

ПРАВИТЕЛЬСТВО РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ



МЕЖДУНАРОДНЫЙ СИМПОЗИУМ
«АТМОСФЕРНАЯ РАДИАЦИЯ и ДИНАМИКА» (МСАРД – 2023)
21 – 24 июня 2023

ТЕЗИСЫ

Санкт-Петербург
2023

GOVERNMENT OF RUSSIAN FEDERATION

SAINT PETERSBURG STATE UNIVERSITY



**INTERNATIONAL SYMPOSIUM
«ATMOSPHERIC RADIATION and DYNAMICS» (ISARD – 2023)
21 – 24 June 2023**

BOOK OF ABSTRACTS

**Saint-Petersburg
2023**

ОГЛАВЛЕНИЕ (TABLE of CONTENTS)

ПЛЕНАРНАЯ СЕССИЯ.....	2
PLENARY SESSION.....	2
СЕКЦИЯ 1. СПУТНИКОВОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ АТМОСФЕРЫ и ПОВЕРХНОСТИ.....	18
SESSION 1. SATELLITE SOUNDING of ATMOSPHERE and SURFACE.....	18
СЕКЦИЯ 2. ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ АТМОСФЕРЫ и ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ в РАЗЛИЧНЫХ ОБЛАСТЯХ СПЕКТРА.....	59
SESSION 2. REMOTE SENSING of ATMOSPHERE and UNDERLYING SURFACE in DIFFERENT SPECTRAL RANGES.....	59
СЕКЦИЯ 3. ТЕОРИЯ ПЕРЕНОСА ИЗЛУЧЕНИЯ.....	103
SESSION 3. RADIATION TRANSFER THEORY.....	103
СЕКЦИЯ 4. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ РАДИАЦИИ с ОБЛАКАМИ и АЭРОЗОЛЕМ.....	116
SESSION 4. RADIATION-CLOUD and RADIATION-AEROSOL INTERACTIONS.....	116
СЕКЦИЯ 5. ОЗОНОСФЕРА – МОНИТОРИНГ, МОДЕЛИРОВАНИЕ И ПРОГНОЗЫ.....	148
SESSION 5. OZONOSPHERE – MONITORING, MODELING AND FORECASTS	148
СЕКЦИЯ 6. РАДИАЦИОННАЯ КЛИМАТОЛОГИЯ и РАДИАЦИОННЫЕ АЛГОРИТМЫ в МОДЕЛЯХ ПРОГНОЗА ПОГОДЫ и КЛИМАТА.....	172
SESSION 6. RADIATIVE CLIMATOLOGY and ALGORITHMS in MODELS for WEATHER and CLIMATE FORECASTING.....	172
СЕКЦИЯ 7. ХАРАКТЕРИСТИКИ ВОЛН, МАКРОЦИРКУЛЯЦИЯ и ДИНАМИЧЕСКИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ в АТМОСФЕРАХ ЗЕМЛИ и ДРУГИХ ПЛАНЕТ.....	211
SESSION 7. WAVE CHARACTERISTICS, MACROCIRCULATION and DYNAMICS INTERACTIONS in ATMOSPHERES of the EARTH and OTHER PLANETS.....	211
СЕКЦИЯ 8. СТРУКТУРА и СОСТАВ ВЕРХНЕЙ АТМОСФЕРЫ ЗЕМЛИ и ДРУГИХ ПЛАНЕТ.....	240
SESSION 8. STRUCTURE of UPPER ATMOSPHERE of the EARTH and OTHER PLANETS	240
СЕКЦИЯ 9. РАДИАЦИЯ и ДИНАМИКА АТМОСФЕРЫ в ПОЛЯРНЫХ РАЙОНАХ.....	259
SESSION 9. RADIATION and DYNAMICS of POLAR ATMOSPHERE.....	259

Работа А.Н. Колмогорова 1934 года – основа для объяснения статистики природных явлений макромира

Академик РАН Голицын Г.С. (gsg@ifaran.ru)

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

Работа А.Н. Колмогорова 1934 г. "Случайные движения", далее АНК34, использует уравнение типа Фоккера – Планка для 6-мерного вектора с полной, а не частной производной по времени, и с лапласианом в пространстве скоростей. Коэффициентом диффузии при этом является ϵ , скорость генерации/диссипации энергии. Это уравнение получается при задании ускорений частиц ансамбля марковскими процессами, т. е. случайными процессами, δ -коррелированными по времени и между собой. Фундаментальное решение этого уравнения было указано еще в [1] и было использовано А. М. Обуховым [2] в 1958 г. для описания турбулентного потока в инерционном интервале [3]. Уже недавно [4, 5] было замечено, что уравнение типа Фоккера – Планка, написанное Колмогоровым в [1], содержит в себе описание статистики других случайных природных процессов, землетрясений, морского волнения и прочих [5]. Это уравнение заменой переменных с масштабами для скоростей и для координат сводится к автомодельному виду, не содержащему явно коэффициента диффузии [6]. Численный счет подтверждает наличие таких масштабов в системах, с числом N событий, в ансамблях, начиная с $N=10$. При $N = 100$ эти масштабы практически точно совпадают с теорией АНК34. Эта теория, содержащая результаты 1941 г., проложила путь и к более сложным случайным системам, содержащим достаточное количество параметров, чтобы образовать внешний параметр подобия. Это ведет к изменению характеристик случайного процесса, например, к изменению наклона временного спектра, как в случае землетрясений и в ряде других процессов (морское волнение, спектр энергии космических лучей, зоны затоплений при наводнениях и т. д.). Обзор конкретных случайных процессов, изученных экспериментально, дает методику, как следует поступать при сравнении экспериментальных данных с теорией АНК34. Таким образом эмпирические данные иллюстрируют справедливость фундаментальных законов теории вероятности. Статья является многократным сокращением монографии автора, где впервые идеи работы АНК34 применялись для объяснения в вероятностном смысле многих экспериментальных закономерностей, десятилетиями рассматривавшихся чистой эмпирикой.

The work of A N Kolmogorov in 1934 is the basis for explaining the statistics of natural phenomena of the macrocosm

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

A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics RAS, Moscow, Russia

A.N. Kolmogorov's 1934 work "Random Motions", hereinafter referred to as ANK34, uses a Fokker–Planck equation for a 6-dimensional vector with a full, not a partial derivative in time, and with a Laplacian in the velocity space. The diffusion coefficient in this case is ϵ , the rate of energy generation/dissipation. This equation is obtained by specifying the accelerations of the ensemble particles by Markov processes, i.e. random processes, δ -correlated in time and with each other. The fundamental solution of this equation was indicated in [1] and was used

by A.M. Obukhov [2] in 1958. to describe the turbulent flow in the inertial interval [3]. Already recently [4, 5] it was noticed that the Fokker–Planck equation, written by Kolmogorov in [1], contains a description of statistics of other random natural processes, earthquakes, sea waves and others [5]. By replacing variables with scales for velocities and coordinates, this equation reduces to a self-similar form that does not explicitly contain a diffusion coefficient [6]. Numerical counting confirms the presence of such scales in systems with the number of N events, in ensembles, starting from N= 10. At N = 100, these scales almost exactly coincide with the theory of ANK34. This theory, containing the results of 1941, paved the way for more complex random systems containing a sufficient number of parameters to form an external similarity parameter. This leads to a change in the characteristics of a random process, for example, to a change in the slope of the time spectrum, as in the case of earthquakes and in a number of other processes (sea waves, cosmic ray energy spectrum, flood zones, etc.). A review of specific random processes studied experimentally provides a methodology for how to proceed when comparing experimental data with the theory of ANK34. Thus, empirical data illustrate the validity of the fundamental laws of probability theory. The article is a multiple abridgment of the author's monograph, where for the first time the ideas of ANK34's work were used to explain in a probabilistic sense many experimental patterns that had been considered by pure empiricism for decades.

Спутниковые методы исследования газового состава атмосферы

Тимофеев Ю.М. (y.timofeev@spbu.ru)

Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

В докладе рассмотрены современные потребности в мониторинге климатически и экологически важных (КЭВ) атмосферных газов и требования к измерениям их содержания. Проведен обзор систем мониторинга КЭВ атмосферных газов и различных дистанционных методов измерений их содержания. Подробно освещены спутниковые пассивные методы измерений КЭВ атмосферных газов (методы прозрачности, собственного излучения и отраженного и рассеянного солнечного излучения), их преимущества и недостатки. Приводятся сравнения информативности различных спутниковых приборов для мониторинга газового состава атмосферы Земли и примеры спутниковых измерений содержания озона, углекислого газа и их эмиссий. Изложены основные результаты современного мониторинга атмосферных газов и перспективы развития глобальной системы их мониторинга КЭВ.

Satellite methods for studying the gas composition of the atmosphere

Yu.M. Timofeev (y.timofeev@spbu.ru)

Saint Petersburg State University, Saint Petersburg, Russia

This report examines current needs for monitoring atmospheric gases which influence climate and ecology and the requirements for measuring their content. A review of the monitoring systems for such atmospheric gases and various remote methods for measuring their content is carried out. Satellite passive methods of measuring the atmospheric gases (methods of transparency, atmospheric radiation and reflected and scattered solar radiation), their advantages and disadvantages are covered in detail. Comparisons of the informativeness of various satellite instruments to monitor gas composition of the Earth's atmosphere and examples of satellite measurements of ozone, carbon dioxide content and their emissions are

presented. The main results of modern monitoring of atmospheric gases which influence climate and ecology and prospects for the development of a global monitoring system for such gases are presented.

