extremely irregular distribution in space and time. This is especially noticeable when considering high-frequency disturbances. A technique that allows the global atmospheric waves to be isolated and analyzed according to the temperature data of the COSMIC experiment is presented. The verification of the obtained results is carried out using the ERA-5 and Merra-2 reanalyses data sets.

Численные оценки воздействия атмосферных термических приливов на фоновую температуру нижней термосферы

Гаврилов А.А. (a_a_gavrilov@mail.ru)

Институт прикладной математики, физики и информатики ВлГУ, ул. Горького 87/3, 600000 Владимир, Россия

Атмосферные термические приливы (АТП), обусловленные поглощением солнечной радиации озоном в страто-мезосфере и водяным паром в тропосфере, при своем распространении переносят потоки энергии. Воздействие потоков, обусловленных распространяющимися в средней атмосфере ($H \approx 20\text{--}120$ км) термическими приливами, на фоновую температуру приводит к существенному изменению этого параметра атмосферы в нижней термосфере ($H \approx 80\text{--}120$ км). К настоящему времени опубликованы противоречивые оценки последствий воздействия АТП на фоновую температуру нижней термосферы.

В настоящей работе для оценки последствий воздействия АТП была использована разработанная авторами глобальная численная термогидродинамическая модель атмосферных приливов [1]. Для модельных оценок рассчитывался источник, обусловленный диссипацией приливов в средней атмосфере за счет вязкости. Реальная часть произведения суммы квадратов вертикальных градиентов зональной и меридиональной компонент АТП на коэффициент диффузии дает энергию диссипации АТП, по которой рассчитывались поправки к фоновой температуре. В результате численных экспериментов были построены широтно-высотные изолинии и рельефы поправок к фоновой температуре, обусловленных распространяющимися атмосферными приливами, для всех месяцев года. Получено, что максимальные значения, $(1\text{--}2)$ К/сутки, поправки к фоновой температуре за счет суточного прилива (СП) принимают в низкоширотной нижней термосфере ($H \approx 105$ км) обоих полушарий. Численные эксперименты показали, что в отличие от СП поправки к фоновой температуре за счет влияния полусуточного прилива (ПП) существенно возрастают. Они достигают значений ≈ 8 К/сут для среднеширотной нижней термосферы ($H \approx 110$ км) обоих полушарий для дней равноденствий. Для дней солнцестояний нагревание нижней термосферы АТП происходит асимметрично. В день летнего солнцестояния в Северном

полушарии (22 июня) за счет диссипации атмосферного ПП происходит нагревание полярной нижней термосферы Южного полушария, а для 22 декабря картина меняется – нагревается полярная нижняя термосфера Северного полушария.

Численные эксперименты на разработанной модели показали, что такое асимметричное нагревание объясняется эффектом дальнего волнового воздействия атмосферных термических приливов на среду распространения. Суть эффекта в том, что полусуточные приливные возмущения распространяются от их озонового источника в нижнюю термосферу под определенным углом. Поскольку большая часть озонового источника полусуточного прилива находится в летнем полушарии, постольку приливные возмущения от этого источника будут распространяться в полярную нижнюю термосферу зимнего полушария. В заключение отметим, что влияние термических приливов необходимо учитывать при создании современных справочных моделей фоновой температуры для мезосферы и нижней термосферы.

1. Капица А.П., А.А. Гаврилов. Оценка и прогноз дальнего воздействия озона и водяного пара атмосферы Антарктиды на циркуляцию и температуру нижней термосферы над регионами России // Доклады РАН. 2010. Т. 434, № 1. С. 112–116.

Numerical estimates of the impact of atmospheric thermal tides on the background temperature in the lower thermosphere

A.A. Gavrilov (a_a_gavrilov@mail.ru)

Institute of Applied Mathematics, Physics and Informatics VISU, 87/3 Gorky str., 600000 Vladimir, Russia

Atmospheric thermal tides (ATT) that occur due to absorption of solar radiation by ozone in the stratomesospheric and water vapor in the tropospheric transfer energy flows when propagating. The impact of flows, which are produced by thermal tides in the middle atmosphere ($h \approx 20\text{--}120$ km), on the background temperature results in the substantial change of this atmospheric parameter in the lower thermosphere ($h \approx 80\text{--}120$ km). By now, contradictory estimates of the consequences of the ATT impact on the background temperature in the lower thermosphere have been published.

To estimate the ATT impact consequences, a global numerical thermohydrodynamic model of atmospheric tides that was developed by the authors of the paper [1] was used. The source caused by the viscosity-induced dissipation of tides in the middle atmosphere was calculated to make model estimates. A real part of the product of sum of squared vertical gradients of ATT zonal and meridional components by diffusion coefficient provided the ATT dissipation energy that was used to calculate corrections to background temperature. Numerical experiments made it possible to construct latitude-longitude contour lines and reliefs of atmospheric tides-induced corrections to background temperature for all months of the year. Maximum values of corrections to background temperature due to diurnal tide were found to reach (1–2) K/day in the low-latitude lower thermosphere ($h \approx 105$ km) in both hemispheres. Numerical experiments have shown that, unlike the diurnal tide, corrections to background temperature due to semidiurnal tide increase substantially and attain ≈ 8 K/day in the mid-latitude lower thermosphere ($h \approx 110$ km) in both hemispheres for equinoxes. For solstitial days, the lower thermosphere heating with ATT is asymmetric. On the day of summer solstice in the Northern hemisphere (22 June), the polar lower thermosphere of the Southern hemisphere heats up due to dissipation of the semidiurnal tide, while on 22 December, the polar lower thermosphere of the Northern hemisphere heats up.

Numerical experiments with the developed model have shown that this asymmetric heating is explained by the effect of remote wave impact of atmospheric thermal tides on the propagation environment. The main point of this effect is that semidiurnal tide disturbances propagate from their ozone source to the lower thermosphere at a certain angle. Since most of the ozone source of semidiurnal tide is in the summer hemisphere, tide disturbances from this source will propagate into the polar lower thermosphere of the winter hemisphere. In conclusion it may be said that the impact

of thermal tides should be taken into account in creating present-day reference models of background temperature for the mesosphere and the lower thermosphere.

1. Kapitsa A.P., A.A. Gavrilov. Assessment and forecast of the teleconnection between the Antarctic ozone and water vapor and the circulation and temperature of the lower thermosphere over the regions of Russia // Doklady Earth Sciences. 2010. V. 434. P. 1200–1204.

Влияние притока океанических вод в Баренцево море на региональные изменения ледовитости и статической устойчивости атмосферы

Дембицкая М.А., Акперов М.Г. (aseid@ifaran.ru), Семенов В.А., Мохов И.И.,
Парфенова М.Р., Бокучава Д.Д., Ринке А., Дорн В.

Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Пыжевский пер. 3, 119017 Москва, Россия

На основе результатов ансамблевых расчетов с использованием региональной климатической модели HIRHAM/NAOSIM для Арктики исследовано влияние притока океанических вод в Баренцево море на концентрацию морских льдов и характеристики атмосферы в зимние месяцы. Результаты ансамблевых модельных расчетов свидетельствуют об определяющей роли вариаций притока океанических вод в Баренцево море в формировании изменчивости режима морских льдов и приповерхностной температуры воздуха, а также на статическую устойчивость атмосферы в зимний период, являющуюся важным индикатором пространственно-временной изменчивости полярных мезоциклонов в Арктическом регионе.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-35-00091.

The influence of oceanic inflow in the Barents Sea on the regional sea ice and the atmospheric static stability

M.A. Dembitskaya, M.G. Akperov (aseid@ifaran.ru), V.A. Semenov, I.I. Mokhov,
M.R. Parfenova, D.D. Bokuchava, A. Rinke, W. Dorn

A.M. Obukhov Institute of Atmosphere Physics RAS, 3 Pyzhevsky per., 119017 Moscow, Russia

The influence of the oceanic water inflow into the Barents Sea on the sea ice concentration and atmospheric characteristics, including static stability of the atmosphere related to the regional cyclone activity is analyzed using an ensemble of ten hindcast simulations with the regional climate model HIRHAM/NAOSIM for the Arctic region, for the 1979–2016 period.

In general, the regional climate model reproduces the seasonal changes in the inflow of the Atlantic water and heat into the Barents Sea reasonably well. There is a strong relationship between the volume inflow of Atlantic water and changes in the ocean heat inflow, sea ice concentration, and surface air temperature in the Barents Sea. It is also found that an increase of the Atlantic water inflow into the Barents Sea in winter leads to a decrease in static stability and contributes to regional cyclone activity. The decrease of the static stability is most pronounced in the southern part of the Barents Sea and also to the west of Svalbard.

The reported study was funded by RFBR according to the research project № 18-35-00091.

Вертикальное распространение акустической волны, вызванной волной цунами, в многослойной экспоненциальной модели вплоть до высот ионосферы

Лебле С.Б. (lebleu@mail.ru), Смирнова Е.С.

Балтийский федеральный университет им. И. Канта, ул. А. Невского 14, 236041 Калининград, Россия

Задача распространения граничного режима акустической волны используется для моделирования эффекта возмущения атмосферного газа. Граничный режим выбирается таким образом, чтобы его параметры и форма отвечали возмущениям, производимым волной цунами в прилежащем к волне слое газа. Атмосфера приближенно описывается, как 1D многослойная с экспоненциальной структурой по плотности в каждом слое. На границах слоёв и на границе вода-воздух определяется граничный режим, фиксирующий направление распространения. Связь между атмосферными параметрами (давлением, плотностью и скоростью) находится с помощью операторов проектирования на подпространства оператора z -эволюции для каждого слоя. Выводится универсальная формула для возмущения атмосферных переменных в произвольном слое. В результате получаем спектральный состав акустического возмущения атмосферы на произвольной высоте, включая ионосферные высоты, что предполагается использовать для расчёта ионосферного эффекта

Vertical propagation of tsunami-driven acoustic wave in multi-exponential-layers model up to ionosphere heights

S.B. Leble (lebleu@mail.ru), E.S. Smirnova

I. Kant Baltic Federal University, 14 A. Nevsky str., 236041 Kalinigrad, Russia

The problem of the propagation of the boundary mode of an acoustic wave is used to simulate the effect of perturbation of atmospheric gas. The boundary mode is chosen in such a way that its parameters and form correspond to disturbances produced by the tsunami wave in the gas layer adjacent to the tsunami wave. The atmosphere is approximately described as a 1D multilayer with an exponential structure in density in each layer. At the boundaries of the layers and at the water-air boundary, the boundary mode is determined, fixing the direction of propagation. The relationship between atmospheric parameters (pressure, density and velocity) is found with the help of projection operators on the subspaces of the z -evolution operator for each layer. Universal formula for the perturbation of atmospheric variables in an arbitrary layer is derived. As a result, we obtain the spectral composition of the acoustic perturbation of the atmosphere at an arbitrary height, including ionospheric heights, which is supposed to be used to calculate the ionospheric effect.

Некоторые особенности межсуточных вариаций скоростей ветра в области МНТ зимой 2017–2018 гг. по данным сети метеорных радаров

Мерзляков Е.Г.^{1,2} (eugmer@rpatyphoon.ru), Соловьева Т.¹, Юдаков А.¹,
Коротышкин Д.В.², Jacobi Ch.³, Lilienthal F.³

¹*Институт экспериментальной метеорологии НПО "Тайфун", ул. Победы 4, 249038 Обнинск, Россия*

²*Казанский (Приволжский) федеральный университет, Кремлевская ул. 18, 420008 Казань, Россия*

³*Институт Метеорологии, Университет Лейпцига, г. Лейпциг, Германия*

Представлены результаты анализа измерений скоростей ветра в области мезопаузы, проведенные с помощью метеорных радаров (МР) на станциях Коллм (51° N, 13° E), Обнинск (55° N, 37° E), Казань (56° N, 49° E), Ангарск (52° N, 103° E) и Анадырь (65° N, 178° E) с 31 октября 2017 г. по 31 марта 2018 г. Два из этих радаров являются Скаймет радары (в Коллме и Казани). Остальные радары не дают информацию о профилях ветра из-за малого количества регистрируемых метеорных радиоэхо (около 2000 за сутки). Значения скоростей

ветра для этих радаров приписываются высоте 90 км. Справедливость такого подхода проверялась с помощью данных с метеорных радаров с определением высотного профиля.

Особое внимание уделено изменчивости меридиональной составляющей скорости ветра с периодами 4–5 суток и 10–11 суток. Волны с этими периодами организованы в волновые пакеты, которые последовательно распространяются от одной станции к другой. Пакеты волн с периодами 4–5 суток распространяются на запад, так что, когда они наблюдаются на одной станции, они отсутствуют на другой. Основные составляющие волнового пакета – это волны, которые распространяются на восток с зональными волновыми числами 2–3. Пакеты волн с периодами 10–11 суток распространяются на запад. Основные составляющие этого пакета – волны, которые распространяются на запад с зональным волновым числом 1. Глобальное распределение параметров волн получено из данных о геопотенциальных высотах прибора MLS спутника Аура. Насколько осведомлены авторы, представленные особенности распространения планетарных волн в области мезосферы и нижней термосферы пока не получили большого внимания исследователей.

Полученные результаты показывают, что исследования волн как нестационарных явлений не всегда дают объяснение наблюдаемым волновым картинам. Иногда невозможно выделить общие колебания, которые одновременно появляются и существуют на разных станциях, хорошо разнесенных по долготе.

Работа частично поддержана РФФИ в рамках гранта 18-505-12048. C. Jacobi and F. Lilienthal благодарны ННАО за поддержку в рамках гранта JA 836/38-1 (NOSTHEM).

Some features of the day-to-day MLT wind variability in winter 2017-2018 as seen with a meteor radar network

E.G. Merzlyakov^{1,2} (eugmer@rpatyphoon.ru), T. Solovyova¹, A. Yudakov¹,
D.V. Korotyshkin², Ch. Jacobi³, F. Lilienthal³

¹*Institute for Experimental Meteorology, 4 Pobeda str., 249038 Obninsk, Russia*

²*Kazan (Volga Region) Federal University, 18 Kremlevskaya str., 420008 Kazan, Russia*

³*Institute for Meteorology, Universität Leipzig, Leipzig, Germany*

We present results of wind measurements near the mesopause carried out with meteor radars (MRs) at Collm (51° N, 13° E), Obninsk (55° N, 37° E), Kazan (56° N, 49° E), Angarsk (52° N, 103° E) and Anadyr (65° N, 178° E) from October 1, 2017 till March 31, 2018. Two of these MRs are SkiYMET radars with radio echo height finding (at Collm and Kazan). The others are MRs without height definition due to a small number of radio echo detected (about 2000 per day). The wind speeds for these MRs are prescribed to a height of 90 km. The validity of this approach was checked with the data from MRs with height finding.

Special attention is paid to the meridional wind variability with periods of 4–5 days and 10–11 days. The waves with these periods are formed in wave packets which successively propagate from one site to another one. The 4–5 day wave packet propagates westward, so it is observed at one site and disappears at the previous one. The packet consists of waves which propagate eastward mostly with zonal wavenumbers 2–3. The 10–11 day wave packet propagates westward and consists of waves which include a main component propagating westward with zonal wavenumber 1. The global view on the waves was obtained by using the AURA MLS geopotential data. To our knowledge such features of the planetary wave propagation in the MLT region have so far not obtained much attention.

The results demonstrate that a study of waves as transient objects does not always give an understanding of the observed wave picture. It is sometimes impossible to find similar waves which exist during the same time intervals over different stations well separated in longitude.

The work was partly supported by RFBR through grant 18-505-12048. C. Jacobi and F. Lilienthal acknowledge support by DFG through grant JA 836/38-1 (NOSTHEM).

СЕКЦИЯ 8. "СТРУКТУРА и СОСТАВ СРЕДНЕЙ и ВЕРХНЕЙ АТМОСФЕРЫ ЗЕМЛИ и ДРУГИХ ПЛАНЕТ"

Председатель: д.ф.-м.н. **С.П. Смышляев** (РГГМУ, СПб. Россия)

Сопредседатели: Dr. **Eugene Rozanov** (World Radiation Center, Switzerland), Dr. **Viktor Fomichev** (York University, Canada), Prof. **Imasu Ryoichi** (The University of Tokyo, Japan)

SESSION 8. "STRUCTURE of MIDDLE and UPPER ATMOSPHERE of the EARTH and OTHER PLANETS"

Chairman: Prof. **S.P. Smyshlyayev** (RSHU, SPb, Russia)

Co-chairmen: Dr. **Eugene Rozanov** (World Radiation Center, Davos, Switzerland), Dr. **Viktor Fomichev** (York University, Canada), Prof. **Imasu Ryoichi** (The University of Tokyo, Japan)

ESA Ozone Climate Change Initiative: combined use of satellite ozone profile measurements for trend analyses

V.F. Sofieva (viktoria.sofieva@fmi.fi) and the Ozone_CCI team
Finnish Meteorological Institute, P.O.Box 503, Helsinki, Finland

The creation of homogenized long-term ozone datasets that include on limb-viewing measurements from ENVISAT sensors (GOMOS, MIPAS, SCIAMACHY) as well as from ESA Third Party Missions (OSIRIS, SMR and ACE-FTS) is one of the objectives of the ESA Climate Change Initiative for ozone (Ozone-CCI) project.

In the framework of the ozone-CCI project, different datasets are created. The datasets from individual instruments are collected in the user-friendly HARMonized dataset of OZone profiles (HARMOZ). For trend analyses, the ozone profile measurements from seven ESA and NASA satellite instruments (SAGE II, GOMOS, MIPAS, SCIAMACHY, ACE-FTS, OSIRIS, OMPS) are merged in a climate data record—the merged SAGE-CCI-OMPS dataset, which covers more than 30 years, from 1984 to 2018. This dataset has been used for evaluating ozone trends in the stratosphere.

In the presentation, we will show the obtained results, including updated analyses of stratospheric ozone trends, and discuss future developments of ozone climate data records.

Contribution of natural and anthropogenic factors to ozone layer evolution during early 20th century

E. Rozanov^{1,2} (eugene.rozanov@pmodwrc.ch), T. Egorova¹, P. Arsenovic³

¹*Physikalisch-Meteorologisches Observatorium Davos, World Radiation Center, Davos, Switzerland*

²*Institute for Atmospheric and Climate Science, ETHZ, Zurich, Switzerland*

³*EMPA, Dübendorf, Switzerland*

During the first half of 20th century the climate and ozone layer behavior was driven by the anthropogenic and natural factors such as greenhouse gas emissions, steady increase of solar activity and relaxation after the period of enhanced volcanic eruptions in the second half of the 19th century. The solar activity increase also yielded changes in the energetic particle precipitation. To elucidate the role of different factors we performed a set of runs with the atmosphere-ocean chemistry-climate model (AOCCM) SOCOL-MPIOM driven by different combinations of the forcings. For the representations of energetic particle precipitation, the ionization rates and thermospheric NO_x influx were taken from the dataset prepared for IPCC CMIP-6. The solar irradiance time series was reconstructed from the solar modulation potential and sunspots time series.

The obtained model results allow estimating the main drivers of the ozone changes in the first half of the 20th century. We show that the solar UV irradiance is mostly responsible for the global total ozone increase. The total ozone behavior could potentially help to constrain the magnitude of the applied solar irradiance forcing, but this opportunity is hampered by the available total ozone observations, which started only in 1926. The positive trends of stratospheric ozone over the

tropical and middle latitude areas are also explained by enhanced solar UV. The stratospheric ozone decrease in the high latitude stratosphere during the cold season is explained by the additional hydrogen and nitrogen oxides production caused by enhanced energetic particle precipitation. The increase of the ozone precursors caused by anthropogenic activity resulted in substantial increase of the tropospheric ozone over Europe and US.

The work was supported by Swiss National Science Foundation under Grants CRSII2-147659 (FUPSOL II) and 200020_182239 (POLE).

Численное моделирование влияния природных и антропогенных факторов на изменчивость атмосферного озона в прошлом, настоящем и будущем

Блакитная П.А., Смышляев С.П. (smyshl@rshu.ru), Моцаков М.А.

*Российский государственный гидрометеорологический университет, Воронежская ул. 79, 192007
Санкт-Петербург, Россия*

Глобальная химико-климатическая модель нижней и средней атмосферы используется для анализа степени влияния природных и антропогенных факторов на содержание озона в тропосфере, нижней, средней и верхней стратосфере. Среди природных факторов рассматриваются изменения потоков солнечной радиации под влиянием циклов солнечной активности, изменения содержания стратосферного аэрозоля и циклические изменения динамических факторов, такие как квазидвухлетние колебания и явления Эль-Ниньо/Ла-Нинья (южное колебание), а среди антропогенных факторов исследуется влияние выбросов галогенных (хлорных и бромных) газов. Прошлые и настоящие потоки солнечной радиации оцениваются на основании данных NRL1, NRL2, а также CMIP5 и CMIP6, тогда как будущие изменения солнечных потоков прогнозируются в предположении нескольких сценариев изменения солнечной активности. Содержание стратосферного аэрозоля оценивается на основе спутниковых измерений, учитывающих вулканические выбросы, которые, как предполагается, могут произойти и в будущем. Глобальные динамические колебания учитываются на основе задания изменчивости температуры поверхности океана и площади его покрытия льдом.

Анализируются результаты расчетов по сценариям, учитывающим влияющие факторы по отдельности и совместно. Производится сравнение действия природных и антропогенных факторов для северных и южных умеренных и полярных широт, а также тропической зоны. Результаты модельных расчетов сравниваются с данными ре-анализа MERRA, ERA-Interim, ERA-5, ERA-XX и JRA.

Исследование выполнено при поддержке Российского Фонда Фундаментальных Исследований (проект РФФИ 17-05-01277) и Российского Научного Фонда (проект РНФ 19-17-00198).

Numerical modeling of the influence of natural and anthropogenic factors on the variability of atmospheric ozone in the past, present and future

P.A. Blakitnaya, S.P. Smyshlyaev (smyshl@rshu.ru), M.A. Motsakov

Russian State Hydrometeorological University, 79 Voronezhskaya str., 192007 Saint-Petersburg, Russia

The global chemistry-climate model of the lower and middle atmosphere is used to analyse the effects of natural and anthropogenic factors on ozone in the troposphere, lower, middle and upper stratosphere. Among the natural factors considered are changes in solar radiation flux under the influence of solar cycles, changes in the content of the stratospheric aerosol and cyclical changes in the dynamic factors, such as the quasi-biennial oscillation and the phenomena of El-Niño/La Niña (Southern Oscillation); and the influence of emissions of halogen (chlorine and bromine) gases is investigated among the anthropogenic factors. Past and present solar radiation fluxes are estimated from NRL1, NRL2, and CMIP5 and CMIP6, while future changes in solar

fluxes are predicted under several scenarios of changes in solar activity. The stratospheric aerosol content is estimated from satellite measurements that take into account volcanic emissions that are expected to occur in the future. Global dynamic fluctuations are accounted for on the basis of task variability of sea surface temperature and area of its coverage with ice.

The results of calculations for scenarios that take into account the influencing factors individually and jointly are analyzed. A comparison of the action of natural and anthropogenic factors for the Northern and Southern mid and polar latitudes, as well as the tropical zone, is performed. The results of model calculations are compared with the data of re-analysis MERRA, ERA-Interim, ERA-5, ERA-XX and JRA.

The study was supported by the Russian Foundation for Basic Research (RFBR project 17-05-01277) and the Russian Science Foundation (RNF project 19-17-00198).

Изучение вклада активного йода в разрушение озонового слоя нижней стратосферы с использованием химико-климатической модели SOCOLv3

Карагодин А.В.^{1,2} (karars94@mail.ru), Розанов Е.В.^{2,3}, Егорова Т.³, Суходолов Т.³,
Ball W.^{2,3}

¹Санкт-Петербургский государственный университет, Университетская наб. 7/9, 199034 Санкт-Петербург, Россия

²Институт атмосферы и климата (IAC), ETH Zürich, Швейцария

³PMOD/WRC, Давос, Швейцария

В данной работе мы обсуждаем влияние йода в атмосфере на разрушение озонового слоя в нижней стратосфере, вклад которого был предложен ранее, но до настоящего времени точно не подтвержден. Наблюдения показали, что общая концентрация йода в стратосфере составляет около 1–3 pptv, что достаточно мало, чтобы внести существенный вклад в разрушение озона в нижней стратосфере. С другой стороны, йодные радикалы обладают более высокой эффективностью при разрушении озона, чем свободные радикалы брома или хлора, что позволяет предположить, что даже низкая концентрация активного йода в атмосфере может оказывать более значимый вклад в понижение концентрации озона в нижней стратосфере.

Для оценки предположительного вклада йода в разрушение озонового слоя мы разработали новую версию химико-климатической модели Socol v3, добавив йодную химию и атмосферный перенос. Наши результаты показывают, что роль йода в атмосфере недооценена, и его необходимо учитывать для правильной оценки изменений в озоновом слое прошлого и будущего.

Elucidating the contribution of the reactive iodine to ozone depletion in the lower stratosphere using chemistry-climate model Socolv3

A.V. Karagodin^{1,2,3} (karars94@mail.ru), E.V. Rozanov^{2,3}, T. Egorova³, T. Sukhodolov³,
W. Ball^{2,3}

¹Saint-Petersburg State University, Physics Faculty, 7/9 Universitetskaya nab., 199034 Saint-Petersburg, Russia

²Institute for Atmospheric and Climate, Science (IAC), ETH Zürich, Switzerland

³PMOD/WRC, Davos, Switzerland

In this work we discuss the impact of iodine chemistry to the ozone depletion in the lower stratosphere which was suggested but not convincingly confirmed. The observations showed that the total iodine concentration in the stratosphere is about 1–3 pptv, which is rather small to make sufficient contribution to the ozone loss in the lower stratosphere. On the other hand, iodine radicals have a higher efficiency in depleting ozone than bromine or chlorine free radicals suggesting that

the lower concentration of total iodine might have stronger influence on the lower stratospheric ozone.

To evaluate the potential contribution of iodine to the ozone depletion we developed the new version of chemistry-climate model SOCOL v3 adding the iodine chemistry and transport. Our results suggest that the role of iodine chemistry is underestimated, and they should be considered to correctly assess the level of past and future evolution of the ozone layer.

Отклик мезосферного озона на модификацию нижней ионосферы мощными радиоволнами в умеренных широтах

Куликов Ю.Ю.¹ (yuyukul@appl.sci-nnov.ru), Андрианов А.Ф.¹, Бахметьева Н.В.²,
Вяхирев В.Д.², Жемяков И.Н.²

¹Институт прикладной физики РАН, ул. Ульянова 46, 603950 Нижний Новгород, Россия

²Научно-исследовательский радиофизический институт ННГУ им. Н.И. Лобачевского, ул. Б. Печерская 25/12а, 603950 Нижний Новгород, Россия

Представлены результаты микроволновых наблюдений озона средней атмосферы при возмущении ионосферы мощным КВ радиоизлучением среднеширотного нагревного стенда СУРА (56.15° N; 46.11° E), которые были выполнены 26–28 сентября 2018 г. Эксперимент являлся продолжением исследований по выяснению физической природы нового явления – уменьшения интенсивности микроволнового излучения мезосферы в линии озона при искусственном воздействии на нижнюю ионосферу [1, 2].

Комплексный эксперимент – микроволновые наблюдения озона, модификация ионосферы мощным КВ радиоизлучением стенда СУРА с одновременной диагностикой нижней ионосферы был проведен 28 сентября 2018 г. Измерения спектров излучения озона средней атмосферы на рабочей частоте 110.8 ГГц проводились при времени накопления 15 мин. Нагрев ионосферы производился излучением в зенит мощной необыкновенной радиоволны на частоте 4.7 МГц с эффективной мощностью излучения 100 МВт в режиме 30 минут – нагрев, 30 минут – пауза в работе стенда. В паузах между сеансами нагрева и в невозмущенных условиях проводилась диагностика ионосферной плазмы и нейтральной атмосферы на высотах 50–130 км методом резонансного рассеяния радиоволн на искусственных периодических неоднородностях (ИПН) ионосферной плазмы. По характеристикам рассеянного сигнала определяется ряд важнейших параметров ионосферной плазмы и нейтральной атмосферы: электронная концентрация, скорости регулярного и турбулентного вертикальных движений, температура и плотность нейтральной атмосферы. Цифровой ионозонд CADI снимал ионограммы каждые 15 минут. Локация неоднородностей производилась импульсами длительностью 30 мкс с частотой повторения 50 Гц. С временным интервалом 15 с и высотным шагом 1.4 км регистрировались амплитуда и фаза сигнала, рассеянного неоднородностями. Было проведено 2 сеанса нагрева с 10:01 и с 11:01 в течение 30 минут каждый. Наблюдались сигналы, рассеянные неоднородностями в D- и E-областях, в интервале высот 60–120 км. Амплитуда сигнала в области D (на мезосферных высотах) начала восстанавливаться через 8–10 минут после окончания нагрева. Это означает, что во время 30-ти минутного нагрева состояние D-области, в том числе, электронная концентрация, изменилась. Микроволновые измерения спектра излучения в линии озона показали, что изменения интенсивности излучения коррелируют с периодом работы стенда СУРА. Понижение содержания мезосферного озона по двум сеансам нагрева составило в среднем 20% от содержания O₃ в невозмущенной нижней ионосфере на высоте 60 км $(9.08 \pm 0.25) \cdot 10^9$ мол/см³. Содержание озона, которое было оценено по измеренным ночным спектрам O₃ для измерений 26 и 27 сентября, было на 30% больше невозмущенного дневного значения. Последнее является иллюстрацией суточного хода мезосферного озона, который связан с заходом и восходом Солнца.

Эксперименты проводились при поддержке РФФИ (гранты № 18-45-520009 и №18-05-00293). Обработка результатов измерений методом ИПН проведена в рамках проекта № 5.8092.2017/8.9 Минобрнауки РФ.