Развитие методов дистанционного зондирования атмосферы с российских метеорологических спутников

Асмус В.В., Крамарева Л.С., Рублев А.Н., Успенский А.Б. (uspensky@planet.iitp.ru)
Научно-исследовательский центр космической гидрометеорологии «Планета», Москва, Россия

Представлен обзор последних разработок НИЦ "Планета" в области создания информационных продуктов дистанционного зондирования атмосферы по данным с российских метеорологических спутников. В настоящее время орбитальная группировка российских метеорологических спутников состоит из двух полярно-орбитальных ("Метеор-М" № 2, "Метеор-М" № 2-2), двух геостационарных ("Электро-Л" № 2 (14,5° з. д.) и "Электро-Л" № 3 (76° в. д.)), а также одного спутника ("Арктика-М" № 1, запущен 28 февраля 2021 года) на высокоэллиптической орбите. Наряду с этим 5 февраля 2023 года был запущен геостационарный метеорологический спутник серии Электро-Л (Электро-Л № 4), который был размещен на 165,8° в. д. Рассмотрено получение информационных продуктов зондирования атмосферы по данным измерений сканера-имаджера МСУ-ГС ("Арктика-М" №1, "Электро-Л" №3) и гиперспектрального ИК-зондировщика ИКФС-2 ("Метеор-М" №2). На сегодняшний день разработаны различные методы (пороговая методика и алгоритмы ANN) дистанционного определения характеристик облачного покрова с использованием данных МСУ-ГС со спутников "Арктика-М" №1 и "Электро-Л" № 3. Сравнение с независимыми синхронными спутниковыми и наземными наблюдениями на метеостанциях за 2022 год продемонстрировало удовлетворительное качество выходных продуктов по параметрам облачности. Запуск спутника "Арктика-М №1" дает возможность осуществлять по данным МСУ-ГС мониторинг состояния атмосферы над всем Арктическим регионом с частотой 15/30 минут и, в частности, обнаруживать зоны осадков и другие погодные явления, включая мониторинг и изучение мезомасштабных циклонов в северных полярных широтах. В НИЦ "Планета" разработаны алгоритмы и программное обеспечение расчета векторов ветра по данным метеоспутников на геостационарной и высокоэллиптической орбитах, использующие измерения МСУ-ГС в 2 или 3 разных момента времени. Примеры карт векторов ветра, восстановленных по данным МСУ-ГС / Электро-Л №3 и МСУ-ГС / Арктика-М №1, представлены вместе со статистикой ошибок. Также обсуждается использование измерений МСУ-ГС для спутникового мониторинга вулканической активности (на примере извержения вулкана Шивелуч). С января 2021 года в НИЦ "Планета" по данным ИКФС-2 / Метеор-М №2 выполняется дистанционное определение усредненной в столбе сухого воздуха мольной доли диоксида углерода (XCO₂) для территории Сибири. Выполнено сравнение оценок XCO₂ по данным ИКФС-2 с параллельными независимыми оценками для территории Сибири за период 2022 года, полученными по данным спектрометров OCO / OCO-2, CrIS/NOAA-20 и TANSO-FTS / GOSAT, а также с результатами самолетных наблюдений. Подтверждена работоспособность предложенной методики.

Remote sounding of the atmosphere from Russian weather satellites - the latest developments

V.V. Asmus, L.S. Kramareva, A.N. Rublev, A.B. Uspensky

This report gives an overview of the latest developments in the generation and use of remote atmosphere sounding products from Russian weather satellites at SRC Planeta. Currently, Russian weather satellites orbital constellation consists of two polar-orbiting (Meteor-M No. 2, Meteor-M No. 2-2), two geostationary or GEO (Electro-L No. 2 (14.5°W) and Electro-L No. 3 (76°E)), as well as one highly elliptical orbit (HEO) satellite (Arktika-M No. 1, launched on February 28th, 2021). Along with this on February 5th, 2023 the new geostationary meteorological satellite of Electro -L series (Electro-L No. 4) was launched and placed at 165.8°E. The presentation focuses on the generation of atmosphere sounding products based on measurements of scanner - imager MSU-GS (Arktika-M No.1, Electro-L No.3) and hyperspectral IR sounder IKFS-2 (Meteor-M No.2). To date, various methods (threshold technique and ANN algorithms) have been developed for remote derivation of cloud cover characteristics using MSU-GS data from Arktika-M No.1 and Electro-L No. 3 satellites. Comparison with synchronous satellite and ground - based observations at weather stations for 2022 year demonstrated satisfactory quality of output information products. The launch of the Arktika-M No. 1 satellite with the MSU-GS instrument onboard provides ability to monitor the state of the atmosphere over the entire Arctic region with a frequency of 15 / 30 minutes and, in particular, to detect the precipitation zones and other weather phenomena, including monitoring and studying mesoscale cyclones in the northern polar latitudes. SRC Planeta has developed algorithms and software for calculation of atmospheric motion vectors (AMVs) from GEO and HEO satellites data. The examples of AMV maps, retrieved from MSU-GS / Electro-L No.3 and MSU-GS / Arktika-M No.1 data are presented together with error statistics. Using the MSU-GS measurements for satellite monitoring of the volcanic activity (eruption of the Shiveluch volcano) is also under discussion. Since January 2021, the SRC Planeta performs the retrieval of atmospheric column-averaged dry-air mole fraction of carbon dioxide (XCO₂) from IKFS-2 data onboard Meteor-M No. 2 satellite. A comparison of the IKFS-2 based XCO₂ estimates with parallel independent estimates over Siberia for the period 2022, obtained from OCO/OCO-2, CrIS/NOAA-20 and TANSO-FTS/GOSAT spectrometers data, as well as the comparison with aircraft observations, confirmed the sufficient effectiveness of developed IKFS-2 data «inversion» methodology and the reliability of satellite monitoring results.

Развитие методов извлечения информации из данных дистанционного зондирования и их приложение к исследованию мезосферы и нижней термосферы

A.M. Фейгин (feigin@ipfran.ru), М.Ю. Куликов
Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород, Россия

Экспериментальное наблюдение малых газовых составляющих (МГС) атмосферы производится с помощью двух групп методов: контактных и дистанционных. Контактные измерения осуществляются посредством самолетов, зондов или ракет и, как правило, обеспечивают более высокую точность измерений. При этом они имеют ряд ограничений и обеспечивают фрагментарное покрытие атмосферы как по времени, так и в пространстве. В сравнении с ними дистанционные измерения обладают большими возможностями. В частности, спутниковые методы позволяют вести регулярные наблюдения и охватывают атмосферу глобально, так что в настоящее время именно эти методы обеспечивают основной объем данных. Одной из основных проблем дистанционных методов является точность измерений: в большинстве случаев они оперируют с интегральным сигналом (характеризуемым спектром собственного

излучения/поглощения атмосферы), приходящим, как правило, из широкого диапазона высот и во многих случаях довольно сильно зашумленным, что дает заметную случайную и систематическую ошибку в измеренных данных. Кроме того, далеко не все МГС средней атмосферы имеют соответствующие линии поглощения/излучения с нужной интенсивностью в технически доступных диапазонах длин волн.

Хорошо известный способ увеличить информативность экспериментальных данных – использование химико-транспортных моделей для извлечения информации о неизмеряемых характеристиках по экспериментальным данным. В рамках такого подхода модель выступает в качестве априорной связи между измеряемыми непосредственно и восстанавливаемыми характеристиками. Эти связи могут применяться для восстановления неизмеряемых МГС из имеющихся экспериментальных данных, независимого определения других характеристик атмосферы (например, температуры), валидации данных одновременных наблюдений нескольких МГС, оценки констант химических реакций, известных с большой погрешностью, источников (эмиссий) и др. Отметим, что привлечение моделей к обработке измеряемых данных может значительно (в разы) увеличивать информативность результатов экспериментальных кампаний по исследованию атмосферы.

Наиболее простая модель, позволяющая осуществить указанный подход, основана на условии локального (как во времени, так и в пространстве) фотохимического/химического баланса (равновесия) между источниками и стоками так называемых «быстрых» переменных модели: концентраций МГС со сравнительно малыми (в том числе - относительно характерных времен переноса) временами жизни. С математической точки зрения, данное условие не означает пребывание данных переменных в состоянии равновесия, но при его выполнении соответствующие концентрации могут сколь угодно близко подходить к своим мгновенно-равновесным значениям. «Степень равновесности» каждой быстрой компоненты определяется соотношением между временем ее жизни и характерным временем изменения ее мгновенно-равновесной концентрации. При этом из-за сильной диссипации в большинстве случаев (кроме особых ситуаций, когда в ансамбле быстрых компонент присутствуют формируемые ими медленные семейства) нет необходимости следить за выполнением закона сохранения массы и можно отбрасывать малосущественные стоки и источники, в том числе обусловленные переносом, практически без потери точности. В результате, получаемые алгебраические соотношения являются наиболее простыми априорными локальными связями между измеряемыми и неизмеряемыми МГС атмосферы.

В докладе представлены (1) общий подход [1-2] поиска быстрых МГС с привлечением глобальной 3D модели, включающий в себя построение карт химического равновесия, выделение основных источников и стоков и вывод аналитических критериев, позволяющих определять выполнение условия равновесия конкретной МГС (локально во времени и пространстве) непосредственно по данным измерений; (2) несколько примеров применения такого подхода на высотах мезосферы и нижней термосферы и последующего их приложения к спутниковым данным, в частности, для валидации данных одновременных наблюдений нескольких МГС [3].

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-12-00064, <https://rscf.ru/project/22-12-00064/>

1. Kulikov M.Yu., Belikovich M.V., Grygalashvyly M., Sonnemann G. R., Ermakova T.S., Nechaev A.A., Feigin A.M. Nighttime ozone chemical equilibrium in the mesopause region // J. Geophys. Res. 2018. V. 123. P. 3228– 3242.
2. Kulikov M.Yu., Nechaev A.A., Belikovich M.V., Vorobeva E.V., Grygalashvyly M., Sonnemann G.R., Feigin A.M. Boundary of nighttime ozone chemical equilibrium in the mesopause region from SABER data: Implications for derivation of atomic oxygen and atomic hydrogen // Geophys. Res. Lett. 2019. V. 46. No. 2. P. 997–1004.

3. Kulikov M.Y., Nechaev A.A., Belikov M.V., Ermakova T.S., Feigin A.M. Technical note: Evaluation of the simultaneous measurements of mesospheric OH, HO₂, and O₃ under a photochemical equilibrium assumption – a statistical approach // Atmos. Chem. Phys. 2018. V. 18 P. 7453-7471.

Development of methods for extracting information from remote sensing data and their application to the study of the mesosphere and lower thermosphere

A.M.Feigin (feigin@ipfran.ru), M.Yu.Kulikov
Institute of Applied Physics of RAS, Nizhny Novgorod, Russia

Experimental study of small gaseous components (MGC) of the atmosphere is carried out using two groups of methods: contact and remote. Contact measurements are made by aircraft, probes or rockets and generally provide higher measurement accuracy. At the same time, they have a number of limitations and provide a fragmentary coverage of the atmosphere both in time and in space. In comparison with them, remote measurements have great potential. In particular, satellite methods allow regular observations and cover the atmosphere globally, so that at present these methods provide the bulk of the data. One of the main problems of remote sensing methods is the accuracy of measurements: in most cases they operate with an integral signal (characterized by the natural radiation/absorption spectrum of the atmosphere), which, as a rule, comes from a wide range of heights and in many cases is quite noisy, which gives a noticeable random and systematic error in the measured data. In addition, not all MHSs of the middle atmosphere have the corresponding absorption/emission lines with the required intensity in technically accessible wavelength ranges.

A well-known way to increase the information content of experimental data is to use chemical transport models to extract information about unmeasured characteristics from experimental data. Within the framework of this approach, the model acts as an a priori relationship between directly measured and reconstructed characteristics. These relationships can be used to reconstruct unmeasured MHSs from the available experimental data, independently determine other atmospheric characteristics (for example, temperature), validate data from simultaneous observations of several MHSs, estimate chemical reaction constants known with a large error, sources (emissions), etc. Note that the involvement of models in the processing of measured data can significantly (by several times) increase the information content of the results of experimental campaigns for the study of the atmosphere.

The simplest model that makes it possible to implement this approach is based on the condition of local (both in time and space) photochemical/chemical balance (equilibrium) between sources and sinks of the so-called "fast" variables of the model: MHC concentrations with relatively low (including compared with the characteristic transfer times) lifetime. From a mathematical point of view, this condition does not mean that these variables are in equilibrium, but if it is satisfied, the corresponding concentrations can approach their instantaneous equilibrium values as close as desired. The "degree of equilibrium" of each fast component is determined by the ratio of its lifetime to the characteristic time of change of its instantaneous-equilibrium concentration. At the same time, due to strong dissipation, in most cases (with the exception of special situations when the ensemble of fast components contains the slow families they form), there is no need to control the fulfillment of the mass conservation law and it is possible to discard insignificant sinks and sources, including those caused by transport, in practice without loss of precision. As a result, the resulting algebraic relations are the simplest a priori local relations between measurable and non-measurable MHSs of the atmosphere.

The report presents (1) a general approach [1-2] to searching for fast MHSs using a global 3D model, including the construction of chemical equilibrium maps, identification of the main

sources and sinks, and derivation of analytical criteria that allow determining the fulfillment of the equilibrium condition for a specific MHS (locally in time and space) directly from measurement data; (2) several examples of the application of such an approach at heights of the mesosphere and lower thermosphere and their subsequent application to satellite data, in particular, to validate the data of simultaneous observations of several MHSs [3].

The study was supported by a grant from the Russian Science Foundation No. 22-12-00064, <https://rscf.ru/project/22-12-00064/>

1. Kulikov M.Yu., Belikovich M.V., Grygalashvyly M., Sonnemann G. R., Ermakova T.S., Nechaev A.A., Feigin A.M. Nighttime ozone chemical equilibrium in the mesopause region // J. Geophys. Res. 2018. V. 123. P. 3228–3242.
2. Kulikov M.Yu., Nechaev A.A., Belikovich M.V., Vorobeva E.V., Grygalashvyly M., Sonnemann G.R., Feigin A.M. Boundary of nighttime ozone chemical equilibrium in the mesopause region from SABER data: Implications for derivation of atomic oxygen and atomic hydrogen // Geophys. Res. Lett. 2019. V. 46. No. 2. P. 997–1004.
3. Kulikov M.Y., Nechaev A.A., Belikovich M.V., Ermakova T.S., Feigin A.M. Technical note: Evaluation of the simultaneous measurements of mesospheric OH, HO₂, and O₃ under a photochemical equilibrium assumption – a statistical approach // Atmos. Chem. Phys. 2018. V. 18 P. 7453-7471.

Основные результаты мониторинга состава воздуха на территории Западной Сибири и акватории Российского сектора Арктики, проведенного ИОА СО РАН с помощью стационарных и мобильных комплексов

Антонович В.В., Антохина О.Ю., Антохин П.Н., Аршинова В.Г., Аршинов М.Ю., Белан Б.Д. (bbd@iao.ru), Белан С.Б., Гурулева Е.В., Давыдов Д.К., Дудорова Н.В., Ивлев Г.А., Козлов А.В., Рассказчикова Т.М., Савкин Д.Е., Симоненков Д.В., Скляднева Т.К., Толмачев Г.Н., Фофонов А.В.

Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, Томск, Россия

Для мониторинга состава воздуха в приземном слое воздуха в декабре 1992 года была создана TOR-станция в рамках международного проекта по исследованию тропосферного озона TOR (Tropospheric Ozone Research) европейской программы EUROTRAC. Затем в строй была введена обсерватория «Фоновая», расположенная на восточном берегу реки Оби, в 60 км к западу от Томска. Для контроля концентрации парниковых газов в пригородном районе была запущена обсерватория «Базовый экспериментальный комплекс» в 3 км к востоку от TOR-станции. С целью расширения контролируемой территории в начале 2000 годов была создана сеть JR-STATION (Japan-Russia Siberian Tall Tower Inland Observation Network). Она в настоящее время состоит из 6 постов и охватывает почти все территорию Западной Сибири. В ее состав также входит комплекс для исследования потоков парниковых газов на границе почва-атмосфера (Васюганское болото). Мобильные средства представлены автомобильным комплексом для измерений концентрации CH₄ и CO₂ и самолетом-лабораторией Ту-134 «Оптик» (ранее работы выполнялись на Ан-30).

Проведенный мониторинг состава воздуха показал, что на территории Западной Сибири продолжается рост концентрации углекислого газа, как в приземном слое воздуха, так и в свободной атмосфере. В приземном слое воздуха тренд концентрации CO₂ лежит в пределах 2,15-2,18 млн⁻¹/год, в свободной атмосфере 2,15-2,21 млн⁻¹/год. Такие параметры для метана составляют 8,4-10,9 млрд⁻¹/год в приземном слое и 7,9-9,1 млрд⁻¹/год на разных высотах в тропосфере. Причем для обоих газов темпы прироста усиливаются. Особенно настораживает высокая скорость роста концентрации углекислого газа в летний период в пограничном слое атмосферы, которая составляет 2,74 млн⁻¹/год.

Мониторинг состава воздуха и анализ результатов проведены по проекту Минобрнауки РФ «Исследование антропогенных и естественных факторов изменений состава воздуха и объектов

The main results of air composition monitoring over the territory of West Siberia and the water area of the Russian Arctic carried out by IAO SB RAS using ground-based and mobile facilities

V.V. Antonovich, O.Yu. Antokhina, P.N. Antokhin, V.G. Arshinova, M.Yu. Arshinov, B.D. Belan (bbd@iao.ru), S.B. Belan, E.V. Guruleva, D.K. Davydov, N.V. Dudorova, G.A. Ivlev, A.V. Kozlov, T.M. Rasskazchikova, D.E. Savkin, D.V. Simonenlov, T.K. Sklyadneva, G.N. Tolmachev, A.V. Fofonov

V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics of SB SO RAS, Tomsk, Russia

In December 1992, the TOR-station for monitoring the air composition in the atmospheric surface layer was established in the framework of the Tropospheric Ozone Research project of the EUROTRAC programme. Then, the Fonovaya Observatory located on the eastern bank of the Ob River (60 km west of Tomsk) was put into operation. To monitor the concentration of greenhouse gases in a suburban area, the Basic Experimental Complex observatory has been created 3 km east of the TOR-station. In order to expand the area covered by observations of greenhouse gas concentrations, the JR-STATION (Japan-Russia Siberian Tall Tower Inland Observation Network) network was established in the early 2000s. At present, it consists of six observation stations and covers almost the entire territory of West Siberia. It also includes one additional site equipped with a system to study greenhouse gas fluxes at the soil-atmosphere interface (Vasyugan swamp). Mobile facilities are represented by an automobile research system for measuring CH₄ and CO₂ concentrations and the Optik Tu-134 aircraft laboratory (earlier Optik-E An-30 one).

The long-term monitoring of the air composition showed that the concentration of carbon dioxide over West Siberia continues to grow both in the atmospheric surface layer (ASL) and in the free troposphere (FT). The trend of CO₂ concentration in the ASL and FT lies within the range of 2.15-2.18 ppm/yr and 2.15-2.21 ppm/yr, respectively. The trends of CO₂ concentration in the ASL and FT lie within the range of 2.15-2.18 ppm/yr, and 2.15-2.21 ppm/yr, respectively. And methane ones are 8.4–10.9 ppb/yr in the ASL and 7.9–9.1 ppb/yr at different heights in the troposphere, respectively. Moreover, the growth rates of both gases are increasing. Particularly alarming is the high growth rate of the CO₂ concentration in the atmospheric boundary layer in the summer months, which is 2.74 ppm/yr.

Monitoring of the air composition and analysis of the results were carried out under the project of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation "Study of anthropogenic and natural factors of changes in the air composition and environmental objects in Siberia and the Russian Arctic under conditions of fast climate change" using the unique scientific installation "The Optik Tu-134 Aircraft laboratory", agreement No. 075-15-2021-934.