1. Куликов Ю.Ю., В.Л. Фролов. Влияние искусственно возмущённой ионосферы на мезосферный озон. Химическая физика. 2013. Т. 32, № 11. С. 26–30.
2. Андриянов А.Ф., Н.В. Бахметьева, В.Д. Вяхирев и др. Исследование вариаций мезосферного озона с одновременной диагностикой ионосферной плазмы во время нагревного эксперимента на стенде СУРА // Известия вузов. Радиофизика, 2019 (в печати).

The response of mesospheric ozone to the modification of the lower ionosphere by high-power radio waves in temperate latitudes

Yu.Yu. Kulikov¹ (yuyukul@appl.sci-nnov.ru), A.F. Andrianov¹, N.V. Bakhmet'eva²,
V.D. Vyakhirev², I.N. Zhemyakov²

¹*Institute of Applied Physics of the RAS, 46 Ul'yanov str., 603950 Nizhny Novgorod, Russia*

²*Radiophysical Research Institute Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod, 25/12a Bol'shaya Pecherskaya str., 603950 Nizhny Novgorod, Russia*

We presents the results of microwave observations of the middle atmosphere ozone under perturbation of the ionosphere by powerful HF radio emission by mid-latitude SURA heating facility (56.15° N; 46.11° E). Observations were carried out on September 26–28, 2018. The experiment was a continuation of researches to clarify the physical nature of the new phenomenon – a reducing of the intensity of the microwave radiation of the mesosphere in the ozone line when artificially acting on the lower ionosphere [1, 2].

A complex experiment was carried out on September 28, 2018. It included microwave observations of ozone, and the ionosphere modification by powerful HF radio emission from the SURA heating facility, with simultaneous diagnostics of the lower ionosphere. The ozone emission spectra of the middle atmosphere at the operating frequency of 110.8 GHz were measured at an accumulation time of 15 minutes. The ionosphere was heated by radiation to the Zenith of a powerful extraordinary radio wave at the frequency of 4.7 MHz with an effective radiation power of 100 MW in the mode of 30 minutes – heating, 30 minutes – a pause in the work of the SURA facility. During the pauses between the heating sessions and under unperturbed conditions, the ionospheric plasma and neutral atmosphere were diagnosed at altitudes of 50–130 km by resonant scattering of radio waves by artificial periodic irregularities (API) of the ionospheric plasma. According to the characteristics of the scattered signal, a number of the most important parameters of the ionospheric plasma and the neutral atmosphere are determined. The electron density, velocities of regular and turbulent vertical motions, the temperature and the density of the neutral atmosphere were determined by the characteristics of the scattered signal. CADI digital ionosonde captured ionograms every 15 minutes. API were located by pulses with a duration of 30 μs and with a repetition rate of 50 Hz. The amplitude and phase of the signal scattered by irregularities were recorded with the time interval of 15 s and the height step of 1.4 km. Two heating sessions were conducted from 10:01 and from 11:01 for 30 minutes each. The signals scattered by irregularities in the D- and E-regions were observed in the altitude range of 60–120 km. The signal amplitude in region D (at mesospheric altitudes) began to recover 8–10 minutes after the end of the heating. This means that the state of the D-region, including the electron concentration, has changed during the 30 minutes of the heating. Microwave measurements of the emission spectrum in the ozone line showed that changes in the radiation intensity correlated with the operation period of the SURA heating facility. The decrease in the content of mesospheric ozone over two heating sessions was averaged 20% of the O₃ content in the unperturbed lower ionosphere which at the altitude of 60 km was equal to $(9.08 \pm 0.25) \cdot 10^9$ mol/cm³. The ozone content which was estimated from the measured O₃ night spectra for measurements on September 26 and 27, was 30% higher than the unperturbed day value. It is an illustration of the diurnal variation of the mesospheric ozone which is associated with the sunset and sunrise.

Experiments were carried out with the support of the Russian Foundation for Basic Research (grants No 18-45-520009 and No 18-05-00293). The processing of measurement results using the API technique

was carried out within the framework of the project No 5.8092.2017/8.9 of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation.

1. Kulikov Yu.Yu., V.L. Frolov. Influence of artificially perturbed ionosphere on mesospheric ozone // Chemical physics. 2013. V. 32, № 11. P. 26–30.
2. Andrianov A.F., N.V. Bakhmet'eva, V.D. Vyakhirev et al. Investigation of variations in mesospheric ozone with simultaneous diagnostics of ionospheric plasma during a heating experiment on the SURA heating facility // Radiophysics and quantum electronics. 2019 (in press).

Отклик атмосферы Земли на мощный всплеск гамма-излучения. Модельное исследование с ХКМ

Зубов В.А.¹ (v_zubov@main.mgo.rssi.ru), Розанов Е.В.², Егорова Т.А.²

¹Главная геофизическая обсерватория им. А.И. Воейкова, ул. Карбышева 7, 194021 Санкт-Петербург, Россия

²Physikalisch-Meteorologisches Observatorium, World Radiation Center, Dorfstrasse 33, CH-7260 Davos Dorf, Switzerland

Химико-климатическая модель (ХКМ) SOCOL 2.0 использована для оценки отклика земной атмосферы на мощный импульс гамма-излучения от источника космического происхождения. Исходя из современных астрофизических представлений, по заданной энергии, продолжительности и спектральному составу гамма-лучевого всплеска (ГЛВ) большой мощности было определено количество молекул атмосферного азота, которые диссоциируют под действием гамма-лучей, а также распределение по высоте концентраций NO и NO₂, возникающих в результате процесса диссоциации. Последующие атмосферные эффекты окислов азота, индуцированных ГЛВ, зависят от даты всплеска и направления, откуда приходит поток гамма лучей. Чтобы оценить отклик атмосферы на ГЛВ для различных дат и направлений с ХКМ SOCOL 2.0 были выполнены 6 пятилетних модельных экспериментов для условий 2000 г.: (1) ГЛВ приходит в экваториальную зону; (2) ГЛВ приходит со стороны Северного полюса зимой; (3) аналогично (2), но летом; (4) ГЛВ приходит со стороны Южного полюса зимой и (5) аналогично (4), но летом и (6) ГЛВ отсутствует.

Сравнение результатов численных экспериментов (1)–(5) с результатами модельного расчета в отсутствии ГЛВ (6) позволяет определить величину воздействия ГЛВ на температуру, скорость ветра и концентрацию атмосферного озона в зависимости от даты и направления прихода гамма-излучения. Указанное сравнение также дает возможность оценить среднее время восстановления состава и динамики атмосферы к их характерным значениям до прихода ГЛВ.

Respond of the Earth atmosphere to a Gamma-Ray Burst. Model study with CCM

V.A. Zubov¹ (v_zubov@main.mgo.rssi.ru), E.V. Rozanov², T.A. Egorova²

¹A.I. Voeikov Main Geophysical Observatory, 7 Krabyshev str., 194021 Saint-Petersburg, Russia

²Physikalisch-Meteorologisches Observatorium, World Radiation Center, Dorfstrasse 33, CH-7260 Davos Dorf, Switzerland

Chemistry-climate model (CCM) SOCOL 2.0 have been used to estimate the Earth atmosphere response to a substantial short-term increase of the gamma-radiation (gamma-ray burst) from some space source. On the base of the modern astrophysical concepts the energy, duration and spectrum of a gamma-ray burst (GRB) have been specified and used to calculate the number of the dissociated molecules of atmospheric nitrogen. Further from these data the altitude profiles of NO and NO₂ concentrations have been reconstructed. The following atmospheric effects of the GRB active nitrogen depend on the time moment and ray direction of GRB. Therefore to estimate the atmospheric response to GRB for various times and directions the 6 five-year long model runs have been carried out with CCM SOCOL 2.0 for the initial and boundary conditions of 2000: (1) GRB

with equatorial direction; (2) GRB with the North Pole direction in winter; (3) GBR with the North Pole direction in summer; (4) GRB with the South Pole direction in winter; (5) GRB with the South Pole direction in summer; (6) without GRB.

The comparison of the model experiments (1)–(5) results with the reference model run (6) allowed us to evaluate the GBR effects on the temperature, wind speed and ozone concentration in the atmosphere depending on the time moment and ray direction of GRB. Also the comparison of the modeling results provided an opportunity to estimate the mean time of the recovery of the GRB impacted atmosphere to its unperturbed condition.

Влияние атмосферного блокирования в Западной Сибири на изменение концентрации метана и углекислого газа в зимний и летний периоды

Антохина О.Ю. (antokhina@iao.ru), Антохин П.Н., Аршинов М.Ю., Белан Б.Д.,
Давыдов Д.К., Козлов А.В., Фофонов А.В.

Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, пл. Ак. Зуева 1, 634055 Томск, Россия

Атмосферное блокирование – наиболее значительное крупномасштабное явление циркуляции средних широт. С блокированием связано большинство аномалий погоды и газового состава атмосферы в средних широтах. Мы оценили изменение концентрации углекислого газа (CO_2) и метана (CH_4) в приземном слое атмосферы в периоды блокирования в летний и зимний периоды. Концентрации были получены на основе непрерывных измерений, проведенных с 2004 по 2016 год в рамках русско-японского сотрудничества JR-STATION [1]. Мы также использовали базу данных MACC/CAMS (доступна по адресу <https://apps.ecmwf.int/datasets/>). События блокирования были идентифицированы в соответствии с критериями Тибалди и Молтени с использованием данных реанализа Era-Interim. События продолжительностью более пяти дней были включены в список блокирующих событий. Мы рассмотрели 10 блокирующих событий летом и 12 событий зимой. На основе подробного синоптического анализа атмосферной циркуляции, включая анализ траекторий и результаты моделирования с WRF-Chem, мы сделали ряд ключевых выводов о механизмах влияния блокирования на концентрацию парниковых газов. Как правило, в оба сезона условия блокирования атмосферы способствуют повышению концентрации как CH_4 , так и CO_2 . Летом атмосферное блокирование оказывает максимальное влияние на концентрацию метана, так как вариации углекислого газа оказываются сильно зависимыми от поглощения растительностью. Концентрация метана увеличивается в основном за счет увеличения выбросов от природных пожаров, связанных с блокированием (2005, 2007, 2012, 2016 и 2017 годы в Сибири). Вторым значимым фактором является накопление выбросов метана различного происхождения (естественные пожары, болота и т.д.) в «блокирующем куполе». Для самых длительных событий блокирования средняя концентрация метана была превышена на 400 млрд^{-1} .

Эффект зимнего блокирования осуществляется путем изменения высоты пограничного слоя. В отличие от летнего периода, зимой концентрации парниковых газов тесно связаны, о чем свидетельствует высокий положительный коэффициент корреляции CH_4 и CO_2 . Это указывает на единообразные факторы изменения обоих парниковых газов зимой. Согласно предлагаемому механизму, увеличение концентрации как CH_4 , так и CO_2 наблюдается в циклонической части блокинга, образованной адвекцией полярных воздушных масс и чаще локализующейся в южных районах Западной Сибири. Увеличение концентрации происходит за счет уменьшения высоты пограничного слоя и образования инверсии. Средняя разница в концентрации CH_4 между периодами блокировки и периодами, предшествующими блокированию, составила 133 млрд^{-1} (диапазон изменчивости от 50 до 370 млрд^{-1}), для CO_2 – 9.5 млн^{-1} (диапазон изменчивости от 4 до 17 млн^{-1}). Средняя скорость роста концентрации в течение периода блокировки составляла $48 \text{ млрд}^{-1}/\text{день}$ для CH_4 (максимальное значение 182

млрд⁻¹/день, минимальное 12 млрд⁻¹/день), для CO₂ – 3 млн⁻¹/день (максимальное значение 9 млн⁻¹/день, минимум 1 млн⁻¹/день). Среднее увеличение для CH₄ составило 268 млрд⁻¹, для CO₂ – 17 млн⁻¹.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ № 17-05-00119, 17-05-00374

1. Sasakawa M., K. Shimoyama, T. Machida et al. Continuous measurements of methane from a tower network over Siberia // *Tellus*. 2010. V. 62B. P. 403–416.

The link between the atmospheric blocking in Western Siberia and the concentration of carbon dioxide and methane in summer and winter

O.Yu. Antokhina (antokhina@iao.ru), P.N. Antokhin, M.Yu. Arshinov, B.D. Belan,
D.K. Davydov, A.V. Kozlov, A.V. Fofonov

V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics SB RAS, 1 Ac. Zuev sq., 634055 Tomsk, Russia

Atmospheric blocking is the most significant large-scale phenomenon of the circulation in mid-latitudes. The blocking causes most extremes of weather and gas composition of the atmosphere in mid-latitudes. We estimated a change in the carbon dioxide (CO₂) and methane (CH₄) concentration in the surface layer during the periods of atmospheric blocking observed in summer- and winter-time. The concentrations have been derived from continuous measurements carried from 2004 to 2016 in Siberia at Japan-Russia Siberian Tall Tower Inland Observation Network (JR-STATION) [1]. We also used the MACC/CAMS data base (available at <https://apps.ecmwf.int/datasets/>). The blocking events were identified in accordance with Tibaldi and Molteni criteria with the use of the Era-interim reanalysis data. The events lasting more than five days have been included in the blocking event list. We examined 10 blocking events in summer and 12 events in winter. Based on the detail synoptic analysis of atmospheric circulation including the trajectory analysis and the results of modeling with WRF-Chem we have come to the conclusion about the main atmospheric blocking effects on the concentration in summer and winter. Generally, for both seasons, the atmospheric blocking conditions contribute to increasing the concentration both of CH₄ and CO₂. In the summer, the atmospheric blocking has the maximum effect on methane concentration, since carbon dioxide variations are strongly dependent on the absorption by vegetation. The concentration of methane increases mainly due to the growth in emissions from natural fires associated with blocking (2005, 2007, 2012, 2016 and 2017 in Siberia). The second significant factor is the accumulation of methane emissions from different origins (natural fires, wetlands, etc.) in the «blocking dome». For the longest blocking events, the average methane concentration was exceeded by 400 ppb.

The effect of winter atmospheric blocking is carried out by changing the boundary layer height. In contrast to the summer period, a high correlation coefficient between the CH₄ and CO₂ has been obtained. This indicates the uniform drivers for changing both greenhouse gases in winter. According to the proposed mechanism, an increase in both of CH₄ and CO₂ concentration is observed in the cyclonic part of the blocking, formed by the advection of polar air masses and more often localized in the southern regions of Western Siberia. The increase in concentration occurs due to a decrease in the height of the boundary layer and the formation of inversion. The average difference in the CH₄ concentration between the blocking periods and the periods preceding the blocking was 133 ppb (range of variability from 50 to 370 ppb), for CO₂ – 9.5 ppm (range of variability from 4 to 17 ppm). The average growth rate of concentration during the blocking period was 48 ppb/day for CH₄ (the maximum value of 182 ppb/day, the minimum 12 ppb/day), for CO₂ – 3 ppm/day (the maximum value of 9 ppm/day, minimum – 1 ppm/day). The average increase for CH₄ was 268 ppb, for CO₂ – 17 ppm.

The study was carried out with the financial support of the Russian Foundation for Basic Research in the framework of research projects № 17-05-00119, 17-05-00374.

1. Sasakawa M., K. Shimoyama, T. Machida et al. Continuous measurements of methane from a tower network over Siberia // *Tellus*. 2010. V. 62B. P. 403–416.

Эффекты солнечных протонных событий в системе термосфера-ионосфера в модели полной атмосферы EAGLE

Бессараб Ф.С.¹ (bessarabf@wdizmiran.ru), Суходолов Т.В.^{1,2,3}, Клименко М.В.¹,
Клименко В.В.¹, Кореньков Ю.Н.¹, Розанов Е.В.^{1,2,3}

¹КФ Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН,
ул. Пионерская 61, 236035 Калининград, Россия

²Physikalisch-Meteorologisches Observatorium, World Radiation Center, Davos, Switzerland

³Institute for Atmospheric and Climate Science, ETH Zurich, Zurich, Switzerland

В данной работе представлено исследование отклика параметров ионосферы и термосферы на Солнечные Протонные События (СПС), которые происходили 17 и 20 января 2005 года, выполненное с помощью Entire Atmosphere GLocal model (EAGLE). Известно, что основная часть энергии протонов поглощается значительно ниже F и E областей ионосферы, поэтому и прямой эффект от СПС в параметрах ионосферы невелик. К тому же вслед за протонным событием обычно развивается геомагнитное возмущение, которое значительно сильнее воздействует на ионосферу и тем самым маскирует воздействие СПС в данных наблюдений. Эффективно исследовать подобные явления можно с помощью самосогласованных моделей атмосферы и ионосферы.

В представленной работе исследование проводилось с помощью полной модели атмосферы EAGLE. Характеристики потоков солнечных протонов и скорости ионизации от них рассчитывались с помощью Atmospheric Ionization Module Osnabrück (AIMOS), который используется в EAGLE. Численные эксперименты проводились для января 2005 г. В процессе расчетов изменялись только характеристики протонных потоков, все остальные входные параметры модели EAGLE, в том числе параметры электронных высыпаний, соответствовали спокойным условиям. Следует заметить, что протонные события 17 и 20 января 2005 г. отличались друг от друга параметрами спектра и величиной потоков. Так, основная энергия СПС 17 января приходилась на протоны с энергией более 10 МэВ, а 20 января – более 100 МэВ. Максимумы скорости ионизации располагались на высоте около 60 км и 40 км в первом и во втором случае, соответственно.

Результаты модельных расчетов продемонстрировали небольшое повышение в критической частоте экваториального F2 слоя (около 15%) после СПС 17 января. Дальнейший анализ показал, что увеличение foF2 является следствием повышения концентрации атомарного кислорода из-за изменения динамического режима термосферы. Протонное событие 20 января не приводит к сколь-нибудь значительным изменениям в F2-области ионосферы.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РНФ №17-17-01060.

Effects of solar proton events in the thermosphere-ionosphere system in the whole-atmosphere model EAGLE

F.S. Bessarab¹ (bessarabf@wdizmiran.ru), T.V. Sukhodolov^{1,2,3}, M.V. Klimenko¹,
V.V. Klimenko¹, Yu.N. Korenkov¹, E.V. Rozanov^{1,2,3}

¹Branch of N.V. Pushkov Institute of Earth Magnetism, Ionosphere and Radio-Wave Propagation, 61
Pionerskaya str., 236035 Kalinigrad, Russia

²Physikalisch-Meteorologisches Observatorium, World Radiation Center, Davos, Switzerland

³Institute for Atmospheric and Climate Science, ETH Zurich, Zurich, Switzerland

The influence of the Solar Proton Events (SPEs) of 17 and 20 January 2005 on the thermosphere and ionosphere has been investigated using the Entire Atmosphere GLocal (EAGLE) model. It is known that the main part of the solar proton energy is absorbed significantly below the F and E regions of the ionosphere, therefore the direct effect by SPE on the ionospheric parameters is not large. In addition, a geomagnetic disturbance which usually follows SPE has a much stronger effect on the ionosphere and thus masks the effect of SPE in observation data. Such phenomena can be effectively investigated using self-consistent models of the atmosphere and ionosphere.

This study was performed with entire atmospheric model EAGLE. The characteristics of the solar proton fluxes and their ionization rates were calculated using the Atmospheric Ionization Module Osnabrück (AIMOS), which is used in the EAGLE. Numerical simulations were performed for January 2005. Only the ionization rates caused by the proton flux were changed in the calculations, and all other input parameters of the EAGLE model, including the parameters of the electron precipitations, corresponded to quiet geomagnetic conditions. It should be noted that the proton events on January 17 and 20, 2005 differed from each other by the parameters of the spectrum and the magnitude of the fluxes. Thus, the 17 January event was characterized by a large injection of solar particles peaking at the 10 MeV, and 20 January event had a peak at 100 MeV. The ionization rate maxima were located at an altitude of about 60 km and 40 km in the first and second cases, respectively.

The results of model calculations demonstrated a weak increase in the critical frequency of the equatorial F2 layer (about 15%) after the SPE on January 17. Further analysis has shown that an increase in foF2 is a consequence of an increase in the density of atomic oxygen due to a change in the thermospheric circulation. The 20 January proton event does not lead to any significant changes in the F2 region of the ionosphere.

This work was supported by the grant of the Russian Science Foundation No. 17-17-01060.

Сравнение температур верхней атмосферы, полученных по данным наземных и спутниковых наблюдений

Васильев Р.В. (roman_vasilyev@iszf.irk.ru), Артамонов М.Ф., Саункин А.В.
Институт солнечно-земной физики СО РАН, ул. Лермонтова 126-а, 664033 Иркутск, Россия

Наземные и спутниковые наблюдения температуры верхней атмосферы взаимно дополняют друг друга, первые обеспечивают относительно высокое временное разрешение наблюдений вторые – глобальную картину температурного поля. Сопоставление данных, полученных при помощи спутниковых и наземных средств наблюдений, полезно для оценки качества получаемой информации, особенно для устройств, недавно введенных в эксплуатацию.

В работе проводится сопоставление температуры верхней атмосферы, полученной по данным наблюдения доплеровского уширения линии кислорода 557.7 нм при помощи интерферометра Фабри-Перо, установленного в геофизической обсерватории ИСЗФ СО РАН «Торы» (51.81° с.ш., 103.08° в.д.), и температуры в диапазоне высот 80–110 км над геофизической обсерваторией. Высотные профили температуры были получены при помощи широкополосного микроволнового радиометра SABER, установленного на спутниковой платформе TIMED. Несмотря на значительное систематическое смещение (около 100 K), двухлетняя динамика температуры, полученная при помощи наземного интерферометра Фабри-Перо, хорошо соответствует сезонному ходу и вариативности температуры, полученной спутниковым радиометром на высоте около 93 км за этот же промежуток времени.

Результаты наблюдений получены с использованием оборудования Центра коллективного пользования «Ангара» <http://ckp-rf.ru/ckp/3056/>. Обработка результатов спутниковых наблюдений выполнена при финансовой поддержке гранта РНФ (проект № 18-17-00042). Обработка результатов наземных наблюдений выполнена в рамках базового финансирования программы ФНИ П.16.

Comparison of the upper atmosphere temperature obtained by ground-based and satellite observation data

R.V. Vasilyev (roman_vasilyev@iszf.irk.ru), M.F. Artamonov, A.V. Saunkin

Institute of Solar-Terrestrial Physics of the Siberian Branch of the RAS, 126a Lermontova str., 664033 Irkutsk, Russia

Ground-based and satellite observations of the upper atmosphere temperature are complemented each other. First ones supply the relatively high temporal resolution and the second ones – the global picture of the temperature field. The comparison of satellite and ground-based data is useful for evaluation of the quality the information obtained especially for the instruments started to operate recently.

We performed the correlation of the upper atmosphere temperature obtained by the Doppler widening of the OI 557.7 airglow line observed with the Fabry-Perot interferometer installed in the geophysical observatory ISTP SB RAS "Tory" (51.81° N, 103.08° E) with the temperatures in the height range 80–110 km over the observatory. The height profiles of temperature were obtained with the broadband microwave radiometer SABER of the satellite platform TIMED. In spite of significant systematic shift (about 100 K) the two-year temperature dynamic obtained with ground-based instrument is in consistent with seasonal trend and variations of the temperature obtained by satellite radiometer at the 93 km height.

The observational results are obtained using equipment of "СКР-Angara" <http://ckp-rf.ru/ckp/3056/>. Processing of the satellite data were performed at the financial support RSF grant (project №18-17-00042). Processing of the ground-based data was performed at the financial support of base program FNI II.16.

Моделирование отклика атмосферной циркуляции на высыпания энергичных частиц при различной структуре стратосферного полярного вихря

Кулямин Д.В.^{1,2} (kulyamind@mail.ru), Розанов Е.В.^{2,3,4}

¹*Институт вычислительной математики им. Г.И. Марчука РАН, ул. Губкина 8, 119333 Москва, Россия*

²*Филиал института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН, пр. Победы 41, 236017 Калининград, Россия*

³*ФМО Мировой радиационный центр, Давос, Швейцария*

⁴*Институт атмосферных и климатических наук, Федеральный технологический институт, Цюрих, Швейцария*

Представленный доклад посвящен проблеме моделирования отклика атмосферной циркуляции и характеристик Земного климата на изменения в озоновом слое, вызываемые высыпаниями энергичных частиц из верхней атмосферы. В основе исследования лежат численные эксперименты с комплексной моделью общей циркуляции атмосферы ИВМ РАН (INM AGCM) (версия для высот 0–90 км). Энергичные частицы, зарождающиеся в Земной магнитосфере, способны проникать в атмосферу в приполярных областях. Взаимодействуя с основными компонентами воздуха, эти частицы являются ключевым химическим источником окислов азота и водорода, которые способствуют разрушению атмосферного озона. Короткоживущие окислы водорода образуются и достаточно быстро разрушаются в основном в полярной мезосфере, в то время как окислы азота, образующиеся в мезосфере и нижней термосфере, являются более долгоживущими, так что они могут достигать средней стратосферы и каталитически разрушать стратосферный озон. В основном это происходит зимой в приполярной области, ограниченной стратосферным циркумполярным вихрем. Так как прямое моделирование описанного выше эффекта высыпаний частиц требует наличия химико-климатической модели атмосферы, включающей верхние слои атмосферы вплоть до нижней термосферы и учитывающей комплексные химические процессы, а также длительного времени расчетов, в этой работы мы проводили идеализированные численные эксперименты, используя полученные ранее оценки изменений озона, вызванные

высыпаниями энергичных частиц. Для учета долгосрочного эффекта частиц в используемой версии модели циркуляции INM AGCM в предписанное распределение атмосферного озона вводился средний сезонный ход его относительного разрушения только в области внутри циркумполярного вихря, воспроизводимого самой моделью. Для определения границы области полярного вихря в ходе эксперимента рассчитывалось распределение потенциальной завихренности (на изоэнтропической поверхности 600 К) и для каждой долготы определялось широта максимума градиента завихренности, ближайшего к Северному полюсу.

Известно, что предполагаемый эффект высыпаний частиц на климат напрямую связан с изменчивостью стратосферного вихря, которая определяется многими динамическими процессами (в основном распространением и разрушением волн). Особенностью данной работы является рассмотрение роли разной структуры полярного вихря при оценках эффекта разрушения озона под действием энергичных частиц. Для учета разной структуры и силы циркумполярного вихря были проведены 2 контрольных эксперимента по воспроизведению климатического состояния циркуляции атмосферы (сроком на 20 лет), для одного из которых воспроизводимый полярный вихрь в среднем был относительно слабым и неразвитым по структуре, а для другого сильным (данный эффект достигался за счет изменения характеристик гравитационных волн, параметризуемых в модели). Для условий этих контрольных экспериментов были проведены аналогичные численные расчеты, но с учетом уменьшения озона, вызванного высыпаниями частиц (методика которого описана выше).

Анализ результатов показал противоположный эффект высыпаний частиц для различного состояния вихря: при сильном и развитом фоновом полярном вихре дополнительное разрушение озона привело к значительному ослаблению вихря (вплоть до $\sim 15\text{--}18$ м/с), сильному охлаждению полярной области стратопauзы (~ 8 К) и потеплению нижней стратосферы (до 10 К), вызванными перестройкой циркуляции. При слабом стратосферном вихре наблюдался противоположный эффект высыпаний частиц: усиление вихря в среднем, соответствующий нагрев полярной области стратопauзы и охлаждение нижней полярной стратосферы. На земной поверхности отклонения зимней температуры Арктики были существенны (до 3–6 К в максимумах) и противоположны по знаку. Данные результаты могут говорить о существовании двух принципиально различных режимов циркуляции стратосферы, при которых эффекты разрушения полярного озона могут вызывать противоположный отклик.

Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 17-17-01060).

Modeling the response of atmospheric circulation to energetic particle precipitations at different structure of the stratospheric polar vortex

D.V. Kulyamin^{1,2} (kulyamind@mail.ru), E. Rozanov^{2,3,4}

¹*Institute of Numerical Mathematics RAS, 8 Gubkin str., 119333 Moscow, Russia*

²*West Branch of N.V. Pushkov Institute of Earth Magnetism, Ionosphere and Radio-Wave Propagation, 41 Pobeda ave., 236017 Kalinigrad, Russia*

³*World Radiation Center, Davos, Switzerland*

⁴*IAC ETH, Zurich, Switzerland*

In this talk we address to the energetic particles precipitation (EPP) impact on atmospheric circulation and characteristics of the Earth's climate. The study is based on numerical experiments with the complex atmospheric general circulation INM RAS model (INM AGCM) (version for 0–90 km altitudes). Energetic particles originating from the Earth's magnetosphere are able to reach the middle atmosphere altitudes over the high latitudes. Interacting with the major air components, these particles serves as the key chemical source of nitrogen and hydrogen oxides, which contribute to the atmospheric ozone losses. Hydrogen components are generally short-lived and their influence is confined to the mesosphere/upper stratosphere. Nitrogen oxides compounds are generally produced in the mesosphere and lower thermosphere at high latitudes but they are long-lived, so they could reach middle stratosphere and catalytically destroy the stratospheric ozone. This mainly

occurs during winter in the polar region bounded by the stratospheric polar vortex. Since the complete modeling of the above-mentioned EPP effects requires a complex atmospheric chemistry model with inclusion of altitudes up to the lower thermosphere, as well as a long calculation time, in this work we performed idealized numerical experiments with INM AGCM models using previously calculated estimates of ozone changes caused by EPP. To account for the long-term effect of particles precipitation in used version of the model we introduced the average seasonal cycle of the relative ozone depletion caused by EPP to the ozone distribution prescribed in INM AGCM only in the region inside the polar vortex reproduced by the model itself. In order to determine the polar vortex location we calculated the potential vorticity distribution (at 600 K isentropic surface) and defined the position of the maximal latitudinal vorticity gradient closest to the North Pole.