Изучение эволюции озонового слоя в прошлом и будущем с помощью химико-климатических моделей

Смышляев С.П.^{2,3}, Розанов Е.В.^{1,2}, Галин В.Я.⁴

¹Физико-метеорологическая обсерватория Давоса – Всемирный радиационный центр, Давос, Швейцария

²Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

³Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург, Россия

⁴Институт вычислительной математики РАН, Москва, Россия

Изменчивость озонового слоя Земли важна как с экологической, так и с климатической точек зрения, т. к. озон, с одной стороны, защищает жизнь на Земле от губительного воздействия жесткой части солнечного спектра, а, с другой стороны, является парниковым газом, прямо и косвенно влияя на изменения климата. В последние десятилетия содержание озона в земной атмосфере претерпевало значительные изменения, вызванные как естественными, так и антропогенными факторами. В последние десятилетия XX века содержание озона в глобальном масштабе сокращалось, главным образом, из-за увеличения галогеносодержащих озон-разрушающих веществ (ГОРВ) антропогенного происхождения. В XXI веке ожидается восстановление озонового слоя благодаря ограничениям на выбросы ГОРВ, введенным Монреальским протоколом, его поправками и дополнениями. Вместе с тем изменения климата также могут оказать влияние на содержание озона из-за изменения температуры и переноса. Для понимания особенностей взаимодействия изменения климата и содержания озона используются химико-климатические модели, в интерактивном режиме учитывающие взаимодействие физических и химических процессов в земной атмосфере.

В данной работе обсуждается поведение озона с 1980 по 2100 год, смоделированное с помощью химико-климатических моделей SOCOLv4 и ИВМ РАН - РГГМУ. На основе выполненных по специальным сценариям модельных экспериментов оценивается относительная вклад различных природных и антропогенных факторов в наблюдаемую и ожидаемую изменчивость атмосферного озона в прошлом и будущем. Будущее поведение озонового слоя оценивается на основе модельных расчетов с учетом короткоживущих примесей, вновь открытых озон-разрушающих веществ, солнечной и вулканической активности и для двух сценариев антропогенной деятельности МГЭИК (SSP2-4.5 и SSP5-8.5), а также температуры поверхности океана и площади его покрытия льдом. В обоих сценариях модели прогнозируют уменьшение содержания тропосферного озона в будущем из-за уменьшения количества прекурсоров озона. Озон увеличивается также в мезосфере, верхней и средней стратосфере, однако в нижней стратосфере его рост наблюдается только в высоких широтах. Для сценария SSP5-8.5 содержание озона в стратосфере увеличивается больше за счет более сильного охлаждения и подавления циклов каталитического разрушения озона. Напротив, в тропической нижней стратосфере концентрация озона в обоих экспериментах снижается, а над внетропической увеличивается из-за интенсификации меридионального переноса, который сильнее в SSP5-8.5. Общее содержание озона в будущем превысит современные значения в средних и высоких широтах, но уменьшится в тропиках. Таким образом, эволюция стратосферного озона в XXI веке в значительной степени определяется не только снижением содержания ГОРВ, но и воздействием других факторов, в частности содержания парниковых газов. Изменения тропосферного озона из-за изменений в предвестников озона также оказывают сильное влияние. Таким образом, хотя проблема антропогенных ГОРВ в ближайшее время может быть решена, будущие изменения озонового слоя еще не до конца понятны, в значительной степени зависят от разнообразной будущей деятельности человека и, следовательно, требуют дальнейшего углубленного изучения, как с использованием численных моделей, так и на основе сравнения их расчетов с результатами наблюдений.

Studying past and future evolution of the ozone layer using chemistry-climate models

S.P. Smyshlyaev^{2,3}, E.V. Rozanov^{1,2}, V. Ya Galin⁴

¹*Davos Physical and Meteorological Observatory - World Radiation Center, Davos, Switzerland*

²*Saint Petersburg State University, Saint Petersburg, Russia*

The variability of the Earth's ozone layer is important from both ecological and climatic points of view, since ozone, on the one hand, protects life on Earth from the harmful effects of the solar UV radiation, and, on the other hand, is a greenhouse gas, directly and indirectly influencing climate. In recent decades, the ozone content in the Earth's atmosphere has undergone significant changes caused by both natural and anthropogenic factors. In the last decades of the 20th century, ozone levels have been declining globally, mainly due to an increase in halogen-containing ozone-depleting substances (hODS) of anthropogenic origin. In the 21st century, the ozone layer is expected to recover due to the limitation of hODS emissions introduced by the Montreal Protocol, its amendments, and additions. However, climate change can also affect ozone through temperature and transport changes. To understand the features of the interaction between climate change and ozone content, chemistry-climate models are used, which consider the interaction of physical and chemical processes in the Earth's atmosphere.

This paper discusses the behavior of ozone from 1980 to 2100, modeled using the SOCOLv4 and the INM RAS – RSHU chemistry-climate models. On the basis of model experiments performed under special scenarios, the relative contribution of various natural and anthropogenic factors to the observed and expected variability of atmospheric ozone in the past and future is estimated. The future behavior of the ozone layer is estimated based on model calculations, taking into account short-lived species, newly discovered ozone-depleting substances, solar and volcanic activity, and for two IPCC scenarios of anthropogenic activity (SSP2-4.5 and SSP5-8.5), as well as ocean surface temperature and its area ice coverings for the INM RAS – RSHU. In both scenarios, models predict a future decrease in tropospheric ozone due to a decrease in ozone precursors. Ozone also increases in the mesosphere, upper and middle stratosphere, but in the lower stratosphere its growth is observed only at high latitudes. For the SSP5-8.5 scenario, stratospheric ozone increases more due to stronger cooling and suppression of catalytic ozone destruction cycles. On the contrary, in the tropical lower stratosphere, the ozone concentration decreases in both experiments, while over the extratropical one it increases due to the intensification of the meridional transport, which is stronger in SSP5-8.5. The total ozone content in the future will exceed current values in the middle and high latitudes but will be lower in the tropics. Thus, the evolution of stratospheric ozone in the 21st century is largely determined not only by the decrease in the content of hODS, but also by the influence of other factors, in particular, the content of greenhouse gases. Changes in tropospheric ozone due to changes in ozone precursors also have a strong influence. Thus, although the problem of anthropogenic hODS may be solved in the near future, future changes in the ozone layer are not yet fully understood and depend to a large extent on a variety of future human activities and, therefore, require further in-depth study, both using numerical models and comparison of with the observations.

Nowcasting Atmospheric Radiation and Dynamics

Costas VAROTSOS^{1,2} (covar@phys.uoa.gr) and Yong XUE^{2,3} (yxue@cumt.edu.cn)

¹*National and Kapodistrian University of Athens, Dept. of Physics, Section of Environmental Physics & Meteorology, Athens, Greece*

²*China University of Mining and Technology, School of Environment Science and Spatial Informatics, Xuzhou, PR China*

³*University of Derby, Dept. of Electronics, Computing and Mathematics, College of Science and Engineering, Derby, UK*

The term nowcasting (abbreviation of "now" and "forecast") - originating from meteorology - refers to the technique of implementing short-term forecasting starting from observational and projected modelled data.

It has recently become popular in various sciences, such as meteorology (e.g., weather), economics (e.g., gross domestic product), sociology (e.g., social media content) and medicine (e.g., the presence of a flu epidemic).

In meteorology, nowcasting was introduced forty years ago as “the description of the current state of the weather in detail and the prediction of changes that can be expected on a timescale of a few hours”.

In economics, the assessment of the state of an economy by the Central Banks is often determined after a long delay (due to the difficulty in timely collecting information) and is subject to revision to monitor the state of the economy in real time to take official action. So, in economy the term nowcasting characterizes the fact that economists must predict the present and even the recent past, unlike meteorologists who, knowing the weather today, only must predict the future weather.

In recent years, there has been an increase in the frequency and intensity of extreme weather conditions and the climate, such as heat waves, droughts, floods, tropical cyclones and hurricanes. The seamless prediction of high-impact weather on a wide range of scales (from nowcasting to seasonal prediction and beyond) needs to be improved, with a particular emphasis on local scales, where quick decisions must be made to save lives and property.

Nowcasting plays an important role in disaster risk management and risk prevention today. Given the usefulness of nowcasting, it is desirable for each National Meteorological Service to develop such a tool to provide effective nowcasting services to relevant users, including the following: thunderstorms (lightning, hail, catastrophic winds, heavy rainfall, tornadoes), heavy rainfall (floods), strong wind, visible / fog, winter type of rainfall (snow, sleet, icy rain, drizzle, frost). These extreme weather events are not only relevant for safety and health but also for every-day life, entertainment, or tourism. However, apart from them, special user groups demand nowcasting parameters for the renewable energy sector, such as, the precise wind nowcast at the height of the wind turbines and the solar irradiance at the sides of the solar power plants, which often depends heavily on extremely fast changes in local cloudiness.

The purpose of the present paper is to propose an innovative nowcasting tool of extreme geophysical events using an advanced analytical method of remote sensing observations of radiation, atmosphere and dynamics. This is based on a new view of time, termed Natural Time, determining when a complex system approaches criticality.

Городской аэрозоль, его прямой радиационный и температурный эффект и оценки результатов аэрозольно-облачного взаимодействия по данным численных экспериментов, наземных и спутниковых измерений в крупном мегаполисе (на примере Москвы)

Чубарова Н.Е.¹(natalia.chubarova@gmail.com), Шувалова Ю.О.², Андросова Е.Е.^{1,2}, Кирсанов А.А.², Шатунова М.В.², Жданова Е.Ю.¹, Полюхов А.А.^{1,2}, Варенцов М.И.^{1,2,3}, Ривин Г.С.^{1,2}

¹Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

²Гидрометеорологический научно-исследовательский центр РФ, Москва, Россия

³ Научно-исследовательский вычислительный центр МГУ имени М.В. Ломоносова, 119234, Москва, Российская Федерация

Городское аэрозольное загрязнение оказывает значимое воздействие на радиационные процессы в атмосфере и ее температурно-влажностный режим. Для его оценки в Московском регионе были использованы спутниковые и наземные измерения, а также результаты численного моделирования системой COSMO и COSMO-ART&URB с применением химико-транспортной модели ART и параметризации TERRA-URB, позволяющей учесть особенности городской застройки. Численные расчеты проведены с шагом сетки 2 км с использованием современных инвентаризационных баз данных, а также их перераспределения по данным OpenStreetMap. Оценено воздействие аэрозольного загрязнения на радиационные и метеорологические характеристики атмосферы, а также на остров тепла. Оценена чувствительность радиационных и метеорологических полей к различным сценариям городских эмиссий. Качество оценки воспроизведения газовой-аэрозольного состава у поверхности земли и в столбе атмосферы тестировалось с использованием измерений ГПБУ «Мосэкомониторинг» и данных международной сети AERONET в Метеорологической Обсерватории МГУ (МО МГУ). На основании спутниковых данных MODIS и MISR выявлена пространственно-временная изменчивость аэрозольной оптической толщины в московском регионе с 2000 по 2021 г. и ее городская составляющая. Проведены оценки ее влияния на радиационные и температурные эффекты в регионе. Облачно-аэрозольное взаимодействие изучалось для периода локдауна за счет COVID-19 весной 2020 года, когда выбросы загрязняющих веществ в атмосферу значительно уменьшились за счет существенного снижения эмиссий загрязняющих веществ от автотранспорта, а также из-за закрытия многих предприятий. На основании спутниковых данных MODIS показано уменьшение концентрации облачных ядер конденсации в этот период на 50 см^{-3} при близких метеорологических условиях. Численные эксперименты с моделью COSMO позволили оценить радиационные эффекты за счет этого явления.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ, мегагрант № 075-15-2021-574 в рамках научно-образовательной школы МГУ «Будущее планеты и глобальные изменения окружающей среды». Численные эксперименты с моделью COSMO выполнены в рамках Научно-исследовательской и технологической работы Росгидромета АААА-А20-120021490079-3.

Urban aerosol, its direct radiative and temperature effect and evaluation of the results of aerosol-cloud interaction based on numerical experiments, ground and satellite measurements in a large megacity (on the example of Moscow)

N.E. Chubarova¹ (natalia.chubarova@gmail.com), Yu.O. Shuvalova², E.E. Androsova^{1,2}, A.A. Kirsanov², M.V. Shatunova², E.Yu. Zhdanova¹, A.A. Poliukhov^{1,2}, M.I. Varentsov^{1,2,3}, G.S. Rivin^{1,2}

¹*M.V. Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia*

²*Hydrometeorological Research Center of Russia, Moscow, Russia*

³*Research Computing Center, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia*

Urban aerosol pollution has a significant impact on radiation processes in the atmosphere and its temperature and humidity regime. For its evaluation over the Moscow region, we used satellite and ground measurements, as well as the results of numerical modeling by the COSMO and COSMO-ART&URB system using the ART chemical transport model and TERRA-URB parameterization, which allows taking into account the features of urban development. Numerical calculations were carried out with a grid step of 2 km using modern inventory databases, as well as their redistribution according to OpenStreetMap data. The impact of aerosol pollution on the radiation and meteorological characteristics of the atmosphere, as well as on the heat island, was estimated. We also obtained sensitivity of radiation and meteorological fields to various scenarios of urban emissions. Testing of model

gas-aerosol composition at the earth's surface and in the column of the atmosphere was made against the data of Mosecomonitoring Agency and the AERONET network dataset at the MSU Meteorological Observatory (MSU MO). Based on MODIS and MISR satellite data, the spatial and temporal variability of the aerosol optical thickness in the Moscow region from 2000 to 2021 and its urban component has been revealed. We also assessed its influence on radiation and temperature effects. Cloud-aerosol interaction was studied for the lockdown period due to COVID-19 in the spring of 2020, when the emissions of pollutants into the atmosphere significantly decreased due to a reduction in emissions of pollutants from vehicles, as well as due to the closure of many enterprises. Based on satellite MODIS data, we showed a decrease in the concentration of cloud condensation nuclei during this period by 50 cm⁻³ for similar meteorological conditions. Using these data we estimated radiative effects due to this phenomenon using numerical experiments with the COSMO model.

The work was supported by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation megagrant No. 075-15-2021-574 and fulfilled within the framework of the MSU scientific and educational school "The Future of the planet and global environmental changes". Numerical experiments with the COSMO model were performed as a part of the Research and technological work of Roshydromet AAAAA20-120021490079-3.

Модель климатической системы ИВМ РАН

Володин Е.М. (volodinev@gmail.com)

Институт вычислительной математики им. Г.И. Марчука РАН, Москва, Россия

Модель климатической системы ИВМ РАН включает в себя блоки общей циркуляции атмосферы, общей циркуляции океана, аэрозольный блок, блок углеродного цикла, а также может включать в себя некоторые другие, например модель озер, ледниковых щитов, расчет электрических явлений. Такие модели должны эффективно реализовываться на массивно-параллельных компьютерах с распределенной памятью.

Модель используется для воспроизведения современного климата и его недавних изменений, для моделирования климата прошлых эпох, прогноза вероятных будущих изменений климата. Модель участвовала в программе сравнения климатических моделей CMIP6, результаты которого приведены в 6-м ОД МГЭИК. В последние годы модель используется совместно с Гидрометцентром для оперативного прогноза аномалий погоды и климата на срок от сезона до 1-5 лет. Модель климата используется также для образовательных целей в МГУ.

Одной из важнейших проблем современной науки моделирования климата является проблема равновесной чувствительности к удвоению концентрации CO₂. Для современных моделей эта величина меняется от 1.8 до 5.6 градуса. Показано, что основной причиной различия чувствительности является различная реакция облачности на глобальное потепление. рассматриваются механизмы, ответственные за уменьшение и увеличение равновесной чувствительности.

Рассматривается воспроизведение изменений климата в 20-начале 21 века моделью, включая глобально осредненную температуру, теплосодержание океана, и некоторые региональные особенности. Показано, что многие пространственные особенности изменения климата в последние десятилетия можно объяснить откликом на изменение воздействий на климатическую систему.

Climate system model of INM RAS

E.M. Volodin (volodinev@gmail.com)

Marchuk Institute of Numerical Mathematics RAS, Moscow, Russia

The climate system model of the INM RAS includes blocks of general atmospheric circulation, general oceanic circulation, aerosol block, carbon cycle block, and may also include some others, for example, a model of lakes, ice sheets, and calculation of electrical phenomena. Such models should be efficiently implemented on massively parallel computers with distributed memory.

The model is used to reproduce the current climate and its recent changes, to model the climate of past eras, and to predict probable future climate changes. The model participated in the CMIP6 Climate Model Comparison Program, the results of which are presented in the AR6 IPCC. In recent years, the model has been used in conjunction with the Hydrometeorological Center for the operational forecast of weather and climate anomalies for a period from a season to 1-5 years. The climate model is also used for educational purposes at Moscow State University.

One of the most important problems in the modern science of climate modeling is the problem of equilibrium sensitivity to a doubling of CO₂ concentration. For present day models, this value varies from 1.8 to 5.6 degrees. It is shown that the main reason for the difference in sensitivity is the different response of cloudiness to global warming. The mechanisms responsible for the decrease and increase in the equilibrium sensitivity are considered.

Model reproduction of climate changes in the 20th and early 21st centuries is considered, including globally averaged temperature, ocean heat content, and some regional features. It is shown that some of the spatial features of climate change in recent decades can be explained by the response to changing impacts on the climate system.

Численные прогноз погоды, моделирование климата и система Земля для мезо-γ- и микро-α-масштабных процессов на экзафлопсных суперкомпьютерах

Ривин Г.С.^{1,2} (gdaly.rivin@mail.ru)

¹Гидрометеорологический научно-исследовательский центр РФ, Москва, Россия

²Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

Численный прогноз погоды (ЧПП) появился только в 20-м веке. Основные вехи развития ЧПП следующие: 1904 г. - меморандум о применении законов механики и физики для прогноза погоды (V. Bjerknes); 1922 г. - первый неудачный ЧПП (L. F. Richardson); 1940 г. - первый удачный ЧПП (И.А. Кибель); 1945 г. – предложение использовать компьютер в метеорологии (V. Zworykin - «отец телевидения», J. von Neuman - «отец компьютеров»); 1950 г. - первое применение ЭВМ для ЧПП (J. G. Charney, R. Fjoertoft, J. von Neuman); 1955 г. - первый в мире оперативный ЧПП (Швеция), 1956 г. – первый численный эксперимент с двухуровневой квазигеострофической моделью общей циркуляции атмосферы как основы численного моделирования климата (ЧМК, N.A. Phillips); 1964 г. – метод расщепления для сведения решения сложной нелинейной системы дифференциальных уравнений ЧПП с помощью неявных схем (Г.И. Марчук); 1966 г. - первый метеорологический спутник Космос-122 (СССР); 1982 г. – полунеявный метод как дальнейшее развитие идей Г.И. Марчука (A. Robert) и было бы правильно называть его методом Марчука-Робера. Отмечу, что в настоящее время практически во всех моделях ЧПП и ЧМК используется метод расщепления.

В 21-м веке резко ускорилось развитие систем оперативного ЧПП и ЧМК. В 2015 г. была опубликована обзорная статья (Bauer P., Thorpe A., Brunet G. The quiet revolution of numerical weather prediction // Nature, 2015, Volume 525, Issue 7567, 02 Sept., p. 47 – 55, doi 10.1038/nature14956) с удачным названием «Тихая революция в ЧПП», чтобы

привлечь внимание научной общественности к значительным изменениям, происходящим в последнее время в ЧПП. В настоящее время революционные процессы в детализации ЧПП и ЧМК усиливаются, но они по-прежнему не очень хорошо известны широкому обществу.

Цель доклада – дать информацию о значительном продвижении в последние годы численного моделирования на основе детализированных бесшовных негидростатических моделей ЧПП и ЧМК и планах подготовки на их основе численной системы Земля высокой детализации с шагами сетки 1 км и менее для описания атмосферных мезо- γ - и микро- α -масштабных процессов, соответственно, из интервалов 20 км - 2км и 2 км - 200 м по классической классификации I. Orlansky (1975 г.). Предполагается обсудить как уже работающие оперативные системы ЧПП с совместными моделями атмосферы, океана и деятельного слоя суши (IFS ECMWF, UM Великобритании), так и подготавливаемые (Германия и др.), планы подготовки до 2030 г и результаты первых численных экспериментов с различными численными системами Земли на экзафлопсных суперкомпьютерах, а также совершенствование физических (включая радиацию, микрофизические процессы в облаках, учет аэрозолей и их влияния), вычислительных, биологических и химических блоков моделей для ЧПП и ЧМК по материалам публикаций 2020-2023 гг и численных экспериментов с конфигурациями ICON-Ru в Гидрометцентре России.