It is generally accepted that the expected EPP impact on Earth climate is directly related to the variability of the stratospheric polar vortex, which is generally determined by various dynamical processes (mainly by the propagation and breaking of the atmospheric waves). In this work we consider the role of a different polar vortex structure in evaluating the effect of the ozone depletion caused by EPP. In order to account for the different structure and strength of the polar vortex we performed two control experiments to reproduce the atmospheric general circulation (for a period of 20 years). For the first run the simulated polar vortex was relatively weak and undeveloped in structure, and for the second one we obtained rather strong vortex. This difference was achieved by changing the characteristics of gravity waves parameterized in the model. For the same conditions of control experiments we carried out similar model runs implying the ozone depletion caused by EPP.

Analysis of the results has revealed opposite EPP effects for different polar vortex structures: for strong vortex case the ozone depletion leads to the weakening of polar vortex (up to 18 m/s), strong cooling of stratopause polar region (~ 8 K), as well as warming of lower stratosphere (up to 10 K) caused by circulation changes. For the weak vortex case the effect is opposite. The vortex becomes stronger on average and leads to the warmer polar stratopause and the cooler lower polar stratosphere. We also found substantial (up to 3–6 K) deviations of the wintertime Arctic surface temperature which were opposite in sign for different control conditions. These results may indicate to the existence of two fundamentally different stratospheric circulation regimes in which the effects of EPP and polar ozone depletion may cause the opposite response.

This research was conducted with the support of Russian Science Foundation, grant № 17-17-01060.

Отклик собственного излучения области мезопаузы на кратковременные и долговременные изменения солнечного УФ-излучения в линии Лайман-альфа

Перминов В.И.¹ (v.perminov@rambler.ru), Далин П.А.^{2,3}, Перцев Н.Н.¹, Суходоев В.А.¹

¹Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Пыжевский пер. 3, 119017 Москва, Россия

²Swedish Institute of Space Physics, Box 812, SE-98128 Kiruna, Sweden

³Институт космических исследований РАН, ул. Профсоюзная 84/32, 117997 Москва, Россия

Исследования зависимости параметров различных слоев земной атмосферы от уровня солнечной активности являются одними из важнейших в современной гелиогеофизической науке, поскольку многие процессы в атмосфере определяются воздействием солнечного излучения. Интересным является возможность определения влияния ультрафиолетового (УФ) солнечного излучения на собственное излучение атмосферы. В настоящей работе для различных сезонов года рассматриваются изменения в температуре и интенсивности излучения гидроксила (полоса OH(6-2)) и молекулярного кислорода (полоса O₂A(0-1)) области мезопаузы (80–100 км) вследствие 27-суточных и 11-летних вариаций солнечного УФ-излучения в линии Лайман-альфа.

Статистическими методами проанализированы многолетние (2000–2018 гг.) наземные данные наблюдений характеристик мезопаузы на Звенигородской станции ($\sim 56^\circ$ с.ш.,

37° в.д.) ИФА им. А.М. Обухова РАН, методика получения которых дана в работах [1, 2]. Выявлена их отрицательная корреляция с межсуточными изменениями потока излучения Лайман-альфа и положительная на многолетнем масштабе. Также обнаружены статистически значимыми многолетние линейные тренды в интенсивности излучения ($-2 \div -3\%$ /год в зависимости от сезона) и летней температуре мезопаузы (-0.25 ± 0.23 K/год). Обсуждаются механизмы, лежащие в основе данных процессов.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 19-05-00358).

1. Pertsev N., Perminov V. Response of the mesopause airglow to solar activity inferred from measurements at Zvenigorod, Russia // *Annales Geophysicae*. 2008. V. 26, No 5. P. 1049–1056.
2. Perminov V.I., Semenov A.I., Pertsev N.N. et al. Multi-year behaviour of the midnight OH* temperature according to observations at Zvenigorod over 2000–2016 // *Adv. Space Res.* 2018. V. 61, No 7. P. 1901–1908.

Response of mesopause airglow characteristics to short-term and long-term changes in solar UV-radiation in the Lyman-alpha line

V.I. Perminov¹ (v.perminov@rambler.ru), P.A. Dalin^{2,3}, N.N. Pertsev¹, V.A. Sukhodoev¹

¹A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics RAS, 3 Pyzhevsky per., 119017 Moscow, Russia

²Swedish Institute of Space Physics, Box 812, SE-98128 Kiruna, Sweden

³Space Research Institute, 84/32 Profsoyuznaya str., 117997 Moscow, Russia

Studies of Earth's atmosphere parameters in dependence on solar activity are among the most important in the heliogeophysics, since many processes in the atmosphere are determined by solar irradiance. Our interest focuses on the effect of ultraviolet (UV) solar irradiance on the airglow emissions. In this work, for different seasons of the year, changes in the temperature and intensity of hydroxyl (OH(6-2) band) and molecular oxygen airglow (O₂A(0-1) band) of the mesopause region (80–100 km) due to 27-day and 11-year variations of solar UV-irradiance in the Lyman-alpha line are considered.

Long-term (2000–2018) ground-based observations of these characteristics of the mesopause conducted at the Zvenigorod station ($\sim 56^\circ$ N, 37° E) of A.M. Obukhov IAP RAS were analyzed using statistical methods. The technique to derive data is described in [1, 2]. The negative correlation of the given airglow parameters with day-to-day changes in the Lyman-alpha radiation flux and positive one on a multi-year scale have been revealed. Also, statistically significant long-term linear trends in the airglow intensity ($-2 \div -3\%$ per year depending on the season) and summer mesopause temperature (-0.25 ± 0.23 K/yr) have been found. The mechanisms underlying these processes are discussed.

This work was supported by the Russian Foundation for Basic Research (project 19-05-00358).

1. Pertsev N., Perminov V. Response of the mesopause airglow to solar activity inferred from measurements at Zvenigorod, Russia // *Annales Geophysicae*. 2008. V. 26, No 5. P. 1049–1056.
2. Perminov V.I., Semenov A.I., Pertsev N.N. et al. Multi-year behaviour of the midnight OH* temperature according to observations at Zvenigorod over 2000–2016 // *Adv. Space Res.* 2018. V. 61, No 7. P. 1901–1908.

Состояние верхней мезосферы во время геомагнитной бури 29–31 октября 2003 г. над Маймагой по наземным и спутниковым наблюдениям

Аммосов П.П. (ammosov@ikfia.ysn.ru), Гаврильева Г.А.

Институт космических исследований и аэронавтики им. Ю.Г. Шафера СО РАН, пр. Ленина 31,
677980 Якутск, Россия

Представлены результаты измерения температуры атмосферы на высоте излучения гидроксидов (OH) во время геомагнитной бури 29–31 октября 2003 года. Измерения вращательной температуры и интенсивности излучения полосы OH(6-2), проводились на станции Маймага (63° N, 129.5° E). Также были анализированы величины объемной эмиссии

ОН, температуры атмосферы и высоты слоя, полученные радиометром SABER, установленным на спутнике TIMED. Данные наземных измерений показали увеличение вращательной температуры до 255 К и почти двукратный рост интенсивности излучения во время геомагнитной бури. Измерения со спутника показали резкое снижение высоты эмиссионного слоя до 83 км с началом роста магнитной активности.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 17-05-00855.

The state of the upper mesosphere during the geomagnetic storm of October 29-31, 2003 above Maimaga using ground-based and satellite observations

P.P. Ammosov (ammosov@ikfia.ysn.ru), G.A. Gavril'yeva

Yu.G. Shafer Institute of Cosmophysical Research and Aeronomy SB RAS, 31 Lenin ave., 677980 Yakutsk, Russia

The results of measuring the temperature of the atmosphere at the height of the hydroxyl radiation (OH) during the geomagnetic storm of October 29–31, 2003 are presented. Measurements of the rotational temperature and intensity of the emission of the OH (6-2) band were carried out at Maimaga station (63° N, 129.5° E). Also, the magnitude of OH volume emission, atmospheric temperatures and layer heights obtained by a SABER radiometer installed on the TIMED satellite were analyzed. The data of ground-based measurements showed an increase in the rotational temperature up to 255 K and an almost twofold increase in the intensity of radiation during a geomagnetic storm. Measurements from the satellite showed a sharp decrease in the height of the emission layer to 83 km with the beginning of the growth of magnetic activity.

This work was supported by the RFBR grant No. 17-05-00855.

О возможных причинах зимней температурной аномалии динамо слоя авроральной ионосферы в районе западного побережья Норвегии

Тимофеев Е.Е.¹ (evgeny.timofeev47@gmail.com), Шалимов С.Л.², Вирди Т.С.³, Швед Г.М.⁴, Валлинкоски М.К.⁵

¹*Государственный университет морского и речного флота им. адм. С.О. Макарова, ул. Двинская 5/7, 198035 Санкт-Петербург, Россия*

²*Институт физики земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Б. Грузинская ул. 10/1, 123242 Москва, Россия*

³*Physics Department, University College of Wales, Aberystwith, Wales, UK*

⁴*Санкт-Петербургский государственный университет, физ. фак., Университетская наб. 7/9, 199034 Санкт-Петербург, Россия*

⁵*Отдел космофизики Университета г. Оулу, Финланд*

Цель работы – анализ параметров плазмы динамо слоя ионосферы [T_i , T_e , N_e , модуля и азимута электрического поля (Е-поля)], диагностированных системой радаров EISCAT в магнитном зените обсерватории Тромсё в рамках международного эксперимента ERRIS. Обработка данных этого эксперимента проводилась по стандартам инструкции “Aberystwyth E.I.S.C.A.T. Summary Files”, обеспечивающей надёжные критерии удаления сомнительных данных.

На материале около 2000 измерений на высотах аврорального электроджета (102–108 км) была обнаружена инверсия разности ионной и электронной температур при переходе модуля ионосферного Е-поля за порог неустойчивости Фарлея-Бунемана (20–25 мВ/м). А именно, до ФБ-порога термо-аномалия ($T_A = T_i - T_e > 0$) имела среднюю величину не менее 50–100 К, а выше ФБ-порога – привычный перегрев электронов ($T_e \gg T_i$) [1]. Как известно, подобная аномалия противоречит общепринятым моделям нижней ионосферы. Обзор данных других обсерваторий на тех же широтах показал, что подобных аномалий там не наблюдалось. Уникальный температурный режим ионосферы над обсерваторией Тромсё связывается нами с её расположением среди прибрежных скал и фиордов и может быть

следствием т.н. «берегового эффекта» [2]. Суть этого явления в накоплении электрических зарядов вблизи береговой линии, что обусловлено существенным различием электропроводности моря и суши. Пространственный масштаб Е-поля рассматриваемого эффекта таков, что поле способно достичь высот аврорального электроджета. Наглядный пример «берегового эффекта» показан на снимке, сделанном с борта спутника DE-1 вблизи западного побережья Норвегии [2]. Видна яркая дуга свечения зелёной линии кислорода 557.7 нм, повторяющая линию берега и простирающаяся почти до границы обсерватории Тромсё. Кроме того, на снимке вдоль линии берега видна широкая область (с хаотически изорванными краями) слабого свечения красной линии кислорода 630 нм. Одной из причин этого свечения может быть разогревание F-слоя при диссипации идущего снизу инфразвука, который генерируется прибрежными морскими волнами [3]. Параметры температурной аномалии удалось сопоставить также и с данными по динамике скоростей ионных ветров на высотах от 102 до 160 км, измерявшихся с плато обсерватории Тромсё в период эксперимента ERRIS [4]. Результаты этого сопоставления будут представлены позже. Наблюдаемая термо-аномалия есть результат взаимосвязи четырёх геосфер – океана, твердой Земли, нейтральной атмосферы и ионосферы.

1. Timofeev E., S. Shalimov, M. Vallinkoski, J. Kangas. Anomalous electron cooling observed by the EISCAT within the dusty nightside auroral dynamo layer // Report presented at 40th COSPAR Scientific Assembly, Moscow State University, August 2-10, 2014.
2. Popov L.N., Yu.K. Krakovetzkii, M.B. Gokhberg, V.A. Pilipenko. Terrogenic effects in the ionosphere: a review // Phys. Earth Planet. Inter. 1989. V. 57. P. 115–128.
3. Hedlin M.A.H., K. Walker, D.P. Drob, C.D. de Groot-Hedlin. Infrasound: Connecting the solid Earth, oceans, and atmosphere // Annu. Rev. Earth Planet. Sci. 2012. V. 40. P. 327–354.
4. Huuskonen A., T.S. Virdi, G.O.L. Jones, P.J.S. Williams. Observations of day-to-day variability in the meridional semi-diurnal tide at 70° N // Ann. Geophys. 1991. V. 9. P. 407–415.

On the possible causes of the winter temperature anomaly of the dynamo layer of auroral ionosphere in the region of the western coast of Norway

E.E. Timofeev¹ (evgeny.timofeev47@gmail.com), S.L. Shalimov², T.S. Virdi³, G.M. Shved⁴, M.K. Vallinkoski⁵

¹O.O. Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, 5/7 Dvinskaya str., 198035 Saint-Petersburg, Russia

²O.Yu. Schmidt Institute of Physics of the Earth RAS, 10-1 B. Gruzinskaya str., 123242 Moscow, Russia

³Physics Department, University College of Wales, Aberystwith, Wales, UK

⁴Saint-Petersburg State University, Physics Faculty, 7/9 Universitetskaya nab., 199034 Saint-Petersburg, Russia

⁵Department of Space Physics, University of Oulu, Finland

The purpose of this work is to discuss the reasons for the formation of the winter temperature anomaly of the dynamo layer of the ionosphere in the vicinity of the Tromsø Auroral Observatory. Taking into account such factors as telluric currents and related electrical charges at the sea/land border, as well as the infrasound generated by sea waves. The paper uses data from the plasma parameters of the dynamo layer of the ionosphere (T_i , T_e , N_e , E-field module and azimuth) diagnosed by EISCAT radars at the magnetic zenith of the Tromsø Auroral Observatory, as part of the international ERRIS experiment.

The temperature anomaly detected during the analysis of this bank, $T.A. = (T_i - T_e)$, means that in most measurements in the height range of the auroral electrojet (from 102 to 108 km) the electron temperature is lower than the ion temperature by (50–100) K on average [1], that contradicts all known models of the lower ionosphere. It is also necessary to find out why such a thermo-anomaly is absent at other high-latitude auroral observatories. It is assumed that it is the influence of the so-called “Coastal effect” [2], due to the special location of the Tromsø Observatory near the coastline among coastal cliffs and fjords. A vivid example of the “coastal effect” picture is shown in [2] according to the data of the image taken from the board of the DE-1 satellite during its flight in the western coast of Norway. A bright arc of light, exactly repeating the

coastline, extends nearly to the vicinity of the Tromsø Observatory. This is the effect of telluric currents and the associated surface charges at the sea/land boundary. In addition, the mechanism of infrasound generation via ocean waves is also known [2]. When the infrasound waves dissipate at the level of the F layer, their energy is transferred to the heating of the atmosphere, accompanied by a weak luminescence in the region of 630 nm [3]. Parameters of temperature anomaly have been compared with data on dynamics of speeds of ionic winds at the heights from 102 to 160 km measured with the plateau of Tromsø observatory during an experiment of ERRIS [4]. Results of this comparison will be presented later. The observed thermo-anomaly is result of interrelation of four geospheres – the ocean, firm Earth, the neutral atmosphere and an ionosphere.

1. Timofeev E., S. Shalimov, M. Vallinkoski, J. Kangas. Anomalous electron cooling observed by the EISCAT within the dusty nightside auroral dynamo layer // Report presented at 40th COSPAR Scientific Assembly, Moscow State University, August 2-10, 2014.
2. Popov L.N., Yu.K. Krakovetskiy, M.B. Gokhberg, V.A. Pilipenko. Terrogenic effects in the ionosphere: a review // Phys. Earth Planet. Inter. 1989. V. 57. P. 115–128.
3. Hedlin M.A.H., K. Walker, D.P. Drob, C.D. de Groot-Hedlin. Infrasound: Connecting the solid Earth, oceans, and atmosphere // Annu. Rev. Earth Planet. Sci. 2012. V. 40. P. 327–354.
4. Huuskonen A., T.S. Virdi, G.O.L. Jones, P.J.S. Williams. Observations of day-to-day variability in the meridional semi-diurnal tide at 70° N // Ann. Geophys. 1991. V. 9. P. 407–415.

Меридиональная сеть инфракрасных спектрографов на Северо-Востоке России

Колтовской И.И. (koltigor@mail.ru), Аммосов П.П., Гаврильева Г.А., Аммосова А.М.,
Сивцева В.И.

*Институт космических исследований и аэронавтики им. Ю.Г. Шафера СО РАН, пр. Ленина 31,
677980 Якутск, Россия*

В данном докладе представляются научно-техническое обоснование создания меридиональной сети из инфракрасных спектрографов и полученные на данный момент результаты сравнения вращательных температур полосы $\text{OH}(3,1)$ на высоте около 87 км. Три спектрографа установлены на разнесенных по широте оптических станциях: Тикси (71.6°N , 128.7°E), Маймага (63°N , 129.5°E , возле Якутска) и Нерюнгри (56.7°N , 124.7°E). Постоянная регистрация полос гидроксила $\text{OH}(3,1)$ в далекой инфракрасной области (около 1.5 мкм) проводится на оптическом полигоне Маймага Института космических исследований и аэронавтики СО РАН с 2014 года. Оптический полигон Маймага расположен в ~ 120 км к северу от г. Якутска. Инфракрасный спектрограф состоит из монохроматора Shamrock SR-303i, оснащенного высокочувствительным инфракрасным iDus InGaAs фотодиодным детектором DU490A-1.7 производства фирмы ANDOR. Рабочий диапазон длин волн 1490–1544 нм. Охлаждение – 60°C . Угол зрения $\sim 13^\circ$. Разрешение спектрографа при ширине входной щели 0.2 мм равно 0.8 нм. Спектры молекулы гидроксила $\text{OH}(3,1)$, излучающиеся на высоте около 87 км, регистрируются в автоматическом режиме при угле погружения Солнца $> 9^\circ$ каждую минуту и передаются ежесуточно через интернет на сервер Института. С сентября 2015 года аналогичный инфракрасный спектрограф был установлен на станции ПГО Тикси, а с октября 2017 года на наблюдательном пункте в г. Нерюнгри.

Согласно многим последним работам полоса $\text{OH}(3,1)$ достаточно хорошо термализируется и соответствует температуре окружающей нейтральной атмосферы на высоте ее излучения. Выбор полосы излучения гидроксила в далекой инфракрасной области обусловлен тремя обстоятельствами. Во-первых, наибольшей интенсивностью эмиссий гидроксила в этой области спектра, во-вторых, меньшим вкладом паразитного света от звезд и Луны, в-третьих, отсутствием эмиссий полярных сияний. Измерения проводились в ночное время в безоблачную и малооблачную погоду. Регистрировались эмиссии гидроксила $\text{OH}(3,1)$ с экспозицией 60 секунд. Далее, используя известную методику, находим вращательную температуру эмиссии гидроксила $\text{OH}(3,1)$. Метод оценки вращательной температуры молекулярных эмиссий основан на подгонке модельных спектров, построенных

с учетом аппаратной функции прибора для различных, заранее заданных температур, к реально измеренному спектру методом наименьших квадратов. При оценке вращательной температуры по полосе гидроксила были использованы вероятности перехода, рассчитанные в работе [1]. Подробное описание данного метода можно найти в работе [2]. Таким образом, сделано сравнение температуры атмосферы в области мезопаузы на трех разных широтах, на авроральной (Тикси), на субавроральной (Маймага) и на средней (Нерюнгри), по измерениям, проведенным в первый сезон совместных наблюдений.

1. Hines, C.O. The upper atmosphere in motion. AGU. Washington D.C. 1974. 1027 p.
2. Ammosov P.P., Gavrilieva G.A. Infrared digital spectrograph for measuring the rotational temperature of hydroxyl // Experimental devices and techniques. 2000. № 6. P. 73–78 (in Russian).

Meridional net of infrared spectrographs on the Northeast of Russia

I.I. Koltovskoi (koltigor@mail.ru), P.P. Ammosov, G.A. Gavrilieva, A.M. Ammosova,
V.I. Sivtseva

*Yu.G. Shafer Institute of Cosmophysical Research and Aeronomy SB RAS, 31 Lenin ave., 677980 Yakutsk,
Russia*

This report presents the scientific and technical justification for the creation of a meridional net of infrared spectrographs and the obtained results, namely, the comparison of the rotational temperatures of the OH (3.1) band at the altitude of about 87 km. Three spectrographs were installed at different latitudes at optical stations: Tiksi (71.6° N, 128.7° E), Maymaga (63° N, 129.5° E, near Yakutsk) and Neryungri (56.7° N, 124.7° E). Since 2014, hydroxyl OH (3.1) bands in the far infrared region (about 1.5 μm) are recorded on the Maymaga optical station of the Institute of Cosmophysical Research and Aeronomy of the SB RAS. The optical station of Maimaga is located ~ 120 km north of the city of Yakutsk. The spectrograph consists of a Shamrock SR-303i monochromator equipped with a high-sensitivity infra-red InGaAs photodiode array detector iDus DU490A-1.7 manufactured by ANDOR Technology. The working wavelength range is 1490–1544 nm. Cooling is -60°C . Angle of view is $\sim 13^\circ$. The resolution of the spectrograph with an entrance slit width of 0.2 mm is 0.8 nm. The OH (3.1) hydroxyl molecule spectra, emitted at an altitude of about 87 km, are recorded automatically at an angle of immersion of the Sun $> 9^\circ$ every minute and transmitted daily via the Internet to the Institute's server. Since September 2015, a similar infrared spectrograph has been installed at the Tiksi station, and since October 2017 at an observation station in Neryungri.

According to many recent works, the OH (3.1) band is thermalized and corresponds to the temperature of the surrounding neutral atmosphere at the height of its radiation. The choice of the emission band of hydroxyl in the far infrared region is due to three circumstances: 1) the greatest intensity of hydroxyl emissions in this region of the spectrum; 2) the smaller contribution of parasitic light from the stars and the moon; 3) the absence of auroral emission. The measurements were carried out at night in cloudless weather. Hydroxyl emissions of OH (3,1) with an exposure time of 60 s were recorded. Further, using a known technique, we find the rotational temperature of the emission of hydroxyl OH (3.1). The method for estimating the rotational temperature of molecular emissions is based on fitting the model spectra, taking into account the instrumental function of the instrument for different, predetermined temperatures, to the actually measured spectrum by the least squares method. When estimating the rotational temperature along the hydroxyl band, the transition probabilities calculated in [1] were used. A detailed description of this method can be found in [2]. Thus, the atmospheric temperature in the mesopause region is compared at three different latitudes, at the auroral (Tiksi), at the subauroral (Maymaga) and at the middle (Neryungri).

1. Hines, C.O. The upper atmosphere in motion. AGU. Washington D.C. 1974. 1027 p.
2. Ammosov P.P., Gavrilieva G.A. Infrared digital spectrograph for measuring the rotational temperature of hydroxyl // Experimental devices and techniques. 2000. № 6. P. 73–78 (in Russian).

Влияние нейтральной атмосферы на вариации электрических полей и электронной концентрации в ионосфере: результаты модели EAGLE

Клименко М.В.¹ (maksim.klimenko@mail.ru), Клименко В.В.¹, Бессараб Ф.С.¹,
Суходолов Т.В.^{1,2,3}, Васильев П.А.¹, Кореньков Ю.Н.¹, Функе Б.⁴, Розанов Е.В.^{1,2,3}
¹КФ института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН,
ул. Пионерская 61, 236017 Калининград, Россия
²Физико-метеорологическая обсерватория, Мировой центр данных, Давос, Швеция
³Институт атмосферных и климатических исследований, Цюрих, Швеция
⁴Институт астрофизики Андалузии, Гранада, Испания

В данной работе представлены результаты новой модели всей атмосферы EAGLE, разработанной для продвижения российских и европейских исследований в области космической погоды. Результаты модели EAGLE подтверждают, что четырехпиковая долготная вариация и вечерний всплеск восточного электрического поля на экваторе являются следствием атмосферно-ионосферного взаимодействия. На основе модели EAGLE детально исследован отклик низкоширотной верхней атмосферы на внезапное стратосферное потепление 2009 года. На основе результатов модели EAGLE и данных наблюдений выявлено охлаждение тропической нижней термосферы, вызванное внезапным стратосферным потеплением. Это охлаждение влияет на зональное электрическое поле в окрестности экватора, приводя к усилению вертикального плазменного дрейфа. Важно отметить, что наряду с возмущениями термосферного ветра, который является основным источником формирования ионосферного динамо электрического поля, возмущения ионосферной проводимости значительно влияют на формирование отклика ионосферных электрических полей на внезапное стратосферное потепление.

На основе результатов модели EAGLE и данных наблюдений выявлен отклик на внезапное стратосферное потепление в виде послезаходного увеличения и предвосходного уменьшения полного электронного содержания в низкоширотной ионосфере. Показано, что в послезаходные часы стратосферное потепление влияет на низкоширотное полное электронное содержание посредством возмущений меридионального электрического поля. Было показано, что изменения фазы полусуточного мигрирующего прилива в нейтральном ветре, вызванные внезапным стратосферным потеплением 2009 года на высотах генерации динамо электрического поля, имеют существенную важность для фазовых изменений в зональном электрическом поле. Показано, что модель EAGLE является важным инструментом исследования атмосферно-ионосферного взаимодействия.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ №17-17-01060.

Neutral atmosphere influence on ionospheric electric field and electron density variations: results of the EAGLE model

M.V. Klimenko¹ (maksim.klimenko@mail.ru), V.V. Klimenko¹, F.S. Bessarab¹,
T.V. Sukhodolov^{1,2,3}, P.A. Vasiliev¹, Yu.N. Korenkov¹, B. Funke⁴, E.V. Rozanov^{1,2,3}
¹Branch of N.V. Pushkov Institute of Earth Magnetism, Ionosphere and Radio-Wave Propagation, 61
Pionerskaya str., 236016 Kalinigrad, Russia
²Physikalisch-Meteorologisches Observatorium, World Radiation Center, Davos, Switzerland
³Institute for Atmospheric and Climate Science, ETH Zurich, Zurich, Switzerland
⁴Instituto de Astrofísica de Andalucía, CSIC, Granada, Spain

This report presents the results of the new Entire Atmosphere GLoal model (EAGLE), which is designed to advance space weather related researches in Russia and Europe. The model results confirm that the four-peak longitudinal variability and the pre-reversal enhancement of the eastward electric field at the equator can be reproduced only when the atmosphere-ionosphere coupling are properly taken into account. Based on EAGLE model results we investigated in detail the low-latitude upper atmosphere response to 2009 SSW event. Using both EAGLE results and observation data, we identify a cooling in the tropical lower thermosphere caused by the SSW. This

cooling affects the zonal electric field in the vicinity of the equator, leading to an enhanced vertical plasma drift. It is important to note that along with wind disturbance, which is the main source of the formation of an electric field dynamo in the ionosphere, perturbations of the ionospheric conductivity also make a significant contribution to the formation of the electric field response to SSW.

The post sunset TEC enhancement and pre-sunrise electron content reduction are revealed as response to 2009 SSW. It is shown that at post-sunset hours SSW affects low-latitude total electron content (TEC) via disturbance of meridional electric field. We also show that the phase change of the semidiurnal migrating solar tide (SW2) in the neutral wind caused by 2009 SSW at the altitude of dynamo electric field generation has a crucial importance for SW2 phase change in zonal electric field. It is shown that the EAGLE model is an important tool for studying the atmosphere-ionosphere coupling processes.

This work was supported by the grant of the Russian Science Fund No. 17-17-01060.

Modelling of the atmospheric sulfur cycle from Pinatubo to the early 21st century

Timofei Sukhodolov^{1,4}, Aryeh Feinberg^{1,2,3}, Bei-Ping Luo¹, Thomas Peter¹, Eugene Rozanov^{1,4}, Lenny Winkel^{2,3}, and Andrea Stenke¹

¹*Institute for Atmospheric and Climate Science, ETH Zurich, Zurich, Switzerland*

²*Institute of Biogeochemistry and Pollutant Dynamics, ETH Zurich, Zurich, Switzerland*

³*Eawag, Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology, Dübendorf, Switzerland*

⁴*Physikalisch-Meteorologisches Observatorium Davos and World Radiation Center, Davos, Switzerland*

The atmospheric sulfur cycle is of significance for climate, atmospheric chemistry, ecosystems, agriculture, and human health. Although there are currently more than a dozen existing models with interactive sulfur cycle and variety of observations available for the last decades, recent studies show still a high spread in our understanding of the role of sulfur in the atmosphere and climate. Some knowledge gaps result from insufficient or contradicting observations and emission estimates, others are related to how the physical processes are treated in the models. This study aims to discuss the existing uncertainties in the modelling of the recent observed aerosol evolution and to clarify the contribution of volcanic activity.

We use the coupled aerosol-chemistry-climate model SOCOL-AER. The model includes comprehensive radiatively coupled chemistry and sulfate aerosol microphysics with the particle size distribution represented by 40 size bins spanning radii from 0.39 nm to 3.2 μm . In a number of sensitivity runs, including different emission scenarios, we present our recent model improvements, the modelling uncertainty related to the large Pinatubo eruption, full sulfur budget for volcanically quiet conditions, as well as the contribution of different sulfur sources to the aerosol evolution during the early 21-st century.

Statistical analyses of Troposphere-Ionosphere interaction in the northern hemisphere

Zahra NeNekuie Zahra¹, Memarian Mohammad Hossein¹ (memarian@yazd.ac.ir), Kalaie Mohammad Javad², Mirrokni Seyyed Majid¹

¹*Department of Physics, University of Yazd, Yazd, Iran*

²*Faculty of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran*

“Global warming” defined as an increase of global average surface temperature is one of the fundamental challenges in the current century. There is no accurate and reliable answer for the main cause of the global average surface temperature rise and its trend for the future in the field of climatology. The factors that affect global warming are anthropogenic and natural activities. At the present research, the existence or absence of correlation between ionospheric and troposphere has

been studied in relation to global warming. Total electron content and surface temperature has been used to investigate Ionosphere-Troposphere interaction. After extracting monthly mean and maximum of surface temperature and daily total electron content data, distribution of the meridian 18-year average of the mean monthly surface temperature and total electron content in the northern hemisphere in all seasons and months is analyzed. Since the maximum surface temperature and the total electron content in the tropical zone and their variations are also small, so in this case, the maximum surface temperature and maximum points of the total electron content and their variations are not seen in the middle and upper latitudes. For this reason, in order to achieve better results, the tropical region is isolated, and then the distribution of the 18-year average zonal mean of the monthly mean of the surface temperature and the total electron content have been examined.

Using this method, at first, the monthly mean surface temperature and daily mean total electron data, and then the daily maximum surface temperature and total electron data have been analyzed. The results show that in both cases, the maximum total electron content and the maximum mean of total electron content in the northern hemisphere in the summer is less than in winter. In addition, the minimum value of the total electron content is in the summer and most of it in the spring and autumn. The rate of surface temperature variations is roughly constant, while the rate of total electron content variations is fluctuating.

Исследование зависимости параметров верхней атмосферы, определяемых интерферометром Фабри-Перо, от соотношения интенсивностей излучения гидроксила и кислорода

Артамонов М.Ф. (artamonov.maksim@iszf.irk.ru), Васильев Р.В., Белецкий А.Б.

Институт солнечно-земной физики СО РАН, ул. Лермонтова 126-а, 664033 Иркутск, Россия

Методика получения параметров верхней и средней атмосферы, таких как скорость ветра и температура её нейтральной компоненты, через наблюдение собственного свечения ночного неба с помощью интерферометра Фабри-Перо известна достаточно давно. В ходе проведения эксперимента по наблюдению свечения красной линии с длиной волны 630 нм (высота максимума высвечивания ~ 250 км) интерферометром КЕО Scientific «Arinae» и последующего восстановления температуры атмосферы были обнаружены периоды аномального снижения температуры вплоть до 200–300 К. В работах, описывающих данное явление, выдвинута гипотеза о возможности «зашумления» наблюдаемой линии кислорода 630 нм с характерной температурой 600–800 К спектрально-близкими линиями гидроксила ОН из полосы 9-3 628.76 нм и 630.68 нм с характерной температурой 220 К в случае, когда значения интенсивностей данных линий сравнимы. Процесс наложения отдельных порядков интерференции близко расположенных линий на интерферограмме может, в итоге, привести к ошибкам восстановления температуры.

Основная цель настоящего исследования состояла в проверке вышеуказанной гипотезы. Для независимого определения интенсивностей указанных линий использовался спектрограф Andor Shamrock «SR-303i». Значения температуры атмосферы в те же моменты времени рассчитывались по данным интерферометра Фабри-Перо КЕО Scientific «Arinae» посредством оценки эффекта доплеровского уширения спектральных линий. На базе полученных данных было проведено исследование зависимости динамики температуры верхней атмосферы от отношения интенсивностей красной линии кислорода с длиной волны 630 нм к интенсивностям линий полосы 9-3 излучения гидроксила 628.76 нм и 630.68 нм. Исследование показало, что периоды с пониженной восстановленной температурой коррелируют с периодами малого отношения интенсивностей изучаемых спектральных линий (порядок отношения 2–5). При этом показано, что данное явление не связано с аппаратными особенностями используемого интерферометра Фабри-Перо КЕО Scientific «Arinae». Кроме того, снижение температуры, получаемой из доплеровского уширения линии кислорода 630 нм, обычно сопровождается уменьшением её интенсивности, при этом

в спектре присутствуют линии гидроксильных включений в полосе 9-3. Однако, по результатам проведенного моделирования, отношение в 2–5 интенсивностей кислорода к гидроксилу не может приводить к столь значительному снижению восстанавливаемой температуры.

По результатам исследования сделан вывод, что при определенных атмосферных состояниях вблизи Геофизической обсерватории в п. Торы, где проводились наблюдения, наблюдается эффект значительного снижения восстанавливаемых интерферометром Фабри-Перо значений температуры атомарного кислорода, находящегося в 1D состоянии. В качестве возможных причин явления можно выдвинуть предположение либо об изменении высотного профиля свечения ОI 630 нм, в результате которого преимущественная интенсивность свечения сосредотачивается на уровне мезосферы, либо о наличии значительного количества не термализованных 1D состояний обладающих низкой кинетической энергией, рождающихся в результате соударений надтепловых частиц верхней атмосферы с атомарным кислородом.

Результаты наблюдений получены с использованием оборудования Центра коллективного пользования «Ангара» <http://ckp-rf.ru/ckp/3056/>. Обработка результатов оптических наблюдений выполнена в рамках базового финансирования программы ФНИ П.16.

Studying of the upper atmosphere parameters dependence on the oxygen and hydroxyl emission intensities ratio using Fabry-Perot interferometer

M.F. Artamonov (artamonov.maksim@iszf.irk.ru), R.V. Vasilyev, A.B. Beletsky
Institute of Solar-Terrestrial Physics of the Siberian Branch of the RAS, 126a Lermontova str., 664033 Irkutsk, Russia

The method of obtaining the upper and middle atmosphere parameters, such as wind speed and the temperature of neutral component by observing the night sky's own luminosity using a Fabry-Perot interferometer has been known for a long time. During the experiment on observing the red line emission with a wavelength 630 nm (peak emission height ~ 250 km) with a KEO Scientific "Arinae" interferometer and subsequent computing the atmosphere temperature, anomalous periods of temperature decrease up to 200–300 K were found. In the works describing this phenomenon, a hypothesis was advanced about the possibility of the contamination of the 630 nm oxygen line with a characteristic temperature 600–800 K by spectrally close OH hydroxyl lines from the 9–3 band (628.76 nm and 630.68 nm) with a characteristic temperature 220 K when their intensity values are close. This effect may eventually lead to temperature recovery errors.

The main purpose of this study was to verify the above hypothesis. For the independent determination of these lines intensities, the Andor Shamrock "SR-303i" spectrograph was used. The atmospheric temperature values were calculated using the data from the Fabry-Perot interferometer KEO Scientific "Arinae" by evaluating the effect of the Doppler broadening of spectral lines. Using the data obtained, a study of the computed temperature dependence on the intensities ratio of the red oxygen line to the hydroxyl 9-3 emission band lines was conducted. The study has shown that periods with a reduced computed temperature correlate with periods of a low intensity ratio of the spectral lines (order of the ratio 2–5). It has been also shown that this phenomenon is not related to the hardware features of the used "Arinae" Fabry-Perot interferometer. In addition, a decrease in the temperature obtained from the Doppler broadening of the oxygen line 630 nm is usually accompanied by a decrease in its intensity, while the spectrum contains lines of hydroxyl inclusions in the 9-3 band. However, according to the results of the simulation, the oxygen to hydroxyl intensity ratio equal 2–5 cannot lead to such a significant decrease in the recovered temperature.

Eventually, it has been concluded that under certain atmospheric conditions near the Geophysical Observatory in Tory settlement, where observations were made, the effect of a significant decrease in the 1D state of atomic oxygen temperature values restored by the Fabry-Perot interferometer is observed. As a possible causes of the phenomenon, one can suggest either a change in the altitude profile of the OI 630 nm airglow, as a result of which the predominant

intensity of the glow is concentrated at the level of the mesosphere, or the presence of a significant number of unstable 1D states with low kinetic energy generated as a result of collisions of the upper thermal particles atmosphere with atomic oxygen.

The observation results were obtained using the equipment of CUC «Angara» <http://ckp-rf.ru/ckp/3056/>. The work was performed with budgetary funding of Basic Research program II.16.

Диагностика динамики мезосферы и нижней термосферы во время внезапных стратосферных потеплений над Азиатским регионом

Зоркальцева О.С. (meteorologist-ka@yandex.ru), Васильев Р.В., Мордвинов В.И.
Институт солнечно-земной физики СО РАН, ул. Лермонтова 126-а, 664033 Иркутск, Россия

Приведены результаты исследования динамики мезосферы-нижней термосферы с помощью инструмента для измерения скорости и направления ветра – интерферометра Фабри-Перо ИСЗФ СО РАН. Изучен отклик циркуляции верхней атмосферы над Азиатским регионом на внезапные стратосферные потепления (ВСП) за два зимних периода – 2016/2017 и 2017/2018 гг. Анализ потеплений выполнен по данным архива реанализа ERA-Interim. Несмотря на то, что ВСП сильно отличались по вертикальному развитию и пространственной структуре, а также происходили при различной фазе КДК, и в 2017-м и в 2018-м году скорости ветра на высоте 90 км по данным интерферометра показали вполне определенную реакцию на ВСП.

Работа выполнена в рамках базового финансирования программы II.16.1.2 ФНИ государственных академий на 2013–2020 гг.

Diagnostics of the dynamics of the mesosphere and the lower thermosphere during sudden stratospheric warmings over the Asian region

O.S. Zorkaltseva (meteorologist-ka@yandex.ru), R.V. Vasilyev, V.I. Mordvinov
Institute of Solar-Terrestrial Physics of the Siberian Branch of the RAS, 126a Lermontova str., 664033 Irkutsk, Russia

The report presents the results of the study of the dynamics of the mesosphere-lower thermosphere using a tool for measuring the wind speed and direction – Fabry-Perot interferometer of the ISTP SB RAS. It was studied the response of the upper atmosphere circulation over the Asian region to sudden stratospheric warming (SSW) for two winter period – 2016/2017 and 2017/2018. Analysis of warmings was made according to a reanalysis archive ERA-Interim. Despite the fact that SSW differed on vertical development and spatial structure, as well as have occurred at different phases of the QBO, the wind speed according to the Interferometer at an altitude of 90 km showed quite a reaction to the SSW in 2017 and 2018.

The work was performed in the frames of the base financing of the Program II.16.1.2 FNS State Academies for 2013–2020 гг.

Волновые свойства серебристых облаков по наблюдениям в г. Якутске

Николашкин С.В., Аммосова А.М., Колтовской И.И. (koltigor@mail.ru)
Институт космических исследований и астрономии им. Ю.Г. Шафера СО РАН, пр. Ленина 31, 677980 Якутск, Россия

Проанализирован редкий случай наблюдения волновой структуры серебристых облаков в ночь на 26 июля 2018 года, где наблюдаются две волны различной длины и пересекающимися направлениями распространения. Изучены основные характеристики этих гравитационных волн. При этом более длинные волны распространяются на северо-восток, а короткие – на юго-запад. Тогда как вся облачная структура во второй половине ночи

дрейфует на северо-восток по направлению распространения первой волны. Таким образом, короткие волны распространяются против направления преобладающего ветра. При этом предполагается, что данная ситуация подразумевает двухслойную структуру серебристых облаков.

Наблюдения были сделаны при помощи стационарно установленного телефона Samsung Galaxy S4/mini с использованием бесплатной программы Time Lapse Creator. Съемки проводились с экспозицией 2 с., каждые 2 минуты в направлении выше северного горизонта.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научных проектов № 18-45-140034 № 18-45-140063.

Wave properties of noctilucent clouds as observed in Yakutsk

S.V. Nikolashkin, A.M. Ammosova, I.I. Koltovskoi (koltigor@mail.ru)

Yu.G. Shafer Institute of Cosmophysical Research and Aeronomy SB RAS, 31 Lenin ave., 677980 Yakutsk, Russia

A rare case of the wave structure of noctilucent (mesospheric) clouds on the night of July 26, 2018 with two waves of different lengths and intersecting directions of propagation are analyzed. The main characteristics of these gravity waves are studied. At the same time, the longer waves propagate to the northeast, and the short ones – to the southwest. Whereas, the entire cloud structure drifts northeast in the second half of the night in the direction of propagation of the first wave. Thus, short waves propagate against the direction of the prevailing wind. It is assumed that this situation implies a two-layered structure of noctilucent clouds.

The observations were made using a permanently installed Samsung Galaxy S4/mini phone and the free program Time Lapse Creator. The shooting was carried out with an exposure of 2 seconds, every 2 minutes in the direction above the northern horizon.

The research was carried out with the financial support of the Russian Foundation for Basic Research (RFBR) scientific projects No. 18-45-140034 No. 18-45-140063.

Взаимная калибровка наземных измерений ОН(З-1) на высоте ~ 87 км в Маймаге (63° с.ш., $\lambda = 129.5^\circ$ в.д.) со спутниковыми данными SABER/TIMED

Аммосов П.П. (ammosov@ikfia.ysn.ru), Гаврильева Г.А., Колтовской И.И.

Институт космифизических исследований и аэронауки им. Ю.Г. Шафера СО РАН, пр. Ленина 31, 677980 Якутск, Россия

Маймага (63° N, $\lambda = 129.5^\circ$ E) является опорным пунктом меридиональной сети станций, которая создается в ИКФИА для наблюдения за изменениями в верхней мезосфере. Удобным инструментом для взаимной калибровки приборов, расположенных вдоль меридиана, является сопоставление с измерениями прибора с известными характеристиками, установленного на спутнике.

Представлен результат сравнения измерения температуры атмосферы на высоте излучения гидроксидов (~ 87 км) над Маймагой с кинетической температурой атмосферы, полученной с помощью радиометра SABER, установленного на спутнике TIMED. Анализ совпадающих измерений показал, что разница в температурах, полученных от спутника и наземного спектрографа, лежит в пределах ошибок обоих приборов. Коэффициент корреляции между двумя базами данных равен 0.8.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 17-05-00855.

Mutual calibration of ground-based measurements of OH (3-1) at the altitude of ~ 87 km in Maymaga (63°N, λ = 129.5°E) with SABER/TIMED satellite data

P.P. Ammosov (ammosov@ikfia.ysn.ru), G.A. Gavrilyeva, I.I. Koltovskoy
Yu.G. Shafer Institute of Cosmophysical Research and Aeronomy SB RAS, 31 Lenin ave., 677980 Yakutsk, Russia

Maymaga (63° N, λ = 129.5° E) is the main point of the meridional network of stations, which is created in Institute of Cosmophysical Research and Aeronomy SB RAS to observe changes in the upper mesosphere. A convenient tool for the mutual calibration of instruments located along the meridian is the comparison with measurements of an instrument with known characteristics installed on the satellite.

The result of comparing the measurement of the atmospheric temperature at the height of the hydroxyl emission (~ 87 km) above Maymaga with the kinetic temperature of the atmosphere obtained using a SABER radiometer installed on the TIMED satellite is presented. The analysis of coincident measurements has shown that the difference in temperatures obtained from the satellite and the ground-based spectrograph lies within the limits of the errors of both instruments. The correlation coefficient between the two databases is 0.8.

This work was supported by the RFBR grant No. 17-05-00855.

Влияние Южного колебания на состав и структуру тропосферы и стратосферы

Яковлев А.Р. (endrusj@rambler.ru), Смышляев С.П. (smyshl@rshu.ru)
Российский государственный гидрометеорологический университет, Воронежская ул. 79, 192007 Санкт-Петербург, Россия

Погодные и климатические процессы, происходящие на Земле, тесно связаны с взаимодействием атмосферы и океана. Наиболее известным источником этих процессов в океане и атмосфере является явление Эль-Ниньо, представляющее собой течение в восточной части тропического региона Тихого океана. Эль-Ниньо является региональным явлением, которое приводит к потеплению поверхности океана, но это явление приводит также к различным глобальным эффектам. Атмосферным компонентом Эль-Ниньо является южная осцилляция, при которой происходят колебания атмосферного давления между восточной и западной частью Тихого океана. Из-за низкого давления в восточной части начинается глубокая конвекция. Тёплая вода приводит к повышению влажности в западной части Южной и Центральной Америки, что ведет к проливным дождям, грозам, наводнениям и ураганам. Это приводит к ослаблению пассатов, вследствие чего в Австралии начинается засуха. Ла-Нинья – это холодная фаза этого явления, при которой происходит понижение температур в верхнем слое океана. При этом атмосферное давление повышается, и конвективные процессы прекращаются. Взаимодействие океана и атмосферы, в том числе и явление Эль-Ниньо – Ла-Нинья, является актуальным предметом различных научных исследований, благодаря которым были разработаны различные модели для анализа и прогноза этого явления.

Главным источником энергии для атмосферных процессов является солнечное излучение, которое нагревает поверхность Земли, и взаимодействует с атмосферой. Повышение уровня углекислого газа приводит к тому, что инфракрасное излучение Земли задерживается атмосферой, что приводит к повышению средней по Земле температуры воздуха. В результате нагревания поверхности океана возникают градиенты температуры и плотности, которые приводят к различным океанским течениям. Эти течения оказывают существенное влияние на погоду и климат как отдельных регионов, так и на Землю в целом.

Важным динамическим процессом, происходящим в полярной стратосфере, является циркумполярный вихрь, который оказывает существенное влияние на температуру и газовый состав стратосферы полярных областей. Устойчивость циркумполярного вихря определяется стабильностью зонального переноса воздушных масс, тогда как меридиональный перенос приводит к неустойчивости этого вихря. Изменения условий на нижней границе стратосферы является достаточным для различия временной изменчивости среднего потока вокруг полюса. Планетарные волны являются одним из ключевых факторов существования циркумполярного вихря в северном полушарии. Устойчивость вихря также влияет на содержание озона и на температуру: по теории, чем дольше существует циркумполярный вихрь, тем дольше будет существовать озоновая дыра, и тем ниже будет температура в полярной стратосфере. Температура полярной нижней стратосферы является важным фактором снижения содержания озона. В стратосферном полярном вихре она определяет объём стратосферных полярных облаков, от которых также зависит сила разрушения озона. Ослабление планетарных волн может приводить к понижению полярных температур и ослаблению переноса озона, что может привести к нагреванию тропической тропопаузы.

В данном исследовании использовалась химико-климатическая модель, которая была разработана в институте вычислительной математики РАН и РГГМУ. Динамическая часть модели включает в себя основные уравнения гидродинамики и термодинамики атмосферы. Химическая схема модели позволяет рассчитывать распределение 74 газовых примесей в различных химических реакциях и реакциях фотодиссоциации. Для того, чтобы результаты моделирования можно было сравнить с наблюдаемыми в период моделирования процессами в атмосфере, использовались данные ре-анализа. Моделирование осуществлялось для периода с 1979 по 2015 годы.

Работа выполнена в Российском государственном гидрометеорологическом университете в рамках государственного задания Министерства образования и науки Российской Федерации (проект 5.6493.2017/8.9), а также при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 17-05-01277-а).

Influence of South oscillation on composition and structure of troposphere and stratosphere

A.R. Jakovlev (endrusj@rambler.ru), S.P. Smyshlaev (smyshl@rshu.ru)

*Российский государственный гидрометеорологический университет, 79 Voronezhskaya str., 192007
Санкт-Петербург, Россия*

The weather and climatic processes occurring on the Earth are closely connected with interaction of the atmosphere and ocean. The most known source of these processes in the ocean and atmosphere is the El-Nino phenomenon representing the current in the Eastern tropical Pacific region. The El-Nino is the regional phenomenon which leads to the warming of the ocean surface, but this phenomenon leads also to various global effects. Atmospheric component of the El-Nino is the southern oscillation at which there are fluctuations of the atmospheric pressure between eastern and western parts of Pacific ocean. Because of low pressure in the eastern part, the deep convection begins. Warm water leads to the increase of humidity in the western part of Southern and Central America that leads to torrential rains, thunder-storms, flooding and hurricanes. This leads to the weakening of the trade winds, as a result of which drought begins in Australia. La-Nina is a cold phase of this phenomenon at which there is a downturn of temperatures in the top layer of ocean. Thus atmospheric pressure increases, and convective processes stop. Interaction of ocean and atmosphere, including the phenomenon the El-Nino - La-Nina, is an actual subject of various scientific researches owing to which various models have been developed for the analysis and the forecast of this phenomenon.

The main energy source for atmospheric processes is the solar radiation which heats the Earth surface and interacts with the atmosphere. The increase in carbon dioxide level leads to the fact that the infrared radiation of the Earth is delayed by the atmosphere, which leads to an increase in the average air temperature over the Earth. As a result of the heating of the ocean surface, temperature

and density gradients arise, that leads to different ocean currents. These currents have a significant impact on the weather and climate of both individual regions and the Earth as a whole.

The important dynamic process, occurring in a polar stratosphere, is the circumpolar vortex which influences essentially on the temperature and gas structure of the stratosphere of polar areas. The stability of the circumpolar vortex is determined by the stability of the zonal transfer of air masses, while the meridional transfer leads to the instability of this vortex. Changes in conditions at the lower boundary of the stratosphere are sufficient to distinguish the temporal variability of the mean flow around the pole. Planetary waves are one of the key factors for the existence of a circumpolar vortex in the northern hemisphere. The vortex stability also affects the ozone content and temperature: according to the theory, the longer the circumpolar vortex exists, the longer the ozone hole will exist, and the lower will be the temperature in the polar stratosphere. The temperature of the polar lower stratosphere is an important factor in reducing the ozone content. In the stratospheric polar vortex, the temperature determines the volume of the stratospheric polar clouds, on which the strength of ozone destruction also depends. Weakening of the planetary waves can lead to a decrease in polar temperatures and weakening of the ozone transfer, that can lead to heating the tropical tropopause.

In this study the chemical-climatic model developed in Institute of Numerical Mathematics RAS and Russian State Hydrometeorological University was used. The dynamic part of the model includes the basic equations of hydrodynamics and thermodynamics of the atmosphere. The chemical scheme of model allows to count the distribution of 74 gas impurity in various chemical reactions and photodissociation reactions. In order for the simulation results to be compared with the processes observed in the atmosphere during the simulation period, re-analysis data were used. The simulation was carried out for the period of 1979–2015.

This work was performed in Russian State Hydrometeorological University within of state task of Ministry of education and science of Russian Federation (project 5.6493.2017/8.9) and with the support of Russian Foundation for Basic Research (project 17-05-01277-a).

Evidence of solar interaction with equatorial Appelton anomaly provided from ionospheric GNSS Data

Mohammad Joghataei (mjoghataei@yazd.ac.ir), Niloofar Jooyandeh,
Memarian Mohammad Hossein
Space Physics Division, Department of Physics, Yazd University, Iran

The Earth's ionosphere is one of the most important layers of the atmosphere which has many effects on radio communications and occultation. The interaction of ultraviolet and X-Ray sun's radiation and charged particles by upper atmospheric atoms and molecules result in ionization process. Therefore, the amount of change particles in the ionosphere depends largely on many parameters such as time, radiation pattern, Sun-Earth geometry, ion chemistry, and solar activity.

In this research, the relationship between solar activity and total electron content (TEC) was investigated with gridded global TEC data provided from GNSS stations in IONEX format. The data has been provided for 19 years period from 1999 to 2017. The monthly TEC values are evaluated for each year and then the 19 year average are taken from the values. Then the data was divided into two sets of low and high class based on daily mean of F10.7 solar flux. The results show a direct relationship between the solar radio flux and global gridded TEC data. Monthly hourly mean of TEC exhibit two plasma bubbles seen in both hemispheres, which correspond to the Appelton anomaly and move eastward. This equatorial TEC anomaly shows a strong dependence to the F10.7 radio flux.

**СЕКЦИЯ 9. "ФОТОХИМИЯ и КИНЕТИКА ВОЗБУЖДЕННЫХ СОСТОЯНИЙ АТОМОВ и
МОЛЕКУЛ и НЕРАВНОВЕСНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ в АТМОСФЕРЕ ЗЕМЛИ и ДРУГИХ
ПЛАНЕТ"**

Председатель: к.ф.-м.н. **В.А. Янковский** (СПбГУ, СПб, Россия)

Сопредседатель: Dr. **Artem G. Feofilov** (Ecole Polytechnique, Universite Paris-Saclay, France)

**SESSION 9. "PHOTOCHEMISTRY and KINETICS of EXCITED STATES of ATOMS and
MOLECULES and NON-LTE RADIATION in the ATMOSPHERE of the EARTH and
OTHER PLANETS"**

Chairman: Dr. **V.A. Yankovsky** (SPbSU, SPb, Russia)

Co-chairman: Dr. **Artem G. Feofilov** (Ecole Polytechnique, Universite Paris-Saclay, France)

**Подгоночные коэффициенты Атмосферной полосы, полученные из
самосогласованного ракетного эксперимента**

Воробьева Е.¹ (st062133@student.spbu.ru), Григалашвили М.², Эберхарт М.³, Хедин Д.⁴,
Стрельников Б.², Любкен Ф.-Д.², Рапп М.², Лохле С.³, Фасоулас С.³, Капланов М.⁴,
Гумбел Д.⁴

¹Санкт-Петербургский государственный университет, физ. фак., Университетская наб. 7/9, 199034
Санкт-Петербург, Россия

²Институт атмосферной физики Лейбница, Кюлунгсборн, Германия

³Университет Штутгарта, Германия

⁴Стокгольмский университет, Швеция

Основываясь на самосогласованных ракетных измерениях температуры, плотности атомарного кислорода и нейтрального воздуха и объемной эмиссии Атмосферной полосы (762 нм), мы исследовали одноступенчатый и двухступенчатый механизм возбуждения $O_2(b^1\Sigma_g^+)$ в ночных условиях. Следуя [1], мы вывели эмпирические подгоночные коэффициенты, которые параметризуют эмиссию Атмосферной полосы $O_2(b^1\Sigma_g^+ - X^3\Sigma_g^-)$ (0,0). Это позволяет выразить концентрацию атомарного кислорода из ночных наблюдений эмиссии Атмосферной полосы $O_2(b^1\Sigma_g^+ - X^3\Sigma_g^-)$ (0,0).

Полученные эмпирические коэффициенты также могут использоваться для моделирования Атмосферной полосы. Кроме того, мы вывели подгоночную функцию и соответствующие коэффициенты для комбинированного (одно- и двухступенчатого) механизма. Одновременное измерение всех параметров, участвующих в теоретическом расчете наблюдаемой эмиссии $O_2(b^1\Sigma_g^+ - X^3\Sigma_g^-)$ (0,0), а именно, температуры и плотности окружающего воздуха, плотности атомарного кислорода и объемной скорости эмиссии, являются новизной и преимуществом этой работы.

1. McDade I.C., Murtagh D.P., Greer R.G.H. et al. ETON 2: Quenching parameters for the proposed precursors of $O_2(b^1\Sigma_g^+)$ and $O(^1S)$ in the terrestrial nightglow // Planet. Space Sci. 1986. V. 34. P. 789–800.

**Atmospheric band fitting coefficients derived from a self-consistent
rocket-borne experiment**

E. Vorobeve¹ (st062133@student.spbu.ru), M.E. Grygalashvily², M. Eberhart³, J. Hedin⁴,
B. Strelnikov², F.-J. Lübken², M. Rapp², S. Löhle³, S. Fasoulas³, M. Khaplanov⁴, J. Gumbel⁴

¹Saint-Petersburg State University, Physics Faculty, 7/9 Universitetskaya nab., 199034 Saint-Petersburg, Russia

²Leibniz-Institute of Atmospheric Physics at the University Rostock in Kühlungsborn, Schloss-Str. 6, 18225
Ostseebad Kühlungsborn, Germany

³University of Stuttgart, Institute of Space Systems, Stuttgart, Germany

⁴Department of Meteorology (MISU), Stockholm University, Stockholm, Sweden

Based on self-consistent rocket-borne measurements of temperature, the densities of atomic oxygen and neutral air, and the volume emission of the atmospheric band (762 nm), we examined the one-step and two-step excitation mechanism of $O_2(b^1\Sigma_g^+)$ for nighttime conditions. Following [1], we derived the empirical fitting coefficients, which parameterize the atmospheric band emission

$O_2(b^1\Sigma_g^+ - X^3\Sigma_g^-)$ (0,0). This allows us to derive the atomic oxygen concentration from nighttime observations of atmospheric band emission $O_2(b^1\Sigma_g^+ - X^3\Sigma_g^-)$ (0,0).

The derived empirical parameters can also be utilized for atmospheric band modeling. Additionally, we derived the fit function and corresponding coefficients for the combined (one- and two-step) mechanism. The simultaneous common volume measurements of all the parameters involved in the theoretical calculation of the observed $O_2(b^1\Sigma_g^+ - X^3\Sigma_g^-)$ (0,0) emission, i.e., temperature and density of the background air, atomic oxygen density, and volume emission rate, is the novelty and the advantage of this work.

1. McDade I.C., Murtagh D.P., Greer R.G.H. et al. ETON 2: Quenching parameters for the proposed precursors of $O_2(b^1\Sigma_g^+)$ and $O(^1S)$ in the terrestrial nightglow // *Planet. Space Sci.* 1986. V. 34. P. 789–800.

New look at the nighttime IR emissions of OH(v) and CO₂(v) in the mesosphere and lower thermosphere

P. Panka¹ (peter.a.panka@nasa.gov), A.A. Kutepov¹, A.G. Feofilov², L. Rezac³,
K.S. Kalogerakis⁴

¹NASA Goddard Space Flight Center, Greenbelt, MD, United States

²LMD/IPSL/Sorbonne/Ecole Polytechnique, Paris, France

³Max Planck Institute for Solar System Research, Goettingen, Germany

⁴SRI International, Menlo Park, CA, United States

The recently discovered fast, multi-quantum $OH(v \geq 5) + O(3P) \rightarrow O(1D) + OH(v')$ vibrational-to-electronic relaxation mechanism [1, 2] provided new insight into the OH and CO₂ IR emissions formation in the nighttime mesosphere and lower thermosphere (MLT). The transfer of OH(v) energy to the CO₂(v₃) via the reaction chain $OH(v) \Rightarrow O(1D) \Rightarrow N_2(v) \Rightarrow CO_2(v_3)$ resolved the long-standing, unexplained strong 4.3-μm emissions measured by SABER/TIMED and other instruments [3]. Using a new OH(v) model, which accounted for the new relaxation mechanism, and novel retrieval algorithm, we obtained O(3P) densities in the nighttime MLT which reconciled historically large discrepancies with O(3P) results obtained with different physical models and retrieval techniques in the WINDII, OSIRIS, and SCIAMACHY experiments [4].