Работа выполнена в рамках Научно-исследовательской работы Росгидромета АААА-А20-120021490079-3. Анализ работ по развитию физического (в частности, радиационного) блока моделей проведен при поддержке Министерства образования и науки РФ, мегагрант № 075-15-2021-574 в рамках научно-образовательной школы МГУ «Будущее планеты и глобальные изменения окружающей среды».

Numerical weather prediction, numerical climate modeling and Earth numerical system for meso- γ - and micro- α -scales processes on exascale supercomputers

Rivin G.S.^{1,2}

¹*Hydrometeorological Research Center of Russia, Moscow, Russia*

²*M.V. Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia*

Numerical weather prediction (NWP) appeared in the 20th century only. The main milestones in the development of NWP are as follows: 1904 - memorandum on the application of the laws of mechanics and physics for weather forecasting (V. Bjerknes); 1922 - first unsuccessful NWP (L. F. Richardson); 1940 - the first successful NWP (I.A. Kibel); 1945 - proposal to use a computer in meteorology (V. Zworykin, J. von Neuman); 1950 - the first use of computers for NWP (J. G. Charney, R. Fjoertoft, J. von Neuman); 1955 - the world's first operational NWP (Sweden), 1956 - the first numerical experiment with a two-level quasi-geostrophic model of the general circulation of the atmosphere as the basis for numerical climate modeling (NCM, N.A. Phillips); 1964 – splitting method for reducing the solution of a complex non-linear system of NWP differential equations using implicit schemes (G.I. Marchuk); 1966 - the first meteorological satellite Cosmos-122 (USSR); 1982 - semi-implicit method as a further development of the ideas of G.I. Marchuk (A. Robert) and it would be correct to call it the Marchuk-Robert method. I would like to note that at present practically all NWP and NMC models use the splitting method.

In the 21st century, the development of operational NWP and NCM systems has accelerated dramatically. A review article was published in 2015 (Bauer P., Thorpe A., Brunet G. The quiet revolution of numerical weather prediction // Nature, 2015, Volume 525, Issue 7567, 02 Sept.,

p. 47 – 55, doi:10.1038/nature14956) aptly titled to draw the attention of the scientific community to the significant recent changes in NWP. Currently, the revolutionary processes in the detailing of NWP and NCM are intensifying, but they are still not very well known to the general public.

The purpose of the report is to provide information on the significant progress in recent years of numerical modeling based on detailed seamless non-hydrostatic models of NWP and NCM and plans for the preparation of a highly detailed Earth numerical system with grid spacing of 1 km or less to describe atmospheric meso- γ - and micro- α -scale processes, respectively, from intervals of 20km-2km and 2km-200m according to the classical classification of I. Orlansky (1975). It is expected to discuss both the already used operational NWP systems with coupling models of the atmosphere, ocean and active layer of land (IFS ECMWF, UM UK), and those being prepared (Germany and others), plans for preparation until 2030 and the results of the first numerical experiments with various Earth numerical systems on exascale supercomputers, as well as improving the physical (including radiation, microphysical processes in clouds, taking into account aerosols and their influence), computational, biological and chemical blocks of models for NWP and NCM based on materials from publications 2020-2023 and numerical experiments with ICON-Ru configurations at the Hydrometeorological Center of Russia.

The work was carried out within the framework of the Research work of Roshydromet AAAA-A20-120021490079-3. Analysis of work on the development of the physical (in particular, radiation) block of models was carried out with the support of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation, megagrant No. 075-15-2021-574 within the framework of the scientific and educational school of Moscow State University "The Future of the Planet and Global Environmental Changes".

СЕКЦИЯ 1. СПУТНИКОВОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ АТМОСФЕРЫ и ПОВЕРХНОСТИ

Председатель: д.ф.-м.н. **Успенский А.Б.** (Научно-исследовательский центр космической гидрометеорологии Планета, Москва, Россия)

Сопредседатели: д.ф.-м.н. **Нерушев А.Ф.** (НПО "Тайфун", Обнинск, Россия)

SESSION 1. SATELLITE SOUNDING of ATMOSPHERE and SURFACE

Chairman: Dr. **A.B. Uspensky** (Center for Space Hydrometeorology Planeta, Moscow, Russia)

Co-Chairmen: Dr. **A.F. Nerushev** (SPA Typhoon, Obninsk, Russia)

Устные доклады

Регрессионный алгоритм определения общего содержания озона по измерениям SEVIRI

Ю. В. Киселева (kiseleva@planet.iitp.ru), А. Н. Рублев

ФГБУ "НИЦ "Планета", Москва, Россия

Представлены результаты оценки общего содержания озона (ОСО) в поле зрения радиометра SEVIRI космического аппарата Meteosat-11 (т.с. 0° с.ш., в.д.). Определение ОСО проводилось по измерениям в ИК-каналах прибора (9.7, 10.8 и 12.0 мкм) с использованием регрессионного алгоритма. В качестве априорной информации привлекались данные Ozone Monitoring Instruments (OMI) КА Aura. Результаты валидации показали хорошее совпадение оценок SEVIRI и OMI. Основным преимуществом представленных методик является отсутствие необходимости точного задания профиля температуры и применимость в облачных условиях. Проведены результаты экспериментов по использованию гистограммного подхода к анализу измерений. Предполагается в дальнейшем использовать подобный подход к измерениям отечественного многозонального сканирующего устройства МСУ-ГС, устанавливаемого на спутники серии Электро-Л.

Regression algorithm for determining total ozone column from SEVIRI measurements

Yu.V.Kiseleva (kiseleva@planet.iitp.ru), A.N. Rublev

Planeta State Research Center on Space Hydrometeorology, Moscow, Russia

The results are presented of estimation of the total ozone column (TOZ) from SEVIRI Meteosat-11. The TOZ was determined from measurements in the IR channels (9.7, 10.8, and 12.0 μm) using a regression algorithm. Data from the Ozone Monitoring Instrument (OMI)/Aura were used as a priori information for training and control regression. The validations data show a good agreement between the SEVIRI and OMI products. The main advantage of the presented methods is the no need for an accurate vertical temperature profile and applicability in cloudy conditions. The report presents the results of an experiment using histogram analysis of measurement data. In the future, it is planned to adjust this approach to the MSU-GS data onboard Elektro-L series satellites.

Исследование динамики концентрации метана по данным спектрометра TROPOMI над Азиатской частью России

Стародубцев В.С. (starodubjr@ikfia.ysn.ru), Васильева С.А.
Институт космических исследований и аэронавтики им. Ю.Г. Шафера СО РАН, Якутск, Россия

В работе была выбрана Азиатская часть России (52°-85° с.ш. 60°-170° в.д.) для исследования пространственно-временных вариаций распределения атмосферного метана по данным спектрометра TROPOMI за период 2018–2022 гг. (май-сентябрь). Исследуемая территория включает в себя Западную Сибирь, Восточную Сибирь и Дальний Восток. Для анализа качества данных построена карта плотности покрытия снимками TROPOMI исследуемой территории и карта распределения усреднённых значений концентрации метана. Рассматриваемая территория была разделена на северную (66°-85° с.ш.) и южную зоны (52°-66° с.ш.). По результатам проведенного анализа за исследуемый период 2018-2022 гг. выявлена тенденция к росту концентрации метана по данным TROPOMI. Показано, что уровень концентрации метана над северной зоной выше, чем над южной. Были проведены исследования динамики концентрации метана над гарями, а также над участками, не подвергшимся воздействию лесных пожаров. Показано, что над гарями концентрация метана выше, чем над негоревшими участками.

The dynamics of methane concentration over Asian part of Russia using TROPOMI data

V.S. Starodubcev (starodubjr@ikfia.ysn.ru), S.A Vasilieva
Shafer Institute of Cosmophysical Research and Aeronomy SB RAS, Yakutsk, Russia

In this work, the Asian part of Russia (52°-85° N 60°-170° E) was chosen to study the spatial and temporal variations in the distribution of atmospheric methane according to the TROPOMI spectrometer data for the period 2018–2022. (May-September). The study area includes Western Siberia, Eastern Siberia and the Far East. To analyze the quality of data, a density map of coverage by TROPOMI scans of the study area and a map of the distribution of average values of methane concentration were build. The study territory was divided into northern (66°-85° N) and southern zones (52°-66° N). According to the results of the analysis for the study period 2018-2022. a trend towards an increase in methane concentration was revealed according to TROPOMI data. It is shown that the level of methane concentration over the northern zone is higher than over the southern one. Studies were carried out on the dynamics of methane concentration over burnt areas, as well as over areas that were not affected by forest fires. It is shown that the concentration of methane over burnt areas is higher than over unburned areas.