We present a detailed study of the new mechanism effects (and associated lower O(3P) densities retrieved in the MLT) on the OH 2.0- and 1.6-μm radiances and CO₂ 4.3- and 15-μm emissions measured by the SABER instrument and energy budget of the nighttime MLT. The new efficient vibrational energy transfer from OH to CO₂ molecules causes significant coupling of these emissions. This makes single-channel retrievals of O(3P), OH, *T*, CO₂ from these emissions questionable and requires developing a multi-channel approach for retrieving these parameters self-consistently.

1. Sharma, R.D., Wintersteiner, P.P., Kalogerakis, K.S. A new mechanism for OH vibrational relaxation leading to enhanced CO₂ emissions in the nocturnal mesosphere: 4.3 μm emission in nocturnal mesosphere // *Geophys. Res. Lett.* 2015. V. 42, No 11, doi:10.1002/2015GL063724.
2. Kalogerakis, K.S., D. Matsiev, R.D. Sharma, and P.P. Wintersteiner. Resolving the mesospheric nighttime 4.3 μm emission puzzle: Laboratory demonstration of new mechanism for OH(v) relaxation // *Geophys. Res. Lett.* 2016. V. 43. P. 8835–8843.
3. Panka, P. A., A.A. Kutepov, K.S. Kalogerakis et al. Resolving the mesospheric nighttime 4.3 μm emission puzzle: comparison of the CO₂(v₃) and OH(v) emission models // *Atm. Chem. Phys.* 2017. V. 17. P. 9751–9760.
4. Panka, P., Kutepov, A.A., Rezac, L. et al. Atomic Oxygen Retrieved from the SABER 2.0- and 1.6-μm Radiances Using New First-Principles Nighttime OH(v) Model // *Geophys. Res. Lett.*, 2018. V. 45, No 11. P. 5798–5803.

Два подхода к оценке неопределенности восстановления высотного профиля CO₂ в МНТ: анализ чувствительности и метод Монте-Карло

Воробьева Е.В. (kate_vorobei@mail.ru), Янковский В.А., Мануйлова Р.О.

Санкт-Петербургский государственный университет, физ. фак., Университетская наб. 7/9, 199034

Санкт-Петербург, Россия

Модель кинетики возбужденных продуктов фотолиза O₃ и O₂, YM2011, была разработана для расчета концентрации электронно-колебательно возбужденных компонент O(¹D), O₂(b¹Σ⁺g, v = 0 - 2), а также с целью восстановления концентрации O(³P), O₃ и CO₂ в мезосфере и нижней термосфере (МНТ) из населенностей этих возбужденных уровней. Янковский и Мануйлова [1] показали, что высотный профиль концентрации CO₂ можно восстановить в интервале высот 50–100 км, используя эмиссии с уровня O₂(b¹Σ⁺g, v = 0) в качестве прокси. Анализ чувствительности модели YM2011 [1] показал, что неопределенность восстановления высотного профиля CO₂ составляет 15–30% в интервале высот 50–85 км, выше 85 км анализ чувствительности не проводился.

В настоящей работе мы провели альтернативное исследование неопределенности восстановления высотного профиля CO₂ методом Монте-Карло в расширенном диапазоне высот 50–100 км, используя экспериментально определенные погрешности каждого параметра модели. Анализ с помощью метода Монте-Карло показывает, что высотный профиль концентрации CO₂ можно восстановить в интервале высот 50–85 км с неопределенностью 10–20%, и в интервале высот 85–100 км с неопределенностью 20–60%.

Работа поддержана Российским Фондом Фундаментальных Исследований (грант РФФИ No.17-05-00532).

1. Yankovsky V.A., R.O. Manuilova. Possibility of simultaneous [O₃] and [CO₂] altitude distribution retrievals from the daytime emissions of electronically-vibrationally excited molecular oxygen in the mesosphere // J. Atm. Solar-Ter. Physics. 2018. V. 179. P. 22–33, doi:10.1016/j.jastp.2018.06.008.

Two approaches to estimation of uncertainty of CO₂ altitude profile retrieval in the MLT: sensitivity study and Monte Carlo method

E.V. Vorobeva (kate_vorobei@mail.ru), V.A. Yankovsky, R.O. Manuilova

Saint-Petersburg State University, 7/9 Universitetskaya nab., 199034 Saint-Petersburg, Russia

The model of kinetics of the excited products of O₃ and O₂ photolysis, YM2011, was developed to calculate the concentration of the electronically-vibrationally excited components O(¹D), O₂(b¹Σ⁺g, v = 0 - 2), and, also, to retrieve the O(³P), O₃ and CO₂ concentrations in the mesosphere and lower thermosphere (MLT) from the populations of these excited levels. Yankovsky and Manuilova [1] have proved that the altitude profile of CO₂ concentration can be retrieved in the altitude range of 50–100 km using the emissions from level O₂(b¹Σ⁺g, v = 0) as proxy. The sensitivity analysis [1] has shown that the uncertainty of the CO₂ altitude profile retrieval is within 15–30% in the altitude range of 50–85 km; above 85 km the sensitivity analysis was not performed.

In this study, we carried out an alternative investigation of the uncertainty of the CO₂ altitude profile retrieval by Monte Carlo method in the extended altitude range of 50–100 km, using experimentally measured error values of each model parameter. The analysis using the Monte Carlo method shows that the altitude profile of CO₂ concentration can be retrieved in the range of 50–85 km with the uncertainty of 10–20% and in the range of 85–100 km with the uncertainty of 20–60%.

This work was funded by the Russian Fund for Basic Research (grant RFBR No.17-05-00532).

1. Yankovsky V.A., R.O. Manuilova. Possibility of simultaneous [O₃] and [CO₂] altitude distribution retrievals from the daytime emissions of electronically-vibrationally excited molecular oxygen in the mesosphere // J. Atm. Solar-Ter. Physics. 2018. V. 179. P. 22–33, doi:10.1016/j.jastp.2018.06.008.

Новая оценка радиационных времен жизни синглетных возбужденных уровней молекулы O_2 для колебательных уровней $v \leq 10$

Янковский В.А. (vyankovsky@gmail.com), Воробьева Е.В., Мануйлова Р.О.
Санкт-Петербургский государственный университет, физ. фак., Университетская наб. 7/9, 199034
Санкт-Петербург, Россия

Система оптических переходов $O_2(b^1\Sigma^+g, v \leq 10 \rightarrow X^3\Sigma^-g, v'')$, $O_2(a^1\Delta_g, v \leq 10 \rightarrow X^3\Sigma^-g, v'')$ and $O_2(b^1\Sigma^+g, v \leq 10 \rightarrow a^1\Delta_g, v'')$ формирует системы Атмосферных полос кислорода: Атмосферная, ИК Атмосферная и полоса Ноксона. Концентрация молекул в возбужденном состоянии равна отношению объемной скорости эмиссии к коэффициенту Эйнштейна для соответствующего перехода. Следовательно, коэффициенты Эйнштейна для соответствующих оптических переходов необходимы для восстановления концентрации возбужденных молекул кислорода в состояниях $O_2(b^1\Sigma^+g, v' \geq 0)$, $O_2(a^1\Delta_g, v' \geq 0)$ из измеренных значений объемной скорости эмиссии в Атмосферной полосе O_2 . Кроме того, коэффициенты Эйнштейна связаны с радиационным тушением, которое является ключевым процессом в нижней термосфере при восстановлении высотного профиля концентрации $O(^3P)$ из атмосферных эмиссий [1]. На сегодняшний день не существует единой базы данных по коэффициентам Эйнштейна для переходов с электронно-колебательно возбужденных уровней $O_2(b^1\Sigma^+g, v \geq 0)$ и $O_2(a^1\Delta_g, v \geq 0)$. Этот пробел не позволяет в достаточной мере оценить радиационное тушение при моделировании фотохимических процессов.

В настоящей работе мы оценили коэффициенты Эйнштейна для излучательных переходов, основываясь на вновь рассчитанных значениях коэффициента Франка-Кондона [2].

Работа поддержана Российским Фондом Фундаментальных Исследований (грант РФФИ No.17-05-00532).

1. Yankovsky V.A. et al. Oxygen dayglow emissions as proxies for atomic oxygen and ozone in the mesosphere and lower thermosphere // J. Molec. Spectrosc. 2016. V. 327. P. 209–232, doi:10.1016/j.jms.2016.03.006.
2. Yu S., B.J. Drouin, Ch.E. Miller. High resolution spectral analysis of oxygen. IV. Energy levels, partition sums, band constants, RKR potentials, Franck-Condon factors involving the $X^3\Sigma^-g$, $a^1\Delta_g$ and $b^1\Sigma^+g$ states // J. Chem. Phys. 2014. V. 141, doi:10.1063/1.4900510.

New estimation of radiative lifetimes of excited singlet states of the O_2 molecule for vibrational levels $v \leq 10$

V.A. Yankovsky (vyankovsky@gmail.com), E.V. Vorobeve, R.O. Manuilova
Saint-Petersburg State University, Physics Faculty, 7/9 Universitetskaya nab., 199034 Saint-Petersburg, Russia

The system of optical transitions $O_2(b^1\Sigma^+g, v \leq 10 \rightarrow X^3\Sigma^-g, v'')$, $O_2(a^1\Delta_g, v \leq 10 \rightarrow X^3\Sigma^-g, v'')$ and $O_2(b^1\Sigma^+g, v \leq 10 \rightarrow a^1\Delta_g, v'')$ forms the systems of O_2 Atmospheric bands: Atmospheric, IR Atmospheric and Noxon band. The concentration of molecules in the excited state is equal to the ratio of the volume emission rate (VER) to the Einstein coefficient for the corresponding transition. Therefore, Einstein coefficients of the corresponding optical transitions are necessary for retrieving the concentrations of the excited oxygen molecules $O_2(b^1\Sigma^+g, v' \geq 0)$ and $O_2(a^1\Delta_g, v' \geq 0)$ from the measured values of VER in the O_2 Atmospheric bands. In addition, Einstein coefficients are related to the radiative quenching which is the crucial process in the lower thermosphere for retrieval of the $[O(^3P)]$ altitude profile from the atmospheric emissions [1]. Currently, there is no single database of Einstein coefficients for transitions from the electronically-vibrationally excited $O_2(b^1\Sigma^+g, v \geq 0)$ and $O_2(a^1\Delta_g, v \geq 0)$ levels. This gap of data does not allow sufficiently estimating the radiative quenching in modeling of the photochemical processes. In this study we estimated Einstein coefficients for emission transitions based on newly calculated Frank-Condon coefficient values [2].

This work was funded by the Russian Fund for Basic Research (grant RFBR No.17-05-00532).

1. Yankovsky V. A. et al. Oxygen dayglow emissions as proxies for atomic oxygen and ozone in the mesosphere and lower thermosphere // J. Molec. Spectrosc. 2016. V. 327. P. 209–232, doi:10.1016/j.jms.2016.03.006.

2. Yu S., B.J. Drouin, Ch.E. Miller. High resolution spectral analysis of oxygen. IV. Energy levels, partition sums, band constants, RKR potentials, Franck-Condon factors involving the $X^3\Sigma^-_g$, $a^1\Delta_g$ and $b^1\Sigma^+_g$ states // J. Chem. Phys. 2014. V. 141, doi:10.1063/1.4900510.

Study of non-LTE impact on the observations of Exoplanet Atmospheres

P.A. Panka¹ (peter.a.panka@nasa.gov), G.L. Villanueva¹, A.A. Kutepov^{1,2}, A.G. Feofilov³,
D. Janches¹

¹NASA Goddard Space Flight Center, Greenbelt, MD, USA

²The Catholic University of America, Washington DC, USA

³École Polytechnique, Université Paris-Saclay, 91128, Palaiseau, France

Over the last decade, there has been significant progress in measuring the atmospheric infrared and near-infrared transmission and emission from a wide variety of exoplanet atmospheres using the transit and secondary eclipse methods. Recent moderate spectral resolution measurements of mid-sized planets have revealed relatively flat spectra indicating hazy conditions in their atmospheres [1, 2]. However, the lack of spectral resolution of current measurements and the sparse wavelength coverage available has made any conclusions tentative at best. Upcoming instruments, such as the Near Infrared Spectrograph (NIRSpec) on board James Webb Space Telescope (JWST), will finally provide high-resolution observations of exoplanet atmospheres. For solar system planet atmospheres, the distinguished feature of the high-resolution observations is the strong molecular emission in narrow spectral intervals originating from the middle and upper atmospheric layers. The analysis of these high-resolution spectra requires detailed accounting for non-LTE (non-Local Thermodynamical Equilibrium) [3]. For exoplanets orbiting close to their parent stars, the non-LTE conditions begin to prevail due to the decrease in atmospheric pressure and strong pumping of molecular levels from absorption of stellar radiation.

In this study, we applied the ALI-ARMS code package [4] based on the Accelerated Lambda Iteration technique [5] developed for the non-LTE analysis of stellar spectra and successfully applied to the analysis of space observed atmospheric radiances [6–10]. In order to estimate the range of the non-LTE effect, we simulated exoplanet spectra of CO₂ at 4.3 μm and CH₄ at 3.3 μm for Trappist-1e and GJ1214b, respectively under LTE and non-LTE conditions at nadir geometries. The non-LTE strongly impacts both the structure of the CO₂ 4.3 μm spectra and intensity of the Trappist-1e emission. The non-LTE radiance around 4.27 μm is a factor of 7 stronger than that for LTE conditions. We show that the vibrational temperature of the first excited 4.3 μm level of CO₂ (compared to kinetic temperature, vibrational temperature shows the extent, at which a vibrational level is in non-LTE throughout the atmosphere) significantly deviates from the kinetic temperature, due to strong absorption of near-infrared stellar radiation at 1–2.7 μm region that leads to large differences seen between LTE and non-LTE spectra for Trappist-1e. Similar effects are seen for CH₄ 3.3 μm emissions and vibrational levels for GJ1214b.

P.A. Panka is supported under the NASA Postdoctoral Program, managed by USRA. The work by A. A. Kutepov is supported by the NSF grant 1301762 and the NASA grant NNX15AN08G. The work by GLV is supported from the NASA ROSES Exoplanets Research Program.

1. Knutson, H.A., et al. Hubble Space Telescope near-IR transmission spectroscopy of the super-Earth HD 97658b. The Astrophys. J. 2014. V. 794. P. 155.
2. Kreidberg L., et al. Clouds in the atmosphere of the super-Earth exoplanet GJ 1214b // Nature. 2014. V. 505. P. 69–72.
3. Lopez-Puertas M. and F.W. Taylor. NonLTE radiative transfer in the atmosphere. V.3. World Scientific. 2001.
4. Kutepov A.A., et al. Solution of the non-LTE problem for molecular gas in planetary atmospheres: Superiority of accelerated lambda iteration" // J. Quant. Spectr. Rad. Trans. 1998. V. 60, No 2. P. 199–220.
5. Rybicki G.B., D.G. Hummer. An accelerated lambda iteration method for multilevel radiative transfer. I-Non-overlapping lines with background continuum // Astron. and Astrophys., 1991. V. 245. P. 171–181.
6. Feofilov A.G., et al. Daytime SABER/TIMED observations of water vapor in the mesosphere: retrieval approach and first results // Atm. Chem. Phys. 2009. V. 9. P. 13943–13997.

7. Kutepov A.A. et al. Evidence of a significant rotational non-LTE effect in the CO₂ 4.3 μm PFS-MEX limb spectra // *Atm. Meas. Tech.* 2017. V. 10, No 1. P. 265–271.
8. Panka P.A. et al. Resolving the mesospheric nighttime 4.3 μm emission puzzle: comparison of the CO₂(v₃) and OH(v) emission models // *Atm. Chem. Phys.* 2017. V. 17(16). P. 9751–9760.
9. Panka P.A., Kutepov A.A., Rezac L. et al. Atomic Oxygen Retrieved from the SABER 2.0-and 1.6μm Radiances Using New First-Principles Nighttime OH(v) Model // *Geophys. Res. Lett.* 2018. V. 45, No 11. P. 5798–5803.
10. Rezac, L., et al. Simultaneous retrieval of T(p) and CO₂ VMR from two-channel non-LTE limb radiances and application to daytime SABER/TIMED measurements // *J. Atm. and Solar-Terr. Phys.* 2015. V. 130. P. 23–42.

O₃ initiated degradation reaction mechanism and kinetics of trans-2-pentenal (T2P) and 2-methyl-2-pentenal (2M2P). Theoretical study

B. Aazaad¹, Gisèle El Dib² (gisele.eldib@univ-rennes1.fr), Senthilkumar Lakshmipathi¹,
T.Yu. Chesnokova³ (ches@iao.ru)

¹*Department of Physics, Bharathiar University, Coimbatore-641046, India*

²*Institut de Physique de Rennes (IPR), UMR 6251 du CNRS, Université de Rennes 1, Campus de Beaulieu, Rennes Cedex, France*

³*V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics SB RAS, 1 Ac. Zuev sq., 634021 Tomsk, Russia*

Volatile organic compounds (VOCs) are released to the atmosphere from a variety of anthropogenic [1] and biogenic [2] sources. Aldehydes are generally observed in the troposphere which leads to the formation of secondary organic aerosols by their reaction with atmospheric oxidants such as OH, NO₃, and O₃. The present study comprises the degradation reaction of trans-2-pentenal (t2p, CH₃CH₂CH=CHCHO) and 2-methyl-2-pentenal (2m2p, CH₃CH₂CH=C(CH₃)CHO) with O₃. The initial degradation step occurs with the addition of O₃ to the unsaturated C=C double bond present in both reactants through a barrierless reactions with high exothermicity of – 88.95 and – 89.97 kcal/mol for t2p and 2m2p respectively calculated at M06-2X/6-311++G(d,p) level of theory.

The prediction of accurate rate constant was carried using canonical variational transition state theory (CVT/SCT) [3] in the temperature range of 278 to 350 K. The predicted initial rate constant of t2p with O₃ is 3.39×10^{–18} cm³ molecule^{–1} s^{–1} which matches well with the experimental results. The atmospheric life time of t2p is calculated to be 6.82 days with O₃ concentration (5×10¹¹ molecules/cm³).

1. Schauer J.J., M.J. Kleeman, G.R. Cass, B.R.T. Simoneit. Measurement of Emissions from Air Pollution Sources. 3. C₁–C₂₉ Organic Compounds from Fireplace Combustion of Wood // *Env. Sci. Techn.* 2001. V. 35. P. 1716.
2. Wildt J., K. Kobel, G. Schuh-Thomas, A.C. Heiden. Emissions of Oxygenated Volatile Organic Compounds from Plants Part II: Emissions of Saturated Aldehydes // *J. Atm. Chem.* 2003. V. 45, P. 173.
3. Garrett B.C., D.G. Truhlar. Generalized transition state theory. Bond energy-bond order method for canonical variational calculations with application to hydrogen atom transfer reactions // *J. Am. Chem. Soc.* 1979. V. 101. P. 4534–4548.

СЕКЦИЯ 10. "РАДИАЦИЯ и ДИНАМИКА АТМОСФЕРЫ в ПОЛЯРНЫХ РАЙОНАХ"

Председатель: д.ф.-м.н. А.П. Макштас (ААНИИ, СПб, Россия)

SESSION 10. " RADIATION and DYNAMICS of POLAR ATMOSPHERE"

Chairman: Prof. A.P. Makshtas (AARI, SPb, Russia)

Влияние изменений климата на газовый состав Арктики и Субарктики

Смышляев С.П.¹ (smyshl@rshu.ru), Тимофеев Ю.М.², Виролайнен Я.А.²,
Моцаков М.А.¹, Поляков А.В.²

¹Российский государственный гидрометеорологический университет, Малоохтинский пр. 98, 195196
Санкт-Петербург, Россия

²Санкт-Петербургский государственный университет, физ. фак., Университетская наб. 7/9, 199034
Санкт-Петербург, Россия

Предметом исследования является изменчивость содержания стратосферного озона в Арктике и Субарктике в период с 1980 по 2018 годы, выявление значимости физических и химических процессов в наблюдаемой изменчивости общего содержания озона (ОСО), а также особенности изменчивости содержания озона в нижней, средней и верхней стратосфере. Особое внимание обращается на характерные для всего исследуемого периода особенности сезонной изменчивости ОСО и его содержания на разных высотах, а также на наблюдаемые отклонения от средней изменчивости в отдельные годы. Для углубленного анализа особенностей отклонения изменчивости ОСО в отдельные годы были выбраны зимы 1981–1982, 1996–1997, 2010–2011 и 2015–2016 годов, соответствующие началу климатического периода, а также характеризующиеся наличием периодов необычного изменения ОСО по сравнению со средней изменчивостью за исследуемый период 1980–2018 годы. Для анализа воздействия влияющих факторов рассматривалось изменение ОСО на арктических станциях (Печора, Тикси, Мурманск и Архангельск), а также станциях Субарктики, находящихся вблизи полярного круга и подверженных значительному воздействию полярных процессов (Ханты-Мансийск, Тура, Санкт-Петербург), и в Москве, с целью оценки влияния полярных процессов на содержание озона в отдалении от полярного круга. Для всех этих станций анализировались результаты спутниковых измерений приборами OMI и SBUV, а также Российским прибором ИКФС-2, наземных измерений сети World Ozone and Ultraviolet Radiation Data Centre (WOUDC), а также численного моделирования с использованием модели газового состава нижней и средней атмосферы РГГМУ, а для станции С-Петербург, кроме того, учитывались результаты наземных измерений с помощью прибора FTIR Bruker IFS 125 HR.

В численной модели газового состава нижней и средней атмосферы осуществлялся расчет изменчивости концентрации озона и влияющих на него газов (всего 74 газа кислородного, азотного, водородного, хлорного, бромного, углеродного и серного семейств) в течение всего исследуемого периода с 1980 по 2018 годы. Для учета влияния динамических процессов на сезонную и межгодовую изменчивость содержания озона и связанных с ним газов в модель ассимилировались данные ре-анализа MERRA и ERA-Interim (температура, скорости горизонтального ветра, влажность воздуха и приземное давление). Использование предвычисленных данных ре-анализа позволило учесть влияние реально измеренных значений динамических параметров на содержание озона и связанных с ним газов. Для оценки степени влияния полярных стратосферных облаков на изменчивость озона в разные годы для каждой зимы модельные расчеты выполнялись по нескольким сценариям: с учетом и без учета формирования и эволюции полярных стратосферных облаков, а также с учетом и без учета сульфатного аэрозоля и химического разрушения озона, в предположении изменения содержания озона только под контролем динамических процессов.

Результаты проведенных модельных экспериментов и их сравнение с результатами наземных и спутниковых измерений показывают, что химическое разрушение озона объясняет только около трети наблюдаемого уменьшения озона, тогда как даже в отсутствии процессов химического разрушения озона качественный вид наблюдаемых озоновых аномалий в зимний и начало весеннего периода сохраняется и в Арктике и в Субарктике за счет влияния только динамических условий, приводящих к формированию зон дивергенции и конвергенции потоков озона.

Influence of climate change on gas composition in Arctic and Subarctic regions

S.P. Smyshlyaev¹ (smyshl@rshu.ru), Yu.M. Timofeev², Ya.A. Virolainen², M.A. Motsakov¹,
A.V. Polyakov²

¹*Russian State Hydrometeorological University, 98 Malookhtinsky, 195196 Saint-Petersburg, Russia*

²*Санкт-Петербургский государственный университет, Университетская наб. 7/9, 199034 Санкт-Петербург, Россия*

The main subject of study is the analysis of variability of total stratospheric ozone columns and ozone content in lower, middle, and upper stratosphere over Subarctic and Arctic regions in the period of 1980–2018. We tried to identify the contribution of physical and chemical processes in the observed variability of total ozone columns (TOCs). Additionally, we analyzed the general features of seasonal variability of the TOCs and ozone content in different atmospheric layers over the whole period of observation as well as the observed deviations of such variations in certain years. For detailed analysis of TOCs variability deviations, we chose the 1981–1982, 1996–1997, 2010–2011, and 2015–2016 winters which corresponded to the beginning of climatic periods and were characterized by unusual TOCs variability compared to mean variability for the whole considered period. For analysis of impact of different factors on the ozone variability, we considered the TOCs changes over Arctic stations (Pechora, Tiksi, Murmansk, and Arkhangelsk), Subarctic stations (Khanty-Mansiysk, Tura, and St. Petersburg) located near the Arctic circle and affected by polar processes, and Moscow as the example of station located on the distance from the Arctic circle but influenced by the polar processes as well. For all these stations, we analyzed the TOC data from satellite measurements (OMI, SBUV, IKFS-2), ground-based measurements of World Ozone and Ultraviolet Radiation Data Centre (WOUDC) network, and the results of numerical simulations by the RSHU model of the gas composition of lower and middle atmosphere. Additionally, for St. Petersburg station, we considered the ground-based FTIR ozone measurements by IFS Bruker 125HR instrument.

The RSHU model calculates variations of ozone concentration and distribution of ozone-influencing gases of oxygen, nitrogen, hydrogen, chlorine, bromine, carbon, and sulfur families (totally 74 species) for the entire period from 1980 to 2018. For accounting the influence of dynamical processes on ozone and ozone-related gases variability, meteorological fields (temperature, velocity, horizontal winds, humidity and surface pressure) are assimilated from MERRA and ERA-Interim reanalysis data. The use of pre-computed reanalysis data allowed to consider the impact of actual measured values of dynamic parameters on ozone and ozone-related gases. To estimate the influence of polar stratospheric clouds on ozone variability in different years, several scenarios of numerical simulations were performed for each winter: with and without considering the formation and evolution of polar stratospheric clouds; with and without taking into account sulphate aerosol and chemical ozone destruction, assuming the ozone changes caused only by dynamic processes.

The comparison of numerical simulation under different scenarios with the results of ground-based and satellite measurements demonstrates that chemical ozone destruction explains only about a third of the observed decrease in ozone. Whereas even in the absence of chemical ozone destruction processes, the observed ozone anomalies in Arctic and Subarctic regions in winter and

early spring periods are most likely caused by dynamic processes leading to the formation of divergence and convergence zones of ozone streams.

Существует ли связь между квазидвухлетними колебаниями атмосферы и изменениями содержания озона и температуры в Антарктиде?

Фролькис В.А. (vfrolkis@vf13868.spb.edu), Кароль И.Л., Киселев А.А.

Главная геофизическая обсерватория им. А.И. Воейкова, ул. Карбышева 7, 194021 Санкт-Петербург, Россия

Проблема объяснения природы квазидвухлетних колебаний (КДК) атмосферы остается открытой в настоящее время. Эти колебания модулируют планетарные волны и оказывают влияние на атмосферную ситуацию в средних широтах, воздействуют на общую циркуляцию и процессы формирования озона в атмосфере, а также взаимодействуют с таким важным для климатической системы явлением как Эль-Ниньо. Существуют публикации, высказывающие идею наличия связи КДК с содержанием антарктического стратосферного озона и с изменчивостью антарктической стратосферной температуры. Однако попытки построения гидродинамических моделей, удовлетворительно описывающих совместное поведение рассматриваемых полей, не увенчались успехом. Также не удалось определить статистическую связь между ними при помощи моделей регрессионного и корреляционного анализа.

В этой связи в настоящей работе предпринята попытка использовать альтернативный подход, основанный на аппроксимации аналитическими сигналами: 1) данных КДК (взятых из <http://www.geo.fu-berlin.de/met/ag/strat/produkte/qbo/qbo.dat>), эволюции антарктических 2) озона и 3) температуры стратосферы (по данным <http://ozonewatch.gsfc.nasa.gov/meteorology>). Такой подход позволяет проанализировать взаимосвязь между их амплитудными огибающими и частотными характеристиками. Аппроксимация исходных полей аналитическим сигналом строится на основе преобразования Гильберта, алгоритм которого состоит в последовательном применении прямого дискретного преобразования Фурье, модификации полученной спектральной составляющей и обратного дискретного преобразования Фурье. Произведено сравнение амплитудных огибающих и частотных характеристик КДК, вариаций антарктических озона и температуры стратосферы, на основе которого выделены скрытые статистические связи между ними.

Is there a relationship among the quasi-biennial oscillations of the atmosphere and changes in ozone and temperature in Antarctica?

V.A. Frolkis (vfrolkis@vf13868.spb.edu), I.L. Karol, A.A. Kiselev

A.I. Voeikov Main Geophysical Observatory, 7 Karbyshev str., 194021 Saint-Petersburg, Russia

The problem of explaining the nature of atmospheric quasi-biennial oscillations (QBO) remains open up to now. These oscillations modulate planetary waves and affect the atmospheric situation at mid-latitudes and the general circulation and formation of ozone in the atmosphere, and interact with such an important phenomenon of the climate system as El Niño. There are publications that suggest a link between QBO and Antarctic stratospheric ozone and the variability of Antarctic stratospheric temperature. However, attempts to construct hydrodynamic models satisfactorily describing the joint behavior of the fields under consideration were unsuccessful. It was also not possible to determine the statistical relationship between them using regression and correlation models.

In this regard, in the present work an attempt was made to use an alternative approach based on the approximation of 1) QBO data (taken from [317](http://www.geo.fu-</p></div><div data-bbox=)

berlin.de/met/ag/strat/produkte/qbo/qbo.dat), the evolution of the Antarctic 2) ozone and 3) the temperature of the stratosphere (according <http://ozonewatch.gsfc.nasa.gov/meteorology>) by analytical signals. This approach allows us to analyze the relationship between their amplitude envelope and frequency characteristics. The approximation of the initial fields by the analytical signal is based on the Hilbert transform, which consists in the sequential application of the direct discrete Fourier transform, modification of the obtained spectral component and the inverse discrete Fourier transform. The amplitude envelope and frequency characteristics of the QBO, variations of Antarctic ozone and stratospheric temperature were compared, as result the hidden statistical relationships between them were identified.

Результаты гидрометеорологических исследований на российских арктических обсерваториях

Макштас А.П.¹ (maksh@aari.ru), П.В. Богородский¹, И.А. Махотина¹, В.Ю. Кустов¹,
И.И. Большакова¹, Жукова О.Л.¹, Г. Хейнеман²

¹Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, ул. Беринга 38, 199397 Санкт-Петербург, Россия

²Трирский университет, отдел экологической метеорологии, Германия

В настоящее время гидрометеорологические исследования, выполняемые Лабораторией экспериментальной климатологии Арктики ААНИИ, проводятся на трех полярных обсерваториях: гидрометеорологическая обсерватория Тикси, открытая в 2010 году и являющаяся с 2012 г. участником Международной сети арктических обсерваторий (IASOA, www.iasoa.org); научно-исследовательский стационар «Ледовая база Мыс Баранова», открытый ААНИИ осенью 2013 года и превратившийся к настоящему времени в полноценную обсерваторию, на которой проводятся комплексные исследования практически по всем направлениям наук о Земле; Российский научный центр на Шпицбергене, где в 2017 году были развернуты комплексные исследования процессов взаимодействия атмосферы и поверхности тундры. Основной задачей Обсерваторий является обеспечение качественного мониторинга метеорологических процессов для комплексного анализа состояния полярной атмосферы и подстилающей поверхности.

На основе данных градиентных наблюдений и оригинального метода расчета турбулентных потоков тепла рассчитаны компоненты теплового баланса подстилающей поверхности. Показано наличие направленного к сильно выхолаженной зимой подстилающей поверхности турбулентного потока явного тепла и направленного к подстилающей поверхности турбулентного потока скрытого тепла летом, обусловленного ее относительно низкой влажностью в бесснежный период. По данным НИС «Ледовая база Мыс Баранова» выявлена зависимость характеристик энерго-массообмена в переходные сезоны года от состояния окружающего арх. Северная Земля ледяного покрова.

Сравнение температурного режима деятельного слоя почвы на четырех участках тундры вблизи ГМО Тикси показало его существенное различие для участков, расположенных на расстоянии не более 1 км друг от друга и находящихся при одинаковом воздействии атмосферных процессов. Выявлена разница между районами тундры, покрытыми растительностью, и ее каменистыми участками, типичными для архипелагов Северная Земля и Шпицберген. На каменистых участках амплитуда колебаний сезонной температуры в два раза больше, а длительность эффекта нулевого занавеса в 3–7 раз короче. В дополнение к результатам прямых наблюдений за глубинами оттаивания почв на песчано - гравийно-глинистых почвах, наблюдаемых в Тикси и на острове Большевик, представлены модельные оценки их многолетних тенденций в 1950-х–2010-х годах.

Измерения профилей скорости ветра в пограничном слое атмосферы, выполненные в рамках сотрудничества ААНИИ и Трирского университета с помощью СОДАРА, показали, что в зимний период в Тикси струйные течения нижнего уровня (СТНУ) имеют место в 30%

от всех зарегистрированных профилей. Средняя высота СТНУ составила порядка 250 м. На о. Большевик, несмотря на преобладание устойчивой стратификации, было зарегистрировано в течение зимы не более 10 случаев СТНУ. В то же время был обнаружен сильный топографический эффект, обусловивший преобладание юго-западных ветров на высотах до 100 м, особенно явный при ветрах более 10 м/с.

Анализ метеорологического режима свободной атмосферы за период с 2013 года по 2018 год, выполненный по данным сети российских арктических станций, расположенных в регионе Баренцева и Карского морей, показал, что положительный тренд температуры воздуха в регионе наблюдается на всех станциях зимой и осенью от земли до уровня 400 гПа. В верхней тропосфере и нижней стратосфере наблюдается похолодание. Аналогичные результаты были получены и на основании анализа аэрологических данных циркумполярной Международной сети арктических обсерваторий (IASOA) за период 1963–2017 гг.

Работа выполнена при поддержке проекта Министерства образования и науки Российской Федерации RFMEFI61617X0076.

Results of meteorological studies at the Russian Arctic observatories

A.P. Makshtas¹, P.V. Bogorodskii¹, I.A. Makhotina¹, G. Heineman², V.Yu. Kustov¹,
I.I. Bolshakova¹, O.L. Zhukova¹

¹Arctic and Antarctic Research Institute, 38 Bering str., 199397 Saint-Petersburg, Russia

²University of Trier, Dept. of Environmental Meteorology, Germany

Presently meteorological studies, performed by Laboratory of Experimental Climatology of the Arctic (AARI), are conducted at three polar observatories: Hydrometeorological Observatory Tiksi, opened in 2010 and participating since 2012 in International Network of Arctic Observatories (IASOA, www.iasoa.org); Research Station "Ice Base Cape Baranova", opened by AARI in the fall of 2013 and turned now into Observatory, where comprehensive studies are carried out in almost all branches of the Earth sciences; The Russian Science Center on Svalbard, where studies of air–surface interaction processes had been launched in 2017. The main goal of the Observatories is to provide high-quality monitoring of meteorological processes for comprehensive analysis of polar atmosphere and underlying surface.

Based on the data of meteorological and radiation measurements and the original method for estimation of turbulent heat fluxes, the components of surface heat balance at the Cape Baranov are calculated. It is founded that turbulent sensible heat flux mainly directs to strongly radiation cooled underlying surface in winter as well as turbulent latent heat flux in summer due to relatively low surface humidity in the snow-free period. The data of RS "Ice Base Cape Baranova" allowed us to reveal the dependence of energy mass exchange characteristics during the transitional seasons on the state of sea ice cover, surrounding the Severnaya Zemlya.

Comparison of temperature regime of the active soil layer in four areas of tundra near HMO Tiksi showed its significant difference for areas located at distance no more than 1 km from each other under the same influence of atmospheric processes. The difference between the vegetation areas of tundra and rocky areas, typical also for Severnaya Zemlya and Svalbard, is founded. At rocky areas the amplitude of soil seasonal temperature fluctuations is twice larger and the duration of the zero-curtain effect is three–seven times shorter. In addition to the results of direct observations of the soil thawing depths on sandy-gravel-clay soils, observed in Tiksi and the Bolshevik Island, model estimates of its long-term trends in the 1950s–2010s were obtained.

Measurements of wind velocity profiles in the atmospheric boundary layer, carried out within the framework of cooperation between AARI and University of Trier with SODAR, showed that during winter the lower level jets (LLS) in Tiksi took place in 30% of all registered profiles. The average height of LLS was about 250 m. At the Bolshevik island, despite the predominance of stable stratification, no more than 10 cases of LLS were registered during the winter. At the same time strong topographic effect was discovered there, which determined the prevalence of south-westerly winds at altitudes up to 100 m, especially for winds more than 10 m/s.

Analysis of meteorological regime of free atmosphere for period from 2013 to 2018, performed with data of the network of the Russian polar stations located in the Barents and Kara Sea regions, showed the positive trend in air temperature at all stations in the winter and autumn from surface to 400 hPa. A cooling was observed in the upper troposphere and lower stratosphere. Similar results were obtained based on the analysis of upper-air data from the circumpolar International Network of Arctic Observatories (IASOA) for the period 1963–2017.

This work was supported by the RFMEFI61617X0076 project of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation.

Физико-химические характеристики атмосферного аэрозоля на «Ледовой базе Мыс Баранова» – 2018 г.

Сакерин С.М.¹ (sms@iao.ru), Голобокова Л.П.², Кабанов Д.М.¹, Калашникова Д.А.³, Козлов В.С.¹, Макаров В.И.⁴, Макштас А.П.⁵, Попова С.А.⁴, Радионов В.Ф.⁵, Симонова Г.В.³, Турчинович Ю.С.¹, Ходжер Т.В.², Хуриганова О.И.², Чанкина О.В.⁴, Чернов Д.Г.¹

¹Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, пл. Ак. Зуева 1, 634021 Томск, Россия

²Лимнологический институт СО РАН, ул. Улан-Баторская 3, 664033 Иркутск, Россия

³Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Академический пр. 10/3, 634055 Томск, Россия

⁴Институт химической кинетики и горения им. В.В. Воеводского СО РАН, ул. Институтская 3, 630090 Новосибирск, Россия

⁵Арктический и Антарктический научно-исследовательский институт, ул. Беринга 38, 199397 Санкт-Петербург, Россия

В последние годы активизировались исследования характеристик атмосферного аэрозоля в Российском секторе Арктики. Об этом свидетельствует проведение ежегодных морских экспедиций и организация регулярных наблюдений на полярных станциях – в Тикси, Баренцбурге (арх. Шпицберген) и научно-исследовательском стационаре «Ледовая база Мыс Баранова» (о. Большевик арх. Северная Земля; далее «Мыс Баранова»). В докладе обсуждаются результаты исследований физико-химических характеристик аэрозоля, выполненных на «Мысе Баранова» в полярный день 2018 г. В состав измеренных характеристик входят: аэрозольная оптическая толща (АОТ) в диапазоне спектра 0.34–2.14 мкм, концентрации аэрозоля и сажи, элементный и ионный состав аэрозоля, содержание в нем органического и элементного углерода, концентрации газообразных примесей, а также изотопный состав углерода в пробах аэрозоля и снега. Проводится сравнительный анализ с аналогичными характеристиками, измеренными в этот же период в Баренцбурге и на юге Западной Сибири (обсерватория «Фоновая» в 60 км западнее Томска и п. Ключи в 12 км от Новосибирского Академгородка).

Средние значения характеристик аэрозоля на «Мысе Баранова» составили: АОТ (0.5 мкм) – 0.063, массовая концентрация сажи – 0.07 мкг/м³, массовая концентрация аэрозоля – 9.1 мкг/м³, содержание в аэрозоле органического и элементного углерода 0.51 мкгС/м³ и 0.06 мкгС/м³, соответственно, суммарная концентрация водорастворимых ионов – 0.85 мкг/м³ (зимой) и 0.71 мкг/м³ (весной). Полученные значения характеристик немного ниже, чем в Баренцбурге и в несколько раз меньше, чем на юге Западной Сибири в этот же период. В ионном составе аэрозоля в период полярной ночи преобладали ионы морского происхождения (Na⁺, Cl[–] и K⁺), что согласуется с данными в других районах Арктики. С наступлением полярного дня, концентрации морских ионов снизились, а континентальных (NH₄⁺, Ca²⁺, SO₄^{2–}) увеличились. Кроме того, в воздухе возросло содержание газообразных примесей (HCl, SO₂, NH₃). В сравнении с Баренцбургом (подверженному антропогенному влиянию), отмечены более низкие концентрации SO₄^{2–}, NO₃[–], Ca²⁺, Mg²⁺ и NH₄⁺.

Основной вклад в элементный состав (> 10 нг/м³) аэрозоля на «Мысе Баранова» вносят К, Са, Fe, Br, Zn и Ti. Концентрации Cr, Ni, Cu, Mn, Pb и Sr находятся в диапазоне 1–10 нг/м³,

и низкое содержание ($< 1 \text{ нг/м}^3$) отмечено у элементов V, Co, Se, Rb, Zr, Mo, Nb и Y. Такая же группировка элементов наблюдается и в п. Ключи, но концентрации примерно на порядок выше. Исключением являются более низкие (в 6 раз) концентрации Br. Изотопный состав углерода в пробах аэрозоля, отобранных весной ($\delta^{13}\text{CAA} = -27.4 \text{ ‰}$), оказался легче состава дисперсной фракции взвесей, осажденных на снег за всю зиму ($\delta^{13}\text{CDF} = -26.4 \text{ ‰}$). Причиной таких значений $\delta^{13}\text{CDF}$, по-видимому, является зимнее накопление продуктов сгорания мусора на полярной станции или дальние переносы с континента.

Работа выполнялась при поддержке Комплексной программы фундаментальных исследований СО РАН П.1 (проект № 0368-2018-0014) и Подпрограммы 4 «Организация и обеспечение работ и научных исследований в Арктике и Антарктике» государственной программы РФ «Охрана окружающей среды» на 2012–2020 годы.

Physical-chemical characteristics of atmospheric aerosol at “Ice Base Cape Baranov” in 2018

S.M. Sakerin¹ (sms@iao.ru), L.P. Golobokova², D.M. Kabanov¹, D.A. Kalashnikova³, V.S. Kozlov¹, V.I. Makarov⁴, A.P. Makshtas⁵, S.A. Popova⁴, V.F. Radionov⁵, G.V. Simonova³, Yu.S. Turchinovich¹, T.V. Khodzher², O.I. Khuriganova², O.V. Chankina⁴, D.G. Chernov¹

¹V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics, SB RAS, 1 Ac. Zuev Sq., Tomsk, Russia

²Limnology Institute, SB RAS, 3 Ulan-Batorskaya str., Irkutsk, Russia

³Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems, SB RAS, 10/3 Akademicheskoy ave., Tomsk, Russia

⁴Voevodsky Institute of Chemical Kinetics and Combustion, SB RAS, 3 Institutskaya str., Novosibirsk, Russia

⁵Arctic and Antarctic Research Institute, 38 Bering str., Saint-Petersburg, Russia

Studies of atmospheric aerosol characteristics in the Russian Arctic have been more active in recent years. This is indicated by yearly marine expeditions and regular observations organized at polar stations in Tiksi, Barentsburg (Spitsbergen Archipelago) and at the scientific-research stationary “Ice Base Cape Baranov” (Bolshevik Island, Severnaya Zemlya Archipelago; henceforth “Cape Baranov”). In this report, we discuss the results of studying the physical-chemical characteristics of aerosol, performed at “Cape Baranov” during polar day of 2018. The measured characteristics include: aerosol optical depth (AOD) in the wavelength range of 0.34–2.14 μm , aerosol and black carbon concentrations, elemental and ion composition of aerosol, organic and elemental carbon contents in aerosol, concentrations of gas-phase admixtures, as well as isotopic composition of carbon in the aerosol and snow samples. A comparative analysis is performed between these characteristics and those measured in the same period of time in Barentsburg and in the south of Western Siberia (“Fonovaya” observatory 60 km west of Tomsk and Klyuchi site 12 km apart from Novosibirsk Akademgorodok).

Average values of aerosol characteristics at “Cape Baranov” had been: 0.063 for AOD (0.5 μm), 0.07 $\mu\text{g/м}^3$ for black carbon mass concentration, 9.1 $\mu\text{g/м}^3$ for aerosol mass concentration; organic and elemental carbon contents in aerosol were 0.51 $\mu\text{gC/м}^3$ and 0.06 $\mu\text{gC/м}^3$ respectively, and the total concentrations of water-soluble ions were 0.85 $\mu\text{g/м}^3$ (in winter) and 0.71 $\mu\text{g/м}^3$ (in spring). The obtained values of characteristics are a little lower than in Barentsburg, and several-fold smaller than in the south of Western Siberia in that same period. Ions of marine origin (Na^+ , Cl^- , and K^+) predominated in ion composition of aerosol during the period of polar night, consistent with data in other Arctic regions. With return of sunlight, the concentrations of marine ions decreased, and those of continental ions (NH_4^+ , Ca^{2+} , SO_4^{2-}) increased. In addition, the content of gas-phase admixtures (HCl , SO_2 , NH_3) increased in air. Lower SO_4^{2-} , NO_3^- , Ca^{2+} , Mg^{2+} and NH_4^+ concentrations are noted as compared to Barentsburg (subject to anthropogenic effect).

The main contribution to the elemental composition ($> 10 \text{ ng/м}^3$) of aerosol at the “Cape Baranov” is made by K, Ca, Fe, Br, Zn, and Ti. The Cr, Ni, Cu, Mn, Pb, and Sr concentrations are in the range of 1–10 ng/м^3 , and a low content ($< 1 \text{ ng/м}^3$) is found for the elements V, Co, Se, Rb, Zr, Mo, Nb, and Y. A similar grouping of elements is also observed at Klyuchi site; however, the concentrations are about an order of magnitude higher. The exceptions are lower (by a factor of 6)

Br concentrations. The isotopic composition of carbon in aerosol samples, collected in spring ($\delta^{13}\text{CAA} = -27.4\text{‰}$), turned out to be lighter than the composition of disperse fraction of suspensions, having been deposited on snow throughout the winter ($\delta^{13}\text{CDF} = -26.4\text{‰}$). These $\delta^{13}\text{CDF}$ values seem to be due to wintertime accumulation of waste combustion products at the polar station or long-range transports from the continent.

This work was supported by the Complex program of basic research II.1, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences (project no. 0368-2018-0014) and Subprogram 4 “Organization and support of work and scientific research in Arctic and Antarctic” of state program of the Russian Federation “Environmental protection” for 2012–2020.

Оценки средних полей концентраций и потоков эмиссии/стока метана в регионе Карского и Баренцева морей по результатам летних измерений на острове Белый в 2016 и 2017 гг.

Поддубный В.А. (Vassily.Poddubny@gmail.com), Наговицына Е.С., Маркелов Ю.И.,
Буюевич А.Г., Антонов К.Л., Омелькова Е.В., Манжуров И.Л., Васильева Ю.А.
Институт промышленной экологии УрО РАН, ул. С. Ковалевской 20, 620990 Екатеринбург, Россия

Представлены результаты измерений концентраций парниковых газов с помощью лазерного газоанализатора Picarro G2401. Измерения проводились в июле–августе 2016 и 2017 гг. во время экспедиций на остров Белый, расположенный в Карском море севернее полуострова Ямал. Анализ результатов измерений метана выполнен с помощью вычислительной технологии пассивной локации атмосферы ветровыми потоками или флюид-локации атмосферы (ФЛА), т. е. с помощью наземного дистанционного зондирования атмосферы. Представлена постановка задачи о ФЛА для оценки по данным локальных измерений средних полей концентрации атмосферной примеси и распределений в пространстве её источников и стоков. Даются определения новых функций: среднего эффективного поля концентрации и среднего эффективного поля источников. В дифференциальной и интегральной формах записаны системы уравнений, которым подчиняются эти функции.

Обсуждаются результаты численного решения поставленной задачи в квазидвумерном приближении, полученные на основе данных измерений приземных концентраций метана на острове Белый в летние месяцы 2016 и 2017 гг. Характерными чертами восстановленных средних полей концентраций метана в регионе Карского и северной части Баренцева морей являются: более высокие значения в 2017 г., мозаичность, а также более высокие значения концентраций метана на континенте и в прибрежной полосе. Обсуждаются особенности распределений в пространстве источников и стоков метана в период летних измерений. Найдены зависимости площадей и потоков поступления или удаления метана из атмосферы от объёмной мощности эмиссии/стока. Эти зависимости позволяют оценить, находится ли исследуемая система в состоянии динамического равновесия по массе примеси или в какой степени равновесие нарушено. Показано, что исследуемый регион Карского и северной части Баренцева морей в июле–августе 2016 года обеспечивал нетто-сток метана, а в соответствующий период 2017 года был слабым нетто-источником метана.

Выполнено сравнение найденных оценок плотностей потоков метана с морской поверхности с результатами прямых измерений других авторов. На примере региональной задачи продемонстрирована возможность использования технологии пассивной ветровой локации атмосферы, флюид-локации атмосферы, для принципиально нового метода расчёта баланса парниковых газов в атмосфере, основанного не на данных инвентаризации источников, а на результатах измерений в пунктах мониторинга.

Исследования выполнены при финансовой поддержке Уральского отделения РАН, проект № 18-9-2-25 и РФФИ, проект № 18-31-00170. Для измерений концентраций парниковых газов на о. Белый была использована аппаратура «ЦКП арктических экологических исследований ИПЭ УрО РАН».

Estimates of average concentration fields and fluxes of methane emission/sink in the Kara and Barents Seas based on summer measurements on Bely Island in 2016 and 2017

V.A. Poddubny (Vassily.Poddubny@gmail.com), E.S. Nagovitsyna, Yu.I. Markelov, A.G. Buevich, K.L. Antonov, E.V. Omelkova, I.L. Manzhurov, Y.A. Vasilyeva
Institute of Industrial Ecology UB RAS, 20 S. Kovalevskaya str., 620990 Ekaterinburg, Russia

The results of measurements of greenhouse gas concentrations using a Picarro G2401 laser gas analyzer are presented. The measurements were carried out in July–August 2016 and 2017 during expeditions to Bely Island, located in the Kara Sea north of the Yamal Peninsula. Analysis of the results of methane measurements was performed using computational technology of passive location of the atmosphere by wind or fluid location of the atmosphere (FLA), i.e., using ground-based remote sensing of the atmosphere. The formulation of the FLA problem is presented for estimating average concentration fields of atmospheric contaminants and spatial distributions of its sources and sinks, using data of local measurements. Definitions of new functions – the average effective concentration field and the average effective source field – are given. Systems of equations that obey these functions are written in differential and integral forms.

The results of numerical solution of the formulated problem in the quasi-two-dimensional approximation, obtained on the basis of measurements of surface methane concentrations on the Bely Island in the summer months of 2016 and 2017, are discussed. Characteristic features of the restored average methane concentration fields in the Kara region and the northern part of the Barents Sea are the following: the higher values in 2017, mosaic patterns, as well as higher values of methane concentrations on the continent and in the coastal zone. The features of the spatial distributions of sources and sinks of methane in the period of summer measurements are discussed. The dependences of areas and fluxes of methane intake or removal from the atmosphere on the volume emission/sink capacity are found. These dependences allow us to assess whether the system under study is in a state of a dynamic equilibrium with regard to the mass of the contaminant or to what degree the equilibrium is disturbed. It is shown that the studied region of the Kara and the northern parts of the Barents Sea in July–August 2016 was a net sink of methane, and in the corresponding period of 2017 was a weak net source of methane.

The obtained estimates of the densities of methane fluxes from the sea surface are compared with results of direct measurements by other authors. The possibility of using the technology of passive wind location of the atmosphere, fluid location of the atmosphere, as a fundamentally new method for calculating the balance of greenhouse gases in the atmosphere, is demonstrated. This method is based on measurement results at monitoring sites, and not on source inventory data.

The studies were carried out with the financial support of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Project No. 18-9-2-25 and the RFBR, Project No. 18-31-00170. The equipment of the Center for Arctic Ecological Research IIE UB RAS was used to measure the concentrations of greenhouse gases on Bely Island.

Радиационные характеристики дымового аэрозоля в ИК-области спектра в районе ст. Тикси по данным измерений и численного моделирования

Журавлева Т.Б. (ztb@iao.ru), Артющина А.В., Насртдинов И.М., Чеснокова Т.Ю.
Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, пл. Ак. Зueva 1, 634055 Томск, Россия

Одним из основных климатообразующих составляющих атмосферы является черный углерод (BC). Для оценки его влияния на радиационно-температурный режим отдельных районов арктической зоны в течение двух последних десятилетий проводится регулярный мониторинг различных параметров атмосферы с использованием систем наземного, судового, самолетного и космического базирования. Наблюдательная сеть на территории

российской Арктики представлена преимущественно метеорологическими станциями. На этом фоне уникальные по номенклатуре измерения характеристик атмосферы были получены на международной Гидрометеорологической обсерватории (ГМО) «Тикси» в течение 2012–2014 гг. (<https://www.esrl.noaa.gov/psd/iasoa/stations/tiksi>). Помимо стандартных метеопараметров и радиационных потоков там проводились измерения коэффициентов рассеяния и поглощения в приземном слое атмосферы и базировался входящий в мировую сеть AERONET солнечный фотометр CE 318, функционирование которого обеспечивало восстановление оптических и микрофизических характеристик аэрозоля в столбе атмосферы.

Анализ приземных концентраций ВС ([BC]) в июне–сентябре 2012–2014 гг. показал, что наибольшее среднее значение [BC] ($\sim 140 \text{ нг/м}^3$) наблюдалось в июле 2014 г. с аномально высокими значениями ($\sim 4100 \text{ нг/м}^3$) в период 30–31 июля. Повышенные значения [BC] были следствием переноса загрязнений с восточного направления, где в этот период имели место не столь сильные, но достаточно близко расположенные к ГМО «Тикси» пожары. Этот период характеризовался также достаточно высокими значениями аэрозольной оптической толщи (AOT(500 нм) = 0.7–0.85) и показателя Ангстрема ($\alpha = 1.5\text{--}1.7$); величина альбедо однократного рассеяния в диапазоне 440–1020 нм изменялось в диапазоне 0.97–0.93 (версия 3, <http://aeronet.gsfc.nasa.gov>).

Моделирование потоков длинноволновой радиации с учетом и без учета аэрозоля выполнялось с использованием развитого авторами статистического алгоритма для расчета спектральных и интегральных характеристик [1] и алгоритма [2] в интервалах 200–2500 и 0–3000 см^{-1} . Оптические характеристики аэрозоля для решения уравнения переноса излучения были сформированы на основе представленных в модели ОПАС фракций аэрозоля (гидрофильной, негидрофильной, сажевой) таким образом, чтобы полученные значения находились в удовлетворительном согласии с данными AERONET-наблюдений в солнечном диапазоне спектра при относительной влажности 70%. При расчетах коэффициентов молекулярного поглощения использовалась база данных HITRAN-2012, а также сведения о приземной температуре (высота 2 м, интервал – 1 час) и профилях температуры и влажности, полученные по результатам радиозондирования атмосферы 2 раза в сутки (<http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>).

В работе представлены результаты сопоставления модельных потоков нисходящей радиации с данными измерений вблизи подстилающей поверхности, выполненных в безоблачной атмосфере с использованием пиргеометра Eppley PIR ($\sim 200\text{--}2500 \text{ см}^{-1}$). Максимальные различия экспериментальных и расчетных значений не превышали 25 Вт/м^2 и уменьшались до $5\text{--}7 \text{ Вт/м}^2$ при учете неопределенностей в задании вертикальных профилей температуры и влажности, возможных неточностей в задании аппаратной функции пиргеометра, ошибки измерений и расчетов и т.д. Модельные оценки показали также, что в рассматриваемых атмосферных ситуациях прямое радиационное воздействие аэрозоля с доминирующей мелкодисперсной фракцией не превосходит $1\text{--}3 \text{ Вт/м}^2$ и существенно уступает радиационным эффектам дымового аэрозоля в солнечном диапазоне.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (гранты №17-05-00245, 19-01-00351) и комплексной программы фундаментальных исследований СО РАН № П.2П «Интеграция и развитие» (проект П.2П/IX.135-10).

1. Насртдинов И.М., Журавлева Т.Б., Чеснокова Т.Ю. Статистическое моделирование переноса тепловой радиации в неоднородной облачности с учетом сферичности атмосферы. Настоящий сборник.
2. Фирсов К.М., Чеснокова Т.Ю., Бобров Е.В. Роль континуального поглощения паров воды в длинноволновых радиационных процессах приземного слоя атмосферы в регионе Нижнего Поволжья // Оптика атмосферы и океана. 2014. Т. 27, № 08. С. 665–672.

Radiative characteristics of smoke aerosol in IR spectral range in the region of Tiksi station according to measurements and numerical simulations

T.B. Zhuravleva (ztb@iao.ru), A.V. Artyushina, I.M. Nasrtdinov, T.Yu. Chesnokova
V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics SB RAS, 1 Ac. Zuev sq., 634055 Tomsk, Russia

One of the main climate-forming atmospheric constituents is the black carbon (BC). To estimate the BC effect on radiation-temperature regime in separate regions of the Arctic zone, different atmospheric parameters have been regularly monitored during last two decades, using ground-based, ship-based, aircraft, and satellite systems. The observational network on the territory of the Russian Arctic is represented predominantly by meteorological stations. In this regard, the nomenclature-unique measurements of atmospheric characteristics were performed at the «Tiksi» Hydrometeorological Observatory (HMO) during 2012–2014 (<https://www.esrl.noaa.gov/psd/iasoa/stations/tiksi>). In addition to standard meteorological parameters and radiative fluxes, the scattering and absorption coefficients in the near-surface atmospheric layer were also measured at HMO, and there was the AERONET-operated CE 318 sun photometer, functioning of which ensured retrieval of aerosol optical and microphysical parameters in the atmospheric column.

Analysis of near-surface BC concentrations ([BC]) in June–September 2012–2014 showed that the average [BC] was maximal ($\sim 140 \text{ ng/m}^3$) in July 2014, with anomalously high ($\sim 4100 \text{ ng/m}^3$) values observed in the period of 30–31 July. The increased [BC] values were a consequence of pollutant transport from the eastern direction where, in that period, there were fires, although not too strong, but quite closely located to the «Tiksi» HMO. This period was also characterized by quite high aerosol optical depths ($\text{AOD}(500 \text{ nm}) = 0.7\text{--}0.85$) and Ångström exponents ($\alpha = 1.5\text{--}1.7$); the singles scattering albedo in the wavelength range of 440–1020 nm varied in the range of 0.97–0.93 (version 3, <http://aeronet.gsfc.nasa.gov>). The simulations of longwave radiative fluxes with and without accounting for aerosol were carried out using the statistical algorithm for calculating the spectral and frequency integrated characteristics, developed by the authors [1], and algorithm [2] in the intervals of 200–2500 and 0–3000 cm^{-1} . The aerosol optical characteristics for solving the radiative transfer equation were compiled on the basis of aerosol fractions presented in OPAC model (hydrophilic, non-hydrophilic, soot fractions) such that the values obtained are in a reasonable agreement with AERONET observations in the solar wavelength range at the relative humidity of 70%. The molecular absorption coefficients were calculated using HITRAN-2012 database, as well as the information on near-surface temperature (at altitude of 2 m, at 1-hour interval) and temperature and humidity profiles, obtained from radio sensing of the atmosphere twice daily (<http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>).