Детектирование облачного покрова с использованием нейронной сети по данным прибора МСУ-ГС космического аппарата Арктика-М № 1

Блощинский В. Д. (v.bloshchinsky@dvrspod.ru), Крамарева Л.С., Шамилова Ю.А.
Дальневосточный Центр ФГБУ «Научно-исследовательский центр космической гидрометеорологии «Планета», Хабаровск, Россия

На сегодняшний день уровень оптической и радиолокационной аппаратуры, устанавливаемой на современные космические аппараты, позволяет проводить круглосуточные наблюдения и мониторинг различных объектов и явлений. В спутниковой метеорологии детектирование облачных образований является одной из важнейших задач, решение которой направлено на исследования окружающей среды и отдельных природных процессов. В настоящее время в области дистанционного зондирования

Земли для классификации типов объектов на изображении все большее распространение получают методы текстурного анализа данных (совокупности пикселей), использующие нейронные сети. Использование текстур повышает точность работы классификаторов по сравнению с методами попиксельного анализа, поскольку текстура несет в себе информацию о взаимном расположении пикселей. В данной работе рассматривается алгоритм на основе сверточных нейронных сетей для детектирования облачного покрова на спутниковых изображениях прибора МСУ-ГС, установленного на космическом аппарате (КА) Арктика-М №1. В основе архитектуры искусственной нейронной сети (ИНС) лежит классическая структура U-Net с модификациями входного слоя и количества сверточных фильтров. Дополнительно в архитектуру включены слои нормализации между слоями свертки, а также добавлен блок внимания в ветках объединения частей кодирования и декодирования. Идея применения именно такой ИНС состоит в проведении процедуры сегментации входного изображения, когда на выходе нейронной сети формируется изображение, в котором каждому пикселю присвоен определенный класс. Класс подстилающей поверхности, содержащий пиксели земли или воды, достаточно хорошо отделим от класса облачности по спектральным характеристикам имеющихся каналов прибора МСУ-ГС, особенно в областях, освещенных Солнцем. Основная проблема при детектировании облачных образований по данным КА Арктика-М №1 состоит в том, что на рассматриваемом приборе отсутствует канал с центральной длиной волны близкой к 1.6 мкм, который бы позволял с большой достоверностью отделить снег от облачности. В областях, освещенных Солнцем, данная проблема частично решается использованием синтеза каналов с центральными длинами волн 0.9, 3.8 и 10.7 мкм. Но в областях, находящихся выше 60 градусов с.ш. или не освещенных Солнцем, такой способ разделения не эффективен. В данном случае проблема решается использованием сверточной ИНС, которая позволяет проводить сегментацию с учетом текстурных признаков, присущих только классу подстилающей поверхности или облачности. Для обучения и проверки качества работы нейросетевого классификатора были подготовлены обучающий, валидационный и тестовый наборы данных, каждый из которых состоит из уникального набора текстур. Одна текстура имеет размерность 256x256x10 пикселей, где 256x256 – высота и ширина входного изображения, а 10 – количество используемых параметров, которое в данном случае состоит из 8-и каналов прибора МСУ-ГС (каналы с центральными длинами волн 0.6, 0.7, 0.9, 3.8, 6.3, 8.0, 10.7 и 11.2 мкм), зенитного угла Солнца и зенитного угла наблюдения спутника. Классификация текстур проводилась вручную опытным специалистом дешифровщиком, который определял принадлежность пикселя текстуры к одному из классов: подстилающая поверхность или облачность. Для оценки качества работы обученной ИНС на тестовой выборке была рассчитана точность классификации, которая составила 88.9%. Отдельно для территорий, которые освещены Солнцем, точность составила 96.7%, а для территорий, неосвещенных Солнцем – 84.5%.

Cloud cover detection using a neural network based on the MSU-GS instrument data of the Arktika-M No. 1 satellite

V.D. Bloshchinskiy (v.bloshchinsky@dvrpcod.ru), L.S. Kramareva, Yu.A. Shamilova
Far-Eastern Center of State Research Center for Space Hydrometeorology «Planeta», Khabarovsk, Russia

At present, the level of optical and radar equipment installed on modern satellites allows for round-the-clock observations and monitoring of various objects and phenomena. In satellite meteorology, detection of the cloud formations is one of the most important tasks, the solution of which is aimed at studying the environment and individual natural processes.

Currently, in the field of remote sensing of the Earth, methods of textural data analysis (pixel combination) using neural networks are becoming increasingly common for classifying the types of objects in an image. The use of textures increases the accuracy of classifiers in comparison with pixel-by-pixel analysis methods, since the texture carries information about the relative location of pixels. In this study, we consider an algorithm based on convolutional neural networks for detecting cloud cover on satellite images of the MSU-GS instrument installed on the Arktika-M No. 1 satellite. The architecture of the artificial neural network (ANN) is based on the classical U-Net structure with modifications of the input layer and the number of convolutional filters. Additionally, normalization layers between convolution layers are included in the architecture, and an attention block is added in the branches of skip connections between encoder and decoder parts. The idea of using this ANN is to carry out the segmentation procedure of the input image, when an image is formed at the output of the neural network, in which each pixel is assigned a certain class. The class of the underlying surface containing pixels of earth or water is quite well separated from the class of clouds by the spectral characteristics of the available channels of the MSU-GS instrument, especially in areas illuminated by the Sun. The main problem in detecting cloud formations according to the data of the Arktika-M No. 1 satellite is that there is no channel with a central wavelength close to 1.6 μm on the considered instrument, which would allow to separate snow from clouds with great reliability. In areas illuminated by the Sun, this problem is partially solved by using the synthesis of channels with central wavelengths of 0.9, 3.8 and 10.7 μm . But in areas above 60°N or not illuminated by the Sun, this method of separation is ineffective. In this case, the problem is solved by using convolutional ANN, which allows conduct segmentation taking into account textural features inherent only in the class of the underlying surface or clouds. To training and checking quality of the neural network classifier, training, validation and test datasets were prepared, each of which consists of a unique set of textures. One texture has a dimension of 256x256x10 pixels, where 256x256 is the height and width of the input image, and 10 is the number of used parameters, which in this case consists of 8 channels of the MSU-GS instrument (channels with central wavelengths 0.6, 0.7, 0.9, 3.8, 6.3, 8.0, 10.7 and 11.2 μm), the zenith angle of the Sun and the satellite observation zenith angle. Texture classification was carried out manually by an experienced decoder specialist, who determined the affiliation of a texture pixel to one of the classes: underlying surface or cloud cover. To assess the quality of the trained ANN, the classification accuracy was calculated on a test dataset, which was 88.9%. Separately, for territories that are illuminated by the Sun, the accuracy was 96.7%, and for territories that are not illuminated by the Sun – 84.5%.

Восстановление векторов ветра по данным инфракрасных каналов прибора MSU-GS космического аппарата Арктика-М №1

Блощинский В.Д. (v.bloshchinsky@dvrpod.ru), Крамарева Л.С., Кучма М.О., Фролова Е.А.
Дальневосточный Центр ФГБУ «Научно-исследовательский центр космической гидрометеорологии «Планета», Хабаровск, Россия

Недостаточность покрытия северных территорий РФ, Сибири и Дальнего Востока оперативными данными наземных наблюдений, а также радиолокационного и аэрологического зондирования приводит к необходимости получения недостающей информации по данным спутникового зондирования атмосферы. Данный факт подчеркивает необходимость разработки технологии построения векторов ветра по информации, полученной с космического аппарата (КА) Арктика-М №1. В работе представлен алгоритм определения скорости и направления ветра с помощью

вычисления векторов перемещения облаков-трассеров в канале с центральной длиной волны 10.7 мкм и полей водяного пара в канале с центральной длиной волны 6.3 мкм прибора МСУ-ГС, установленного на КА Арктика-М №1. Ядром предлагаемой технологии расчета векторов ветра является дифференциальный метод вычисления оптического потока – модифицированный метод Брокса с нормализацией ограничений на данные. Преимущество дифференциальных методик состоит в том, что они дают возможность получить векторное поле с высокой плотностью и достоверностью за счёт более точной обработки областей с вращательными траекториями движения. Данный метод сводится к задаче минимизации функционала энергии изображения с помощью численного решения соответствующих уравнений Эйлера-Лагранжа методом Якоби, а его реализация на программно-аппаратной архитектуре CUDA позволит в десятки раз увеличить скорость обработки изображений по сравнению с процессорными вычислениями. Алгоритм вычисления векторов ветра состоит из нескольких этапов. Вначале извлекаются данные в виде яркостных температур двух смежных по времени съемки изображений для двух инфракрасных каналов прибора МСУ-ГС КА Арктика-М №1, а также рассчитываются маска облачности, высоты верхней границы облачности для канала 10.7 мкм и полей водяного пара для канала 6.3 мкм. Далее с помощью оптического потока производится расчет смещений каждого пикселя отдельно по двум инфракрасным каналам, и по географическим координатам производится пересчет U и V компонент смещения пикселей в значения скорости и направления векторов ветра. Следующим шагом каждому рассчитанному вектору присваивается значение уровня давления, соответствующее давлению на верхней границе облачности или поля водяного пара. Далее применяется ряд тестов для исключения векторов, рассчитанных вне облачности, в областях с достаточно низким градиентом яркостных температур и малым смещением. Дополнительно с помощью алгоритма кластеризации DBSCAN исключаются ошибки, связанные с несогласованностью смежных в пространстве векторов, и рассчитывается показатель качества QI , по которому на разных высотах отфильтровываются вектора, не подошедшие по установленным критериям. В качестве основной метрики измерения точности работы алгоритма выбрано среднее квадратичное модуля векторной разности компонент U и V вектора ветра (RMSVD). Сравнение восстановленных данных о векторах ветра с данными фактического радиозондирования атмосферы показало следующие результаты: RMSVD для канала с центральной длиной волны 10.7 мкм составило 4.9 м/с, а для канала 6.3 мкм - 4.3 м/с. Дополнительно проводилось сравнение с данными прогностической модели GFS NCEP, которое показало следующие результаты: RMSVD для канала 10.7 мкм составило 5.0 м/с, а для канала 6.3 мкм - 4.2 м/с. Полученные результаты показывают удовлетворительную корреляцию сравниваемых данных, погрешность оценок которых по показателю RMSVD соответствует требованиям к измерениям, сформулированным рабочими группами Всемирной метеорологической организации.