In this work, we compare model-based fluxes of downward radiation with near-surface measurements, performed in the clear-sky atmosphere, using Eppley PIR pyrgeometer ($\sim 200\text{--}2500 \text{ cm}^{-1}$). The maximal differences between experimental and calculated values did not exceed 25 W/m^2 and decreased to $5\text{--}7 \text{ W/m}^2$ when we took into the consideration the uncertainties in specifying the vertical temperature and humidity profiles, possible inaccuracies in specifying the instrumental function of pyrgeometer, measurement and calculation errors, etc. The model estimates also have shown that, in the atmospheric situations considered here, the direct radiative effect of aerosol with dominant fine fraction does not exceed $1\text{--}3 \text{ W/m}^2$ and is much less than the radiative effects of smoke aerosol in the solar wavelength range.

This work was supported in part by the Russian Fund for Basic Research (through grants nos. 17-05-00245, 19-01-00351) and the Complex Program of Basic Research no. II.2P “Integration and Development”, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences (under the project II.2P/IX.135-10).

1. Nasrtdinov I.M., Zhuravleva T.B., Chesnokova T.Yu. Statistical simulation of thermal radiative transfer in inhomogeneous clouds with accounting for the atmospheric sphericity. This issue.
2. Firsov K.M., Chesnokova T.Yu., Bobrov E.V. Role of water vapor continual absorption in the atmospheric longwave radiative processes of the surface layer in the Lower Volga region // *Optika Atmosfery i Okeana*. 2014. V. 27, No. 08. P. 665–672 [in Russian].

Влияние облачности на температурный режим прилёдного слоя атмосферы в период полярной ночи по данным дрейфующих станций «Северный полюс-35–40»

Чечин Д.Г.¹ (chechin@ifaran.ru), Махотина И.А.², Макштас А.П.², Люпкес К.³

¹Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Пыжевский пер. 3, 119017 Москва, Россия

²Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, ул. Беринга 38, 199397 Санкт-Петербург, Россия

³Институт полярных и морских исследований им. Альфреда Вегенера, Ам Хандельс Хафен 12, 27570, Бремерхафен, Германия

Данное исследование описывает особенности современного термического режима приземного слоя атмосферы в Арктике в период полярной ночи в зависимости от наличия или отсутствия облачности. Основной задачей является оценка влияния облачности, скорости ветра и баланса длинноволновой радиации на температуру поверхности и приземного воздуха, а также влияние указанных факторов на разность этих температур. В работе использованы данные метеорологических измерений, выполненных на станциях «Северный полюс-35–40» (СП-35–СП-40) в период с 2007 по 2013 год. После процедуры контроля и отбраковки ошибочных данных созданы массивы 10-минутных значений основных метеорологических параметров.

Приведены рассчитанные за каждый месяц средние значения и стандартные отклонения, а также построены графики распределения повторяемости величин. Наиболее выражена бимодальность в распределении повторяемости балла облачности для станций СП-35, СП-37 и СП-38 с максимумами, соответствующими ясному (0–2 балла) и облачному (8–10 баллов) небу. Показано, что при ясном небе температура воздуха растёт с увеличением скорости ветра. При этом минимум температуры не соответствует минимуму скорости ветра, а приходится на величину 1–4 м/с. Объяснением такой закономерности может служить явление декаплинга при низких скоростях ветра (меньших некоторого порогового значения), когда поверхность и прилегающий к ней слой воздуха становятся термически слабо связаны между собой. Воздух не охлаждается от радиационно выхожденной поверхности и остаётся более тёплым, чем при более высоких скоростях ветра. Причиной декаплинга является уменьшение турбулентного потока тепла при уменьшении скорости ветра, а также уменьшение коэффициента турбулентного обмена за счет возрастающей устойчивой стратификации.

Для случаев ясного неба при низких скоростях ветра наблюдаются наибольшие разности температур поверхности и воздуха. На СП-37 максимальная разность составила около 6 К, на СП-39, 40 – не более 2 К, что соответствует относительно частой повторяемости ясного неба на СП-37 (40%) и небольшой повторяемости (20%) на СП-39, 40. В случаях облачного неба (8–10 баллов) разность температур на СП-37 при скорости ветра 2 м/с не превышает 2 К, на СП-39, 40 менее 1 К. Максимумы распределений повторяемости температуры воздуха для случаев ясного неба приходятся на 235 К (– 38°C), для облачных ситуаций на 245–250 К (– 23 С) – (– 28°C).

Полученные бимодальные распределения повторяемости температуры воздуха и баланса длинноволновой радиации подтверждают наличие двух характерных состояний АПС в Арктике в зимний период: ясного холодного и более тёплого облачного. Так, например, большая повторяемость облачных дней на СП-39 обусловила менее отрицательный баланс длинноволновой радиации и более высокие температуры воздуха. В то же время продолжительно стационарирующие антициклоны и штилевые условия могут вносить существенный вклад в понижении температуры над многолетним морским льдом. В этом случае даже при наличии облаков, визуально наблюдаемых, но прозрачных для потока длинноволновой радиации, потенциальная температура воздуха может достигать экстремально низких значений 226 К (февраль 2013 года, СП-40).

И.А. Махотиной рассчитаны статистические характеристики, приведённые в настоящем исследовании и проанализированы совместно с Д.Г. Чечиным; А.П. Макштасом проведён

критический контроль данных наблюдений, полученных на дрейфующих станциях «Северный полюс 35-40». Работа Д.Г. Чечина и И.А. Махотиной поддержана грантом РФФ (№ 18-77-10072). Работа А.П. Макштаса выполнена при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (Проект RFMEFI61617X0076).

The effect of cloudiness on the temperature regime of the atmospheric surface layer during the polar night at the drifting stations “North Pole-35–40”

D.G. Chechin² (chechin@ifaran.ru), I.A. Makhotina¹, A.P. Makshtas¹, C. Lüpkes³

¹A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics RAS, 3 Pyzhevsky per., 119017 Moscow, Russia

²Arctic and Antarctic Research Institute, 38 Bering str., 199397 Saint-Petersburg, Russia

³Alfred Wegener Institute, Helmholtz Centre for Polar and Marine Research, Bremerhaven, Germany

Present study describes a dependency of a thermal regime of the atmospheric surface layer on the presence or absence of cloudiness in the Arctic during the polar night. The main goal is to assess the effect of cloudiness, wind speed and the long-wave radiation balance on the temperature of the surface and near-surface air, as well as the effect of these factors on the difference between these temperatures. The data of meteorological measurements performed since 2007 to 2013 at the stations North Pole-35–40 (NP-35–NP-40) was used. After the data analysis, arrays of 10-minute values of the meteorological parameters were created.

Monthly mean values and standard deviations calculated for each month are given. The most pronounced bimodality is for the frequency distribution of the total cloud amount for the stations NP-35, NP-37 and NP-38 with maxima corresponding to a clear (0–2 tenths) and cloudy (8–10 tenths) sky. It is demonstrated that in clear sky conditions the air temperature shows a pronounced dependency on wind speed. Namely, it increases with increasing wind speed. The lowest temperature corresponds to a value of wind speed 1–4 m/s, not to the minimum of wind speed. This phenomenon could be explained by the air-surface decoupling at low wind speeds. Decoupling means that the underlying surface and the adjacent air layer become thermally disconnected. The air does not cool from the surface due to very weak turbulence suppressed by stratification and remains warmer than at higher wind speeds.

For cases of clear sky with low wind speeds, the greatest differences in surface and air temperatures are observed. At NP-37, the maximum difference is about 6 K, at NP-39, 40 is not more than 2 K, which corresponds to relatively frequent clear-sky situations at NP-37 (40%) and low frequency (20%) at NP-39, 40. In cases of a cloudy sky (8–10 tenths), the temperature difference at NP-37 at a wind speed of 2 m/s does not exceed 2 K, and it is less than 1 K at NP-39, 40. The typical temperature values for clear-sky cases corresponds to 235 K (–38°C), and to 245–250 K (–23...–28°C) for cloudy situations.

The obtained bimodal frequency distribution of air temperature and the balance of long-wave radiation confirm the presence of two typical atmospheric surface layer states in the Arctic during the winter period: clear cold and warmer cloudy. High frequency of cloudy days at NP-39 resulted in a less negative balance of long-wave radiation and higher air temperatures. At the same time, long-standing anticyclones and calm wind conditions can make a significant contribution to lowering the temperature over multi-year sea ice. In this case, the potential air temperature can reach extremely low values of 226 K (February 2013, NP-40) even with the presence of clouds that are visually observed, but transparent to the flux of long-wave radiation.

The data analysis made by Makhotina I.A. and Chechin D.G. was funded by the Russian Science Foundation grant (No. 18-77-10072). The dataset preparing made by Makshtas A.P. was funded by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation (project RFMEFI61617X0076).

Облачный покров в Российской Арктике в 1936–2012 гг.

Чернокульский А.В. (a.chernokulsky@ifaran.ru), Эзау И.Н.

Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Пыжевский пер. 3, 119017 Москва, Россия

Облака являются важным элементом арктической климатической системы. Арктический облачный покров чувствителен к различным климатическим факторам, таким как площадь морского льда и индексы атмосферной циркуляции. Облака участвуют в различных цепочках обратных связей в арктической климатической системе. Однако, предыдущие исследования облачного покрова в Арктике либо ограничены периодом спутниковых наблюдений, либо основаны на фрагментарных данных наземных наблюдений.

В данной работе представлены наиболее полные ряды данных по облачности с 86 метеорологических станций в Российской Арктике. Станции расположены на побережье и островах от Баренцева до Чукотского морей. Набор данных включает в себя весь период наблюдений на каждой станции. Однако, основной анализ выполнен для периода 1936–2012 гг., когда была достаточная плотность станций. Общая облачность составляет в разных районах около 69–74%, увеличивается в более теплые периоды. Наибольшее увеличение наблюдается для конвективной облачности, особенно в Чукотском море. Выявлен статистически значимый переход между слоисто-кучевым и кучевым типами облаков.

Разные характеристики облаков показывают статистически значимую корреляцию с показателями циркуляции в Атлантике и концентрацией морского льда во всех районах Российской Арктики. Корреляция с индексами тихоокеанской циркуляции менее значима. Выявлены особенности изменчивости на более мелких временных масштабах, которые требуют дальнейшего исследования.

Работа проведена при поддержке грантов РФФИ (18-05-60216) и РНФ (18-47-06203).

Cloud cover and cloud types in the Eurasian Arctic in 1936–2012

A.V. Chernokulsky (a.chernokulsky@ifaran.ru), I.N. Esau

A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics RAS, 3 Pyzevsky per., 119017 Moscow, Russia

The Arctic is a cloudy place. It has been recognized that the Arctic cloud cover is sensitive to different climatic factors such as sea ice extent and atmospheric circulation indices. Moreover, several influential climate feedbacks, e.g. the summertime cloud-radiation feedback, have been recognized. Yet, the cloud cover studies were limited in time to the satellite era observations and fragmentary data sets from meteorological stations.

Here, we present the complete long-term cloud records from 86 meteorological stations in the Eurasian Arctic. The stations are located on the coast and islands of the region from the Barents to Chukchi Seas. Our data set comprises the entire period of observations at each station. However, we present the area-wide analysis only over the historical period of 1936–2012 when there were sufficient density of stations and cloud records for the coherent analysis. The total cloud cover, which on multiannual average constitutes 69–74% in different areas, increases in the warmer periods. The strongest increase is found in the convective cloud cover, particularly in the Chukchi Sea.

We observe statistical evidence of transition between stratocumulus and convective cloud types. The cloud characteristics reveal the strongest correlations with the Atlantic circulation indices and the sea ice concentration in all Eurasian Arctic areas. The correlations with the Pacific circulation indices are much less significant. The obtained cloud data sets disclose much smaller scale features and variability, which deserve further research.

The work was supported by RFBR (18-05-60216) and RSF (18-47-06203) grants.

Конвективная неустойчивость воздуха в снежно-растительном покрове сезонно-протаивающих грунтов

Богородский П.В. (bogorodski@aari.ru), Лоскутова М.А.

Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, ул. Беринга 38, 199397 Санкт-Петербург, Россия

Значительная часть арктических грунтов круглогодично покрыты слоем мха, к которому зимой добавляется слой снега. Мох и снег состоят из скелета (органического и ледяного, соответственно) и насыщенных воздухом пор и образуют связанную тепловым и динамическим взаимодействием систему с высокими теплоизолирующими свойствами. Однако при наличии градиента температуры в ней может возникнуть конвекция, существенно понижающая термическое сопротивление слоёв и оказывающая, тем самым, влияние на процессы тепломассопереноса в верхних слоях грунта.

Целью настоящей работы является изучение возникновения конвективной неустойчивости в системе двух пористых слоёв с теплоизолированными границами в условиях, приближённо соответствующих мохово-снежному покрову арктических пустынь о. Большевик (арх. Северная Земля). Решение задачи Рэлея-Дарси получено методом малого параметра путём разложения амплитуд возмущений вертикальной скорости и температуры воздуха в ряды по чётным степеням безразмерного волнового числа. При отношении толщины нижнего слоя (мха) к общей толщине слоёв (мха и снега) h ($0 < h < 1$), критические числа Рэлея для системы Ra являются функциями отношения полиномов относительно h , коэффициентами которых служат отношения характеристик мха и снега: воздушной проницаемости K , теплопроводности k и температуропроводности χ . Предельные случаи $h = 0$ и $h = 1$ отвечают переходу к однослойной системе со свойствами мха и снега, для которых $Ra = 3K/(k\chi)$ и $Ra = 3$; соответственно.

Оценена зависимость порога конвективной неустойчивости от вариаций типичного видового состава и свойств растительного и снежного покровов исследуемой территории, параметризованных по данным измерений и литературных источников. Показаны качественные отличия рассмотренной задачи по сравнению с аналогичной задачей для однородных жидкостей. Сформулирована общая методика решения задачи Рэлея-Дарси в длинноволновом приближении для многослойной пористой системы, учитывающая гляциологический аспект задачи. На основании теоретических и экспериментальных данных сделан вывод о необходимости учёта вклада конвекции в слоях мха и снега в тепловой, массовый и газовый обмен атмосферы с грунтом.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (проект RFMEFI61617X0076).

The air convection instability in the snow and vegetation cover of seasonally thawing soils

P.V. Bogorodskii (bogorodski@aari.ru), M.A. Loskutova

Arctic and Antarctic Research Institute, 38 Bering str., 199397 Saint-Petersburg, Russia

A significant part of the Arctic soil is year-round under a moss cover, to which a layer of snow is added in winter. Moss and snow have high insulation properties and consist of a skeleton (organic and ice, respectively) and air-saturated pores, thus forming one system connected by thermal and dynamic interaction. However, in the presence of a temperature gradient, convection may occur within such a system, which significantly reduces the thermal resistance of the layers and, thereby, influences the upper soil layers temperature regime.

Our work is aimed to studying the occurrence of convective instability in a system of two porous layers with thermally insulated outer boundaries for conditions that approximately correspond to the moss-snow cover of the Arctic deserts of the Bolshevik Isl. (Severnaya Zemlya Archipelago). The solution of the Rayleigh-Darcy problem is obtained by the small parameter

method, with expanding the perturbation amplitudes of the vertical velocity and air temperature in rows in even powers of the dimensionless wavenumber. When the ratio of the thickness of the lower layer (moss) to the total thickness of the layers (moss and snow) is h ($0 < h < 1$), the critical Rayleigh numbers for the system Ra are functions of the ratio of polynomials relative to h , the coefficients of which are the ratio of the moss and snow characteristics: air permeability K , thermal conductivity k and thermal diffusivity χ . The limiting cases $h = 0$ and $h = 1$ correspond to the transition to a single-layer system with the properties of moss and snow, for which $Ra = 3K/(k\chi)$ and $Ra = 3$; respectively.

The dependence of the convective instability threshold on variations of the typical species composition and properties of the vegetation and snow cover of the studied territory, parameterized according to measurements and literature data, is estimated. The qualitative differences of the considered problem are shown in comparison with the similar task for homogeneous liquids. A general procedure for solving the Rayleigh-Darcy problem in the long-wave approximation for a multilayer porous system is formulated, which considers the glaciological aspect of problem. Based on theoretical and experimental data, it has been concluded that it is necessary to take into account the contribution of convection in layers of moss and snow to thermal, mass and gas exchange between soil and atmosphere.

This work was supported by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation (project RFMEFI61617X0076).

Вариации мезосферного озона в полярных широтах в период солнечного минимума

Куликов Ю.Ю.¹ (yuyukul@appl.sci-nnov.ru), Андриянов А.Ф.¹, Демин В.И.²,
Демкин В.М.³, Кириллов А.С.², Козелов Б.В.², Рыскин В.Г.¹, В.А. Шишаев²

¹Институт прикладной физики РАН, Ульянова 46, 603950 Нижний Новгород, Россия

²Полярный геофизический институт, Академгородок 26а, 184209 Апатиты, Россия

³Высшая школа экономики, Большая Печёрская 25, 603000 Нижний Новгород, Россия

Мы представляем новый цикл измерений озона средней атмосферы на Кольском полуострове в Апатитах (67° N, 33° E) методом наземной микроволновой радиометрии. В докладе будут рассмотрены результаты зимних наблюдений в 2017–2018 и 2018–2019 гг. Целью наблюдений было исследовать изменения озона при воздействии заряженной компоненты в авроральной зоне, а также влияние динамических процессов на вертикальную структуру озона на высотах выше 20 км. В измерениях был использован мобильный микроволновый озонометр (рабочая частота 110836.04 МГц). Одним из достоинств такого прибора является возможность проводить непрерывные наблюдения за поведением озона с временным разрешением 15 минут. Основное внимание в этой работе было сосредоточено на поисках отклика мезосферного озона на высыпания энергетических частиц. Предполагается, что солнечные протонные события и высыпания авроральных электронов могут вызвать изменчивость полярного озона на 12–24% в мезосфере и 5–7% в средней и верхней стратосфере [1, 2]. Из результатов наших исследований следует, что вариации мезосферного озона (на высоте 60 км) в период низкой солнечной активности были в основном связаны с изменениями циркуляции атмосферы.

Наше исследование поддержано грантами РФФИ 15-05-04249 и 18-45-520009.

1. Matthes, K., Funke, B., Andersson, M.E. et al. Solar forcing for Coupled Model Intercomparison Project6 // Geoscientific Model Development, 2017. V. 10. P. 2247–2302.
2. Seppälä, A., Clilverd, M.A. Energetic particle forcing of the northern hemisphere winter stratosphere: Comparison to solar irradiance forcing // Front Physics. 2014. 24 April 2014 | <https://doi.org/10.3389/fphy.2014.00025>

Variations of mesospheric ozone in the polar latitudes during the solar minimum

Yu.Yu. Kulikov¹ (yuyukul@appl.sci-nnov.ru), A.F. Andrianov¹, V.I. Demin², V.M. Demkin³, A.S. Kirillov², B.V. Kozelov², V.G. Ryskin¹, V.A. Shishaev²

¹*Institute of Applied Physics RAS, 46 Ulyanov str., 603950 Nizhny Novgorod, Russia*

²*Polar Geophysical Institute, 26a Academgorodok, 184209 Apatity, Russia*

³*High School of Economy, 25 Bolshaya Pecherskaya, 603000 Nizhny Novgorod, Russia*

We present a new cycle of ozone measurements in middle atmosphere of the Kola Peninsula in Apatity (67° N, 33° E) by ground-based microwave radiometry. The report will contain the results of winter observations in 2017–2018 and 2018–2019. The aim of the observations was to investigate changes of the ozone in the auroral zone under the impact of the charged component, as well as the influence of dynamic processes on the vertical structure of ozone at altitudes above 20 km. The measurements used a mobile microwave ozonemeter (observation frequency 110836.04 MHz). One of the advantages of this device is the ability to continuously monitoring the behavior of ozone with a time resolution of 15 minutes. The main attention in this work is focused on the search for the response of mesospheric ozone to the precipitation of energy particles. It is assumed that solar proton events and of auroral electron precipitation can cause variability of polar ozone by 12–24% in the mesosphere and 5–7% in the middle and upper stratosphere [1, 2]. It follows from our research that the variations of mesospheric ozone (at an altitude of 60 km) during the period of low solar activity were mainly associated with changes in atmospheric circulation.

Our research is supported by RFBR grants 15-05-04249 and 18-45-520009.

1. Matthes, K., Funke, B., Andersson, M.E. et al. Solar forcing for Coupled Model Intercomparison Project6 // Geoscientific Model Development, 2017. V. 10. P. 2247–2302.
2. Seppälä, A., Clilverd, M.A. Energetic particle forcing of the northern hemisphere winter stratosphere: Comparison to solar irradiance forcing // Front Physics. 2014. 24 April 2014 | <https://doi.org/10.3389/fphy.2014.00025>

Особенности пространственного распределения оптических и микрофизических характеристик аэрозоля над полярными океанами и Восточной Атлантикой

Сакерин С.М.¹ (sms@iao.ru), Кабанов Д.М.¹, Полькин В.В.¹, Радионов В.Ф.²

¹*Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, пл. Ак. Зуева 1, 634021 Томск, Россия*

²*Арктический и Антарктический научно-исследовательский институт, ул. Беринга 38, 199397 Санкт-Петербург, Россия*

Несмотря на относительную однородность распределения собственных источников аэрозоля над океаном, изменчивость его характеристик составляет около двух порядков. Основной причиной являются выносы воздушных масс с континентов, которые обогащают морскую атмосферу аридным, антропогенным и дымовым аэрозолем. Высокая изменчивость характеристик аэрозоля, обусловленная сменой погодных условий, препятствует выявлению закономерностей пространственного распределения по результатам отдельных экспедиций. Лишь многолетнее накопление (усреднение) данных позволяет исключить короткопериодные вариации и выделить пространственную составляющую. В докладе рассматриваются особенности пространственного распределения оптических и микрофизических характеристик аэрозоля над Восточной Атлантикой и Южным океаном, основанные на данных 14 лет измерений на маршруте Российских антарктических экспедиций (от Ла-Манша до Антарктиды). Для Восточной Атлантики детально (с шагом 5°) проанализирована широтная изменчивость массовой концентрации поглощающего вещества (сажи), счетных концентраций частиц (0.4–10 мкм), аэрозольной оптической толщи (АОТ) в диапазоне спектра 0.34–2.14 мкм и предложены модели среднего зонального распределения.

Сравнительный анализ данных в южной части Мирового океана (35–70° ю.ш.) не выявил меридиональной составляющей пространственной изменчивости: средние

характеристики аэрозоля в Атлантическом, Тихоокеанском и Индийском секторах статистически одинаковы. В широтной изменчивости всех характеристик проявились три зоны с разным характером пространственного распределения: (а) спад и затем рост в переходной зоне континентального влияния; (b) область квазипостоянного уровня; (с) спад при сближении с Антарктидой. Показано, что одинаковые особенности широтного изменения анализируемых характеристик аэрозоля формируются: в зоне (а) из-за снижения континентального влияния при росте генерации морского аэрозоля, а в зоне (с) – из-за увеличения ледовитости океана. Количество данных над арктическими морями (7 экспедиций) пока недостаточно для надежных статистических обобщений. Тем не менее, при сравнении характеристик аэрозоля по отдельным морям (секторам) Северного Ледовитого океана выявлена тенденция спада средних значений с запада на восток. Более детальный анализ данных над Баренцевым и Карским морями показал уменьшение средних характеристик аэрозоля (наиболее явно для сажи) в северо-восточном направлении (при удалении от Скандинавии).

Работа выполнялась при финансовой поддержке Комплексной программы фундаментальных исследований СО РАН II.1 (проект № 0368-2018-0014) и Подпрограммы 4 «Организация и обеспечение работ и научных исследований в Арктике и Антарктике» государственной программы Российской Федерации «Охрана окружающей среды» на 2012–2020 годы.

Specific features of spatial distribution of aerosol optical and microphysical characteristics over polar oceans and East Atlantic

S.M. Sakerin¹ (sms@iao.ru), D.M. Kabanov¹, V.V. Polkin¹, V.F. Radionov²

¹V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics, SB RAS, 1 Ac. Zuev Sq., 634021 Tomsk, Russia

²Arctic and Antarctic Research Institute, 38 Bering str., 199397 Saint-Petersburg, Russia

Despite the relative uniformity of the distribution of own aerosol sources over ocean, variations in aerosol characteristics span about two orders of magnitude. This is primarily explained by outflows of air masses from continents, which enrich the marine atmosphere by arid, anthropogenic, and smoke aerosol. The aerosol characteristics show strong variations due to changes in weather conditions; as a consequence, the regularities in the spatial distribution cannot be identified from results of separate expeditions. Only multiyear data accumulation (averaging) makes it possible to eliminate short-period variations and extract the spatial component. In this report, we consider the specific features of the spatial distribution of the aerosol optical and microphysical characteristics over the East Atlantic and Southern Ocean, based on 14 years of measurements along the route of the Russian Antarctic expeditions (from English Channel to Antarctica). For the East Atlantic, we thoroughly (with the step of 5°) analyzed the latitudinal variations in the mass concentration of absorbing substance (black carbon), number concentrations of particles (0.4–10 μm), aerosol optical depth (AOD) in the wavelength range of 0.34–2.14 μm, and proposed the models of the average zonal distribution.

Comparative analysis of data in the southern part of the World Ocean (35–70°S) has revealed no meridional component of the spatial variations: the average characteristics of aerosol in the Atlantic, Pacific, and Indian sectors are statistically identical. Three zones, differing in the character of the spatial distributions, showed up in latitudinal variations of all characteristics, namely: (a) a decrease, and then a growth in the transitional zone of continental impact; (b) region of quasi-constant level; and (c) a decrease with approaching Antarctica. It is shown that identical features of the latitudinal variations in the analyzed aerosol characteristics are formed: in zone (a) due to a decay of continental impact with the growing generation of marine aerosol, and in zone (c) due to growing ice cover of ocean. The amount of data over Arctic seas (7 expeditions) is still insufficient for reliable statistical generalizations. Nonetheless, comparison of aerosol characteristics for separate seas (sectors) of the Arctic Ocean revealed a tendency of decreasing average values from west toward east. More detailed analysis of measurements over the Barents and Kara Seas showed a decrease in the average aerosol characteristics (most evident for black carbon) in the northeastern direction (with increasing distance from Scandinavia).

This work was supported by Complex Program of Basic Research SB RAS II.1 (project no. 0368-2018-0014), and Subprogram 4 “Organization and support of work and scientific research in Arctic and Antarctic” of state program of the Russian Federation “Environmental protection” for 2012–2020.

Результаты непрерывных наблюдений концентраций метана и углекислого газа на НИС «Ледовая база “Мыс Баранова”» в 2015–2018 гг.

Лоскутова М.А.¹ (loskutova@aari.ru), Макштас А.П.¹, Лаурилл Т.², Асми Э.²

¹Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, ул. Беринга 38, 199397 Санкт-Петербург, Россия

²Финский Метеорологический Институт, Хельсинки, Финляндия

Арктический регион является одним из основных районов источников парниковых газов вследствие большого объема биомассы, запасов углерода в почве и обширных заболоченных пространств. При таянии многолетнемерзлого грунта в атмосферные химические реакции могут вступить большие запасы ранее законсервированного органического углерода, что приведет к увеличению концентрации метана и углекислого газа в атмосфере. На НИС «Ледовая база Мыс Баранова» совместно с Финским метеорологическим институтом с 2015 г. осуществляются непрерывные измерения концентрации водяного пара, метана, углекислого газа и угарного газа лазерным газоанализатором G2401 Picarro. Для анализа в рядах исходных данных были удалены данные измерений, полученные при сбоях электропитания и при калибровке прибора. Также не использовались значения при направлениях ветра, соответствующих переносу от дизельной электростанции (90–145°), и значения, полученные при скорости ветра менее 3 м/с, поскольку в таком случае загрязненный воздух может равномерно распределяться над территорией станции. Сформированный архив осредненных за каждый час данных наблюдений концентраций метана и углекислого газа за период с октября 2015 года по ноябрь 2018 года был использован для дальнейшего анализа.

Для обоих газов характерен выраженный годовой ход с понижением концентраций в летние месяцы. Сезонная изменчивость метана обусловлена активизацией фотохимических процессов с наступлением полярного дня, углекислого газа – поглощением поверхностью моря при отсутствии ледяного покрова. Также накоплению газов в приземном слое в зимнее время способствует преимущественное наличие устойчивой стратификации приземного слоя атмосферы на протяжении полярной ночи. Среднемесячные значения показывают устойчивый рост концентраций обоих газов в течение всего периода наблюдений. Максимальное среднемесячное значение метана 1.968 ppm наблюдалось в январе 2018 года, углекислого газа – в апреле 2018 года и составило 413.65 ppm.

Анализ зависимости распределения концентраций от направления ветра показал, что наибольшие значения наблюдаются при переносе с юго-западных и северных направлений. Если первое можно отнести к антропогенному влиянию и наличию обширных заболоченных пространств в летнее время, то причина второго требует более детального анализа. Применение траекторной модели HYSPLIT для случаев повышенных значений концентраций парниковых газов не позволило получить однозначного ответа. Хотя повышенные значения наблюдались, как правило, при переносе воздушных масс из районов Норильска, Ямала, Кольского полуострова и дельты р. Лена, однако имеются случаи повышенных концентраций при переносе воздушных масс с Северного Ледовитого океана. Это может обуславливаться действием каких-либо локальных источников, но их обнаружение требует дополнительного анализа данных.

Работа выполнена в рамках ЦНТП Росгидромета 1.5.3.3.

The results of continuous observations of methane and carbon dioxide concentrations at Research Station «Ice base “Cape Baranova”» in 2015–2018

M.A. Loskutova¹ (loskutova@aari.ru), A.P. Makshtas¹, T. Laurila², E. Asmi²

¹Arctic and Antarctic Research Institute, 38 Bering str., 199397 Saint-Petersburg, Russia

²Finnish Meteorological Institute, 1 Erik Palménin aukio, FI-00560 Helsinki, Finland

The Arctic region is one of the main areas of greenhouse gases sources due to large amount of biomass, carbon stocks in the soil and extensive wetlands. Large resources of previously inactive organic carbon may take part in atmospheric chemical reactions under melting permafrost. In this case, methane and carbon dioxide concentrations will increase in the atmosphere. Since 2015, AARI Research Station "Ice Base Cape Baranova" together with Finnish Meteorological Institute has been measuring the continuous concentrations of water vapor, methane, carbon dioxide and carbon monoxide using the G2401 Picarro laser analyzer. The data obtained during power failures and instrument calibration were removed from the initial dataset. The values for wind directions corresponding to the transfer from diesel power station (90–145°) and for wind speeds less than 3 m/s were also not used, because in this case polluted air can be evenly distributed over the station territory. The archive of methane and carbon dioxide concentrations data averaged over each hour from October 2015 to November 2018 was used for further analysis.

Both gases are characterized by a pronounced annual variation with concentration decreasing in summer months. Seasonal variability of methane is due to the activation of photochemical processes during the polar day. The absorption by sea surface in the absence of sea ice cover causes the annual variability of carbon dioxide. Besides, the predominant presence of stable stratification of the atmospheric surface layer throughout the polar night contributes to accumulation of gases in the surface layer in winter. Monthly mean values show a steady increase in the concentrations for both gases during the entire observational period. The maximal monthly average methane value of 1.968 ppm was observed in January 2018. The carbon dioxide monthly averaged maximum was measured in April 2018 (413.65 ppm).

The analysis of the dependence of registered concentration distribution on the wind direction shows that the highest values are observed during the air-mass transfer from the south-western and northern directions. If the first case can be explained by the anthropogenic impact and presence of extensive wetlands in the summer, the reason for the second one requires a more detailed analysis. Applying the HYSPLIT trajectory model for cases of elevated values of greenhouse gas concentrations did not allow us to obtain an unambiguous answer. Although elevated values were observed, as a rule, when air masses transferred from the regions of Norilsk, Yamal, the Kola Peninsula, and Lena estuary, however, there were cases of elevated concentrations during the transfer of air masses from the Arctic Ocean. This may be due to the action of any local sources, but their detection requires additional data analysis.

The work had been executed in the frame of CNTP Roshydromet 1.5.3.3.

Вариации общего содержания метана и оксида углерода в атмосфере Антарктиды

Устинов В.П. (ustinov@gratyphoon.ru), Баранова Е.Л., Вишератин К.Н., Грачев М.И.,
Кальсин А.В.

НПО «Тайфун», ул. Победы 4, 249038 Обнинск, Россия

Измерения общего содержания метана и оксида углерода в фоновых условиях Антарктиды, при отсутствии антропогенных источников, имеют важное значение для решения ряда задач физики атмосферы и климатологии. В докладе представлены результаты систематических измерений общего содержания (ОС) и средней по высоте относительной объемной концентрации (X) CH₄ (2009–2018 гг.) и CO (2003–2018 гг.) на станции

Новолазаревская. Для определения ОС CH_4 и CO в атмосфере регистрируется солнечное излучение в интервалах $2990\text{--}3006\text{ см}^{-1}$ и $2150\text{--}2160\text{ см}^{-1}$, содержащих вращательную линию $\text{P}(2)$ полосы поглощения CH_4 около 3.31 мкм и полосу поглощения CO с центром вблизи 4.7 мкм . Запись спектров осуществлялась с помощью дифракционного спектрометра с разрешением 0.2 см^{-1} . Решение обратной задачи определения содержания CH_4 и CO , а также мешающих газов (H_2O и N_2O) осуществлялось с помощью пакета программ SFIT4 v0.9.4.4.

Расчеты показали, что за период измерений на ст. Новолазаревская среднее ОС CH_4 составило $(3.4 \pm 0.8) \cdot 10^{19}$ молек./ см^2 , CO – $(8 \pm 2) \cdot 10^{17}$ молек./ см^2 , а средняя по высоте объемная концентрация XCH_4 (1663 ± 34) млрд $^{-1}$, XCO – (37 ± 8) млрд $^{-1}$. CO имеет ярко выраженный сезонный ход с максимальными значениями в сентябре–октябре, минимальными – в январе–феврале. Метан имеет максимум в октябре–ноябре и минимум в мае–июле. Инструментальная среднеквадратическая погрешность единичных измерений содержания, оцененная по повторяемости результатов в течение дня составляет 4% для CO и 5% для CH_4 .

Полученные данные сопоставлены с вариациями ОС CO и CH_4 на ст. Арривал-Хайт, со спутниковыми данными МОРПТТ для CO и AIRS для CH_4 , а также с приземными значениями концентрации CH_4 и CO на ст. Syova. Для всех рассмотренных рядов CO тренды незначимы, при этом наблюдаются периоды повышенного содержания CO (2010 г.), в последние годы (2014–2017 гг.) проявляется тенденция к росту минимальных значений CO . Как для ст. Новолазаревская, так и ст. Арривал-Хайт характерно превышение спутниковых данных МОРПТТ над наземными. Вариации оксида углерода в приземном слое и во всей толще атмосферы происходят практически синхронно. Тренды ОС CH_4 на ст. Новолазаревская и ст. Арривал-Хайт составляют $(4.5 \pm 2.2) \cdot 10^{15}$ молек./ см^2 в месяц и $(5.2 \pm 1.6) \cdot 10^{15}$ молек./ см^2 в месяц, соответственно. Тренд XCH_4 на ст. Новолазаревская составил (0.26 ± 0.10) млрд $^{-1}$ в месяц и в пределах погрешности согласуется с трендами XCH_4 по данным AIRS для уровней $(150\text{--}1000)$ гПа. Значительно отличается тренд приземных концентраций на ст. Syova – (0.61 ± 0.07) млрд $^{-1}$ в месяц. По данным AIRS и ст. Новолазаревская в период 2015–2017 гг. наблюдалось снижение концентраций CH_4 .

Особенности временной изменчивости рассмотренных рядов исследовались методами спектрального, вейвлетного и композитного анализов. Во всех рассмотренных рядах CO , наряду с годовой и полугодовой гармоникой, присутствуют колебания в интервале 14–45 месяцев с практически совпадающими периодами и фазовыми соотношениями. Для рядов CH_4 по данным ст. Новолазаревская и ст. Syova выделяются годовые гармоники с амплитудой около 26 и 16 млрд $^{-1}$, соответственно, а для данных AIRS в зависимости от высоты проявляются также сильные полугодовые колебания. Наиболее близкое совпадение временных вариаций XCH_4 на ст. Новолазаревская наблюдается с вариациями CH_4 AIRS на уровне 150 гПа.

Variations of total methane and carbon monoxide in the atmosphere of Antarctica

V.P. Ustinov (ustinov@rpatyphoon.ru), E.L. Baranova, K.N. Visheratin, M.I. Grachev,
A.V. Kalsin

Research and Production Association «Typhoon», Pobedy str. 4, 249038 Obninsk, Russia

Measurements of the total content of methane and carbon monoxide in the background conditions of Antarctica, in the absence of anthropogenic sources, are important for a number of problems in atmospheric physics and climatology. The report presents the results of systematic measurements of the total content (TC) and average volume mixing ratio (X) of CH_4 (2009–2018) and CO (2003–2018) at Novolazarevskaya station. To determine the CH_4 and CO in the atmosphere, solar radiation is recorded in the intervals of $2990\text{--}3006\text{ см}^{-1}$ and $2150\text{--}2160\text{ см}^{-1}$, containing the rotational line $\text{P}(2)$ of the CH_4 absorption band of about $3.31\text{ }\mu\text{m}$ and the CO

absorption band with a center near $4.7\text{ }\mu\text{m}$. The spectra were recorded using a diffraction spectrometer with a resolution of 0.2 cm^{-1} . The inverse problem of determining the content of CH_4 and CO , as well as interfering gases (H_2O and N_2O) was solved using the software package SFIT4 v0.9.4.4.

Calculations showed that for the period of measurements at st. Novolazarevskaya average TC of CH_4 was $(3.4 \pm 0.8) \cdot 10^{19}\text{ mol./cm}^2$, CO – $(8 \pm 2) \cdot 10^{17}\text{ mol./cm}^2$, and the average volume mixing ratio $X\text{CH}_4$ was $(1663 \pm 34)\text{ ppb}$ and $X\text{CO}$ – $(37 \pm 8)\text{ ppb}$. CO has a pronounced seasonal variations with maximum values in September–October, minimum – in January–February. Methane has a maximum in October–November and a minimum in May–July. The instrumental root-mean-square error of single measurements, estimated from the repeatability of results during the day, is 4% for CO and 5% for CH_4 .

The data obtained are compared with variations of TC CO and CH_4 at station Arrival-Heights, with satellite MOPITT data for CO and AIRS data for CH_4 , as well as with surface values of CH_4 and CO at station Syova. For all considered CO series, the trends are insignificant, while there are periods of increased CO content (2010). In recent years (2014–2017) there is a tendency towards an increase in the minimal CO values. As for Novolazarevskaya so for Arrival-Hite MOPITT satellite data are characterized by the excess of over ground data. Variations of carbon monoxide in the surface layer and throughout the entire atmosphere occur almost synchronously.

The TC CH_4 trends on Novolazarevskaya and Arrival-Heights are $(4.5 \pm 2.2) \cdot 10^{15}\text{ mol./cm}^2$ per month and $(5.2 \pm 1.6) \cdot 10^{15}\text{ mol./cm}^2$ per month respectively. The $X\text{CH}_4$ trend at Novolazarevskaya amounted to $(0.26 \pm 0.10)\text{ ppb}$ per month and within the limits of error is consistent with trends of $X\text{CH}_4$ according to AIRS data for levels of 150–1000 hPa. The trend of surface CH_4 concentrations at st. Syova is significantly different – $(0.61 \pm 0.07)\text{ ppb}$ per month. According to AIRS and Novolazarevskaya data a decrease in CH_4 concentrations was observed in the period 2015–2017. The CH_4 time series at Novolazarevskaya and Syova have distinguished annual harmonic with an amplitude of about 26 and 16 ppb, respectively. For AIRS data, strong semi-annual fluctuations also appear depending on the height. The closest coincidence of temporal variations of $X\text{CH}_4$ at Novolazarevskaya is observed with variations of AIRS CH_4 data at a level of 150 hPa.

Исследование связи полярного вихря с озоном и температурой в Арктической стратосфере

Семёнушкин М.И.^{1,2}, Артамонова И.В.^{3,4}

¹Российский государственный гидрометеорологический университет, Малоохтинский пр. 98, 195196 Санкт-Петербург, Россия

²Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, ул. Беринга 38, 199397 Санкт-Петербург, Россия

³Главная астрономическая обсерватория РАН, Пулковское ш. 65/1, 196140 Санкт-Петербург, Россия

⁴Главная геофизическая обсерватория им. А.И. Воейкова, ул. Карбышева 7, 194021 Санкт-Петербург, Россия

В нашем исследовании мы выявляли закономерности в связи полей температуры и озона со стратосферным полярным вихрем в Арктике. Выявлены наиболее характерные периоды максимальной связи выбранных величин. Для исследования использованы данные повторного анализа MERRA-2 о потенциальной завихренности Эртеля (E_{pv}), озона и температуре на изобарической поверхности 70 гПа за три периода в местное зимне–весеннее время 2010–2011 г, а также за 181 день с 01.11.2010 по 30.04.2011 для расчета площади, занимаемой максимальными значениями матричной нормы. Для оценки вклада, вносимого полярным стратосферным вихрем в поле озона, в работе используется метод градиентных мер. Данный метод представляет собой расчет матричной нормы для мультиполя, в нашем случае поле двумерное – E_{pv} и O_3 , E_{pv} и T . Области, где рассчитанная матричная норма оказывается максимальной, являются областями высоких градиентов каждого элемента

мультиполя, а значит, указывают на высокую степень топологической связи между исследуемыми полями. Полученные результаты позволяют проанализировать пространственно-временную изменчивость температуры и озона относительно циркумполярного вихря. Анализ матричной нормы за три характерных периода в начале, середине и конце зимы показал, что максимальная связь между потенциальной завихренностью и озоном наблюдается в конце зимы, когда вихрь слабеет и разрушается.

Investigation of the connection of the polar vortex with ozone and temperature in the Arctic stratosphere

M.I. Semenushkin^{1,2} (matthew000000@mail.ru), I.V. Artamonova^{3,4}

¹Russian State Hydrometeorological University, 98 Malookhtinsky, 195196 Saint-Petersburg, Russia

²Arctic and Antarctic Research Institute, 38 Bering str., 199397 Saint-Petersburg, Russia

³Central Astronomical Observatory RAS, 65/1 Pulkovskoe sh., 196140 Saint-Petersburg, Russia

⁴A.I. Voeikov Main Geophysical Observatory, 7 Karbyshev str., 194021 Saint-Petersburg, Russia

In our study, we identified patterns in relation to the temperature and ozone fields with the stratospheric polar vortex in the Arctic. The most characteristic periods of the maximum connection of the selected values are revealed. For the study, we used the MERRA-2 reanalysis data on Ertel's potential vorticity (E_{pv}), ozone and temperature on an isobaric surface of 70 hPa over three periods in the local winter–spring time of 2010–2011, as well as for 181 days from 01.11.2010 to 30.04.2011 to calculate the area occupied by the maximum values of the matrix norm. To estimate the contribution made by the polar stratospheric vortex in the ozone field, the method of gradient measures is used in the work. This method is a calculation of the matrix norm for a multipole; in our case, the two-dimensional field is E_{pv} and O_3 , E_{pv} and T . The areas where the calculated matrix norm turns out to be maximum are areas of high gradients of each element of the multipole, and therefore indicate a high degree of topological connection between the fields under study. The results obtained allow us to analyze the spatial-temporal variability of temperature and ozone relative to the circumpolar vortex. The analysis of the matrix norm for three characteristic periods at the beginning, middle and end of winter has shown that the maximum relationship between potential vorticity and ozone is observed at the end of winter, when the vortex weakens and collapses.

Климатология холодных вторжений и их влияние на конвективную облачность и осадки в Баренцевом и Карском морях

Нарижная А.И., Козлов Ф.А., Чернокульский А.В. (a.chernokulsky@ifaran.ru),

Чечин Д.Г., Эзау И.Н.

Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Пыжевский пер. 3, 119017 Москва, Россия

Периоды адвекции холодного воздуха над теплой морской поверхностью (так называемые холодные вторжения) в Арктике играют важную роль в энергообмене между океаном и атмосферой. В частности, потоки явного и скрытого тепла составляют в холодных вторжениях 200–500 Вт/м². Это обеспечивает развитие конвективной облачности в холодных вторжениях и её трансформацию: от облачных гряд вблизи кромки льда до организованных облачных кластеров в нескольких сотнях километров от кромки. Физические свойства облачности, например тип конвективных облаков, и ее пространственное расположение в Арктике взаимосвязаны. У кромки льда (береговой линии) преобладает кучевая облачность $Cu\ hum$, $Cu\ med$, организованная в конвективные валы. В то же время над открытым морем преобладает облачность $Cu\ cong$, Cb , организованная в конвективные ячейки. Для последних десятилетий по данным станционных наблюдений на арктическом побережье Баренцева и Карского морей выявлены положительные статистически значимые тенденции изменений конвективной облачности (Cu , Cb , Sc) и ливневых осадков, и отрицательные – слоистообразной облачности (St , Ns) и обложных осадков. Положительные тренды

конвективной облачности и осадков могут быть обусловлены как отступанием границы льда, так и изменением повторяемости холодных вторжений (или комбинацией этих тенденций).

В представленной работе на основе данных реанализа ERA-Interim определена статистика холодных вторжений разной интенсивности в Баренцевом и Карском морях за период 1979–2018 гг. Оценена климатология и межгодовая изменчивость повторяемости слабых, средних и сильных холодных вторжений в период с ноября по апрель. Определена связь разных характеристик облаков и осадков (включая осадки разного генезиса – ливневые и обложные) с повторяемостью холодных вторжений разной интенсивности.

Работа проведена при поддержке грантов РФФИ (18-05-60216) и РНФ (18-47-06203).

Climatology of cold-air outbreaks and their impact on convective cloudiness and precipitation in the Barents and Kara Seas

A.I. Narizhnaya, F.A. Kozlov, A.V. Chernokulsky (a.chernokulsky@ifaran.ru),
D.G. Chechin, I.N. Esau

A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics RAS, 3 Pyzevsky per., 119017 Moscow, Russia

Periods of cold air advection over the warm sea surface (the so-called cold-air outbreaks, CAO) in the Arctic play an important role in the energy exchange between the ocean and the atmosphere. In particular, the sensible and latent fluxes in CAO amount to 200–500 W/m². This results in the development of convective clouds and its transformation within CAO: from cloud streets near the sea ice margin to organized cloud clusters in a few hundred kilometers from the edge. The physical properties of the cloud, for example, the type of convective clouds, and its spatial location in the Arctic are interrelated. At the sea-ice margin (or coastline), cumulus clouds (Cu hum, Cu med), organized in convective rolls, prevail. At the same time, Cu cong, Cb cloudiness, organized into convective cells, prevails over the open sea. For the last decades, positive statistically significant trends in convective clouds (Cu, Cb, Sc) and convective precipitation rate were identified according to station observations on the Arctic coast of the Barents and Kara Seas. Negative trends were obtained for stratus clouds (St, Ns) and large-scale precipitation). Positive trends in convective clouds and precipitation may be associated with both the retreat of the ice boundary and the change in the frequency of CAO (or a combination of these two tendencies).

In the work, we presented the statistics of CAOs of different intensity in the Barents and Kara seas for the period 1979–2018 based on the ERA-Interim reanalysis data. Particularly, we evaluated the climatology and interannual variability of the frequency of occurrence of weak, medium, and strong CAOs from November to April. We determined the relationship between different characteristics of clouds and precipitation (including convective and large-scale precipitation) with the occurrence of CAOs of different intensity.

This study was supported by the Russian Foundation for Basic Research (project no. 18-05-60216) and by the Russian Science Foundation (project no. 18-47-06203).

Наблюдения и моделирование восточных фёнов на Шпицбергене

Шестакова А.А. (shestakova.aa.92@gmail.com), Чечин Д.Г.

Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Пыжевский пер. 3, 119017 Москва, Россия

Сильные ветры, известные как подветренные бури, часто наблюдаются на западных склонах Шпицбергена. Они могут сопровождаться также каньонными ветрами напротив перевалов и фьордов и мысовыми струями (у южного и северного мыса Шпицбергена). Подветренные бури в Арктике вызывают интерес не только в связи с опасностью данного явления (ветер отличается порывистостью и часто ураганной силой), но и в связи с их сильным влиянием на теплообмен атмосферы с морской поверхностью, дрейф льда, таяние ледников.

Целью данного исследования стало определение основных характеристик ветрового и температурно-влажностного режима восточных подветренных бурь на Шпицбергене, а также каньонных ветров и мысовых струй. Наибольшее внимание уделяется влиянию орографических ветров на структуру пограничного слоя ниже по течению от Шпицбергена. Исследование проведено на примере двух эпизодов сильных ветров, которые были подробно измерены с использованием различных систем наблюдения (стандартные наземные наблюдения, контактные самолетные и судовые наблюдения, радиозондирование, сбрасываемые зонды). Для более полного анализа явления используется мезомасштабная модель атмосферы WRF-ARW.

В обоих рассматриваемых эпизодах подветренная буря на западных склонах Шпицбергена развивалась по типу фёна, то есть происходил значительный рост температуры воздуха на подветренных склонах гор. Возникновение фёнов приводит к значительной трансформации пограничного слоя атмосферы. За счет адиабатического нагрева нисходящего воздуха и опускания нижней границы приподнятой инверсии формируется нейтральная или устойчивая стратификация; нагрев происходит по всей нижней тропосфере. Максимальная скорость ветра во время подветренной бури достигается именно на подветренных склонах или около подножия склона и практически не распространяется от хребта. Это происходит из-за формирования так называемого гидравлического скачка, в результате которого на некотором расстоянии от подветренного склона происходит отрыв пограничного слоя от поверхности. В то же время эффект повышения температуры и понижения влажности, связанный с фёном, напротив, распространяется далеко вниз по течению и, вероятно, в значительной степени формирует климатические особенности региона. В отличие от фёнов, каньонные ветры, возникающие за счет сгущения линий тока в перевалах и фьордах, отличаются большей горизонтальной протяженностью (из-за отсутствия гидравлического скачка) и отсутствием эффекта нагрева воздуха в приземном слое (поскольку вертикальные движения малы).

Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ, проект № 18-77-10072.

Observations and modeling of easterly foehns on Spitsbergen

A.A. Shestakova (shestakova.aa.92@gmail.com), D.G. Chechin

A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics, 3 Pyzhevsky per., 119017 Moscow, Russia

Strong winds, known as downslope windstorms, frequently occur on the western slopes of Spitsbergen. They can also be accompanied by gap winds downstream gaps and fjords and tip jets (at the southern and northern tips of Svalbard). Downslope windstorms in the Arctic are of interest not only due to the danger of this phenomenon (the wind is very gusty and often reach hurricane force), but also due to their strong influence on the heat exchange between atmosphere and sea surface, ice drift, melting of glaciers.

The purpose of this study was to determine the main characteristics of the wind and temperature-humidity regime of the eastern downslope windstorms on Svalbard, as well as gap winds and tip jets. The greatest attention is paid to the influence of orographic winds on the structure of the boundary layer downstream of Spitsbergen. The study was conducted on the example of two episodes of strong winds, which were measured in detail using various observation systems (standard ground-based observations, in-situ aircraft and ship observations, radiosounding, drop sondes). For a more complete analysis of the phenomenon, we used mesoscale atmospheric model WRF-ARW.

In both episodes, downslope windstorm on the western slopes of Spitsbergen appeared in the form of foehn, that is, there was a significant increase in air temperature on the lee side of the mountains. The occurrence of foehn leads to a significant transformation of the boundary layer. Neutral or stable stratification is formed due to adiabatic heating of the descending air and lowering of the elevated inversion; heating occurs throughout the entire lower troposphere. High wind speed during downslope windstorm was achieved exactly on leeward slopes or near the foot of the slope

and practically did not propagate downstream. This is due to the formation of the so-called hydraulic jump, as a result of which boundary layer separation occurs at some distance from the slope. At the same time, the high-temperature and low-humidity effect of the foehn, on the contrary, propagates far downstream into the sea and quite possibly can form the climatic features of the region. In contrast to the foehns, gap winds, arising due to streamlines convergence in gaps and fjords, are characterized by a greater horizontal extent (due to the absence of a hydraulic jump) and the absence of the effect of strong air heating in the surface layer (since the vertical movements are small).

This work was supported by the Russian Science Foundation, project No. 18-77-10072.

Влияние скорости ветра и наличия разводий на выхолаживание атмосферного пограничного слоя над морским льдом во время полярной ночи

Махотина И.А.¹ (i-makhotina@mail.ru), Чечин Д.Г.², Макштас А.П.¹, Люпкес К.³

¹Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, ул. Беринга 38, 199397 Санкт-Петербург, Россия

²Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Пыжевский пер. 3, 119017 Москва, Россия

³Институт полярных и морских исследований им. Альфреда Вегенера, Ам Хандельс Хафен 12, 27570 Бремерхафен, Германия

Представлена совместная модель атмосферного пограничного слоя и морского льда, описывающая выхолаживание поверхности морского льда и воздуха при ясном небе во время полярной ночи. Для модели получены как стационарные, так и нестационарные решения, описывающие процесс выхолаживания во времени. Решения демонстрируют, что, помимо других факторов, сплоченность морского льда и скорость ветра оказывают сильное влияние на температурный режим над морским льдом. Наличие разводий приводит к прогреву пограничного слоя и усилению устойчивой стратификации надо льдом. Модель описывает резкий переход от слабо-устойчивой к сильно-устойчивой стратификации при уменьшении скорости ветра. Пороговое значение скорости ветра на высоте 10 м, при котором происходит усиление устойчивости, составляет порядка 2–5 м/с и зависит от сплоченности морского льда, а также параметра шероховатости. Режим сильной устойчивости характеризуется большой разностью между температурой воздуха и поверхности. Наличие разводий приводит к увеличению этой разности температур и усилению устойчивости. Показано, что при скорости ветра выше пороговой температура как поверхности морского льда, так и воздуха растет линейно со скоростью ветра. В представленной модели это происходит вследствие: i) зависимости от скорости ветра турбулентного потока тепла с разводий; ii) за счет увеличения времени выхолаживания атмосферного пограничного слоя при увеличении скорости ветра. Кроме того, наличие двух режимов устойчивости (сильной и слабой) выражается в немонотонной зависимости температуры воздуха и времени выхолаживания от скорости ветра. Температура воздуха и время выхолаживания минимальны при пороговой скорости ветра. Показано, что решения чувствительны к выбору универсальных функций устойчивости, используемых в параметризации турбулентного обмена. Также, важную роль играет используемая в модели параметризация высоты устойчивого пограничного слоя.

Аналитические решения хорошо согласуются с результатами более реалистичной численной одномерной модели атмосферного пограничного слоя и морского льда, а также с наблюдениями, полученными во время полярной ночи на дрейфующих станциях "Северный Полюс-35,37,39", а также с наблюдениями на дрейфующей станции SHEBA. Наблюдения, аналитические и численные решения демонстрируют высокую корреляцию между скоростью ветра и суммарным потоком длинноволновой радиации на поверхности морского льда. Эта особенность является следствием взаимозависимости турбулентного и радиационного энергообмена, которая реализуется через зависимость температуры поверхности, воздуха в

пограничном слое, силы инверсии и высоты атмосферного пограничного слоя от скорости ветра.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 18-77-10072).

Effect of wind speed and leads on clear-sky cooling over sea ice during polar night

I.A. Makhotina¹ (i-makhotina@mail.ru), D.G. Chechin², A.P. Makshtas¹, C. Lüpkes³

¹Arctic and Antarctic Research Institute, 38 Bering str., 199397 Saint-Petersburg, Russia

²A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics RAS, 3 Pyzevsky per., 119017 Moscow, Russia

³Alfred Wegener Institute Helmholtz Centre for Polar and Marine Research, 12 Am Handels Hafen, 2570 Bremerhaven, Germany

A simple model of the atmospheric boundary layer (ABL) coupled to sea ice is presented. It describes clear-sky cooling over sea ice during polar night in the presence of leads. Both steady-state and time-dependent solutions for air and surface temperatures are obtained. The solutions show that the sea ice concentration and wind speed, apart from other factors, have a strong impact on the thermal regime over sea ice. Leads cause both a warming of the ABL and an increase of stability over sea ice. The model describes a sharp ABL transition from a weakly-stable coupled state to a strongly-stable decoupled state when wind speed is decreasing. The threshold value of the transition wind speed is in the range of 2–5 m/s and is a function of sea ice concentration. The decoupled state is characterized by a large air-surface temperature difference over sea ice, which is further increased by leads. In the coupled regime, air and surface temperatures increase almost linearly with wind speed due to warming by leads and also slower cooling of the ABL. The cooling time scale shows a nonmonotonic dependency on wind speed being lowest for the threshold value of wind speed and increasing for weak and strong winds. It is shown that the solutions are sensitive to the choice of the universal stability functions used in the parameterization of turbulent heat exchange in stable stratification. Also, an important effect on solutions has the choice of the parameterization of the stable boundary layer height, which is used to obtain nonstationary solutions.

Theoretical solutions agree well with results of a more realistic single-column model and with observations performed at the three Russian "North Pole" drifting stations (NP-35, 37 and 39) and at the Surface Heat Budget of the Arctic Ocean ice camp. Both modelling results and observations show a strong correlation between the net longwave radiative flux at the surface and wind speed. This peculiar correlation is explained by an interdependence of the radiative and turbulent heat transfer, which is possible due to the described dependency of air and surface temperatures, boundary layer height and inversion strength on wind speed.

The study is funded by the Russian Science Foundation grant 18-77-10072.

Photogrammetric retrieval and analysis of small scale sea ice topography during summer melt

D.V. Divine (Dmitry.Divine@npolar.no), Ch.A. Pedersen, T.I. Karlsen, H.F. Aas,
M.A. Granskog, S.R. Hudson, S. Gerland

Norwegian Polar Institute, Fram Centre, Tromsø, Norway

We present a setup for photogrammetric retrievals of small scale sea ice surface topography using low-altitude aerial imagery. The setup features two digital cameras, a combined GPS receiver/inertial navigation system (INS) unit, and a laser range finder. The components are fit in a single aerodynamic enclosure mounted outside a helicopter cabin. Results from its deployments during the field campaigns on Arctic sea ice north of Svalbard during summer 2012 and spring 2015 drift are shown. Comparison of photogrammetrically derived digital elevation models (DEMs) with in situ measurements of sea ice topography made on melting first year sea ice demonstrated the ability of the method to accurately recover the topography of sea ice including melt ponds with

depths down to at least 0.3 m. The inter-comparison of the photogrammetrically derived DEM and in situ measured elevations yielded estimates of a root mean square error (RMS) of about 0.04 m and bias of 0.03 m, both for sea ice freeboard and melt pond depths. The bimodality of the probability density function of measured melt pond depths was also accurately reproduced in the reconstructed DEM. Discrepancies between the measured and DEM distributions were within the range of the inferred uncertainty of the photogrammetric and in situ techniques, with some of the bias likely associated with sea ice melt during the time elapsed between in situ and aerial measurements.