Wind vectors retrieving according to the infrared channels of the MSU-GS instrument of the Arktika-M No. 1 satellite

V.D. Bloshchinskiy (v.bloshchinsky@dvrpcod.ru), L.S. Kramareva, M.O. Kuchma, E.A. Frolova
Far-Eastern Center of State Research Center for Space Hydrometeorology «Planeta», Khabarovsk, Russia

Insufficient coverage of the northern territories of Russian Federation, Siberia and Far East with operational ground-based observation data, as well as radar and aerological sensing, leads to the need to obtain missing information from satellite atmospheric sensing data. This

fact underlines the need to develop a technology for retrieving wind vectors based on information received from the Arktika-M No. 1 satellite. This study presents an algorithm for determining wind speed and direction by calculating the movement vectors of tracer clouds in a channel with a central wavelength of 10.7 μm and water vapor fields in a channel with a central wavelength of 6.3 μm of the MSU-GS device installed on the Arktika-M No. 1 satellite. The core of the proposed technology for calculating wind vectors is a differential method for calculating the optical flow – a modified Brox method with normalization of data constraints. The advantage of differential techniques is that they make it possible to obtain a vector field with high density and reliability due to more accurate processing of areas with rotational trajectories of motion. This method is reduced to the task of minimizing the image energy functional by numerically solving the corresponding Euler-Lagrange equations by the Jacobi method, and its implementation on the CUDA hardware architecture will decrease the image processing computation time tenfold compared to CPU computing. The algorithm for calculating wind vectors consists of several stages. First, data is extracted in the form of brightness temperatures of two images adjacent in time for two infrared channels of the MSU-GS instrument of the Arktika-M No. 1 satellite, and also the cloud mask, the top cloud height for the channel 10.7 μm and top water vapor fields heights for the channel 6.3 μm are calculated. Then, using the optical flow, the movement of each pixel are calculated separately using two infrared channels, and the U and V components of the pixel movement are recalculated according to geographical coordinates into the values of the speed and direction of the wind vectors. The next step is to assign to each calculated vector a pressure level value corresponding to the top cloud pressure or the top water vapor field pressure. Next, a number of tests are applied to exclude vectors calculated outside of clouds, in areas with a sufficiently low gradient of brightness temperatures and a small offset. Additionally, using the DBSCAN clustering algorithm, errors associated with the inconsistency of adjacent vectors in space are eliminated, and the quality indicator QI is calculated, according to which vectors that do not fit the established criteria are filtered out at different heights. The root mean of the vector difference modulus of the U and V wind vector components (RMSVD) is chosen as the main metric for measuring the accuracy of the algorithm. Comparison of the retrieved data of wind vectors with the data of actual atmospheric radiosounding showed the following results: RMSVD for a channel with a central wavelength of 10.7 μm was 4.9 m/s, and for a channel of 6.3 μm - 4.3 m/s. Additionally, a comparison was made with the data of the weather forecast model GFS NCEP, which showed the following results: RMSVD for the channel 10.7 μm was 5.0 m/s, and for the channel 6.3 μm - 4.2 m/s. Obtained results show a satisfactory correlation of the compared data, the estimation error of which according to the RMSVD indicator meets the measurement requirements formulated by the working groups of the World Meteorological Organization.

Применение данных спутникового СВЧ радиометра МТВЗА-ГЯ при решении прикладных задач ДЗЗ

Ермаков Д.М.^{1,2}(pldime@gmail.com), Кузьмин А.В.¹, Митник Л.М.³, Кулешов В.П.³, Митник М.Л.³, Пашинов Е.В.¹, Садовский И.Н.¹, Сазонов Д.С.¹, Стерлядкин В.В.^{1,4}, Черный И.В.⁵, Стрельцов А.М.⁵

¹ Институт космических исследований РАН, Москва, Россия

² Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Фрязинский филиал, Фрязино, Московская область, Россия

³ Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН, Владивосток, Россия

⁴ МИРЭА — Российский технологический университет, Москва, Россия

⁵ АО «Российские космические системы», Москва, Россия

Спутниковый радиотепловой мониторинг — одна из важнейших составляющих космических программ дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). СВЧ радиометры МТВЗА-ГЯ (модуль температурно-влажностного зондирования атмосферы) на Российских метеорологических спутниках серии “Метеор-М” по ряду показателей не уступают зарубежным аналогам. Возможность практического применения измерений МТВЗА-ГЯ определяется, однако, не только характеристиками сенсора, но и доступностью первичных данных зондирования и детальностью их технического описания. В этом отношении потенциальные возможности МТВЗА-ГЯ реализованы частично, а обеспечение пользователей спутниковой информацией существенно уступает свободному доступу к данным и продуктам, получаемых из измерений радиометров AMSR2, GMI, ATMS.

В работе представлены результаты анализа возможности получения количественной информации о параметрах атмосферы и подстилающей поверхности по данным СВЧ радиометра МТВЗА-ГЯ со спутников серии “Метеор-М”. Анализ основан на результатах численного моделирования переноса СВЧ-излучения в системе атмосфера-поверхность в диапазоне частот 5-200 ГГц, обобщении глобальных экспериментальных данных за 2015-2018 и 2019-2022 годы, полученных со спутников “Метеор-М” № 2 и № 2-2, соответственно, и на сопоставлении временных рядов яркостных температур МТВЗА-ГЯ и AMSR2, построенных на совпадающих и/или близких частотах.

Приведены примеры использования данных МТВЗА-ГЯ в оперативной метеорологии, океанологии и гидрологии при изучении тайфунов, бомбовых циклонов, атмосферных рек, наводнений и других явлений, а также при решении научных задач, связанных с образованием и эволюцией экстремальных погодных явлений в тропосфере и стратосфере (волн жары, холодных вторжений, внезапных стратосферных потеплений и др.), мониторингом динамической структуры глобальной циркуляции влаги и тепла и климатическими изменениями в Арктике.

Для оценки погрешности восстановления таких параметров, как скорость приводного ветра, интегральное влагосодержание атмосферы, водозапас облаков, температура поверхности океана, температура поверхности суши и др., по измеренным яркостным температурам необходимо продолжить исследования по усовершенствованию алгоритмов решения обратных задач и по формированию базы спутниковых СВЧ-радиометрических и сопутствующих измерений для различных климатических зон.

Работа выполнена в рамках тем гос. задания ИКИ РАН «Мониторинг» (гос. рег. № 01.20.0.2.00164) в части задач геопривязки и восстановления геофизических параметров атмосферы, ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН (гос. рег. № 0030-2019-0008) в части анализа и реконструкции атмосферной динамики и ТОИ им. В.И. Ильичева ДВО РАН «Технологии дистанционного зондирования Земли и наземных измерительных систем в комплексных исследованиях динамических явлений в океане и атмосфере» (гос. рег. № 121021500054-3) в части комплексного анализа атмосферных процессов и сопоставления с данными приборов-аналогов.

Application of the MTWZA-GYa satellite microwave radiometer data in solving applied remote sensing tasks

D.M. Ermakov^{1,2} (pldime@gmail.com), A.V. Kuzmin¹, L.M. Mitnik³, V.P. Kuleshov³, M.L. Mitnik³, E.V. Pashinov¹, I.N. Sadovsky¹, D.S. Sazonov¹, V.V. Sterlyadkin^{1,4}, I.V. Cherny⁵, A.M. Streltsov⁵

¹ Space Research Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

² V.A. Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics, Russian Academy of Sciences, Fryazino Branch, Moscow Region, Russia

³ V.I. Ilyichev Pacific Oceanological Institute, Far Eastern Branch, Russian Academy of Sciences, Vladivostok, Russia

Satellite radio-thermal monitoring is one of the most important components of Earth remote sensing (ERS) space programs. Microwave radiometers MTVZA-GYa (atmospheric temperature and humidity sensing module) on Russian meteorological satellites of "Meteor-M" series are not inferior to foreign analogues in a number of characteristics. The possibility of practical application of MTVZA-GYa measurements is, however, determined not only by the characteristics of the sensor, but also by the availability of primary sounding data and the detail of their technical description. In this respect, the potential capabilities of MTVZA are only partially realized, and providing users with satellite information is significantly inferior to free access to primary data and products obtained from measurements of AMSR2, GMI, ATMS radiometers.

This paper presents the results of analysis of the possibility of obtaining quantitative information about the atmosphere and underlying surface parameters from data of microwave radiometer MTVZA-GYa from satellites of "Meteor-M" series. The analysis is based on results of numerical modeling of microwave radiation transport in the atmosphere-surface system in the frequency range 5-200 GHz, generalization of global experimental data for 2015-2018 and 2019-2022 obtained from Meteor-M satellites No. 2 and No. 2-2, respectively, and comparison of time series of brightness temperatures of MTVZA-GYa and AMSR2 built at coincident and/or close frequencies.

Examples are given of the use of MTVZA-GYa data in operational meteorology, oceanology and hydrology in studying typhoons, bomb cyclones, atmospheric rivers, floods and other phenomena, as well as in solving scientific problems associated with the formation and evolution of extreme weather phenomena in the troposphere and stratosphere (heat waves, cold intrusions, sudden stratospheric warming and others).), monitoring the dynamic structure of global moisture and heat circulation and climatic changes in the Arctic.

In order to estimate the error of reconstruction by measured brightness temperatures of such parameters as driving wind speed, integral atmospheric moisture content, cloud water content, ocean surface temperature, land surface temperature, etc., it is necessary to continue research on improvement of algorithms for inverse problem solution and on formation of a database of satellite microwave radiometric and related measurements for different climatic zones.

The work was done within the framework of the state contracts of IKI RAS "Monitoring" (state registration number 01.20.0.2.00164) regarding the tasks of georeferencing and restoration of geophysical parameters of the atmosphere, IRE RAS (state registration number 0030-2019-0008) regarding the analysis and reconstruction of atmospheric dynamics and POI FEB RAS "Remote sensing and ground-based measuring systems technologies in complex studies of dynamic phenomena in ocean and atmosphere" (state registration number 121021500054-3) regarding complex analysis of atmospheric processes and comparison with data from analogue instruments.

Валидация методики определения общего содержания ХСО₂ над территорией России по данным космического аппарата Метеор-М № 2

Голомолзин В.В.¹ (vvg@rcpod.ru), Рублев А.Н.², Киселева Ю.В.², Косторная А.А.¹

¹ СЦ ФГБУ "НИЦ "Планета", Новосибирск, Россия

² ФГБУ "НИЦ "Планета", Москва, Россия

В НИЦ «Планета» разработана методика [1] определения общего содержания углекислого газа (ХСО₂), т.е. объемной концентрации (мольной доли) углекислого газа в сухом атмосферном воздухе, по данным инфракрасного фурье-спектрометра ИКФС-2. Этот спектрометр устанавливается на борту российских метеорологических космических

аппаратах (КА) серии "Метеор-М". Методика основана на оценке XCO₂ с помощью регрессии второго порядка. Предикторами являются оптические толщины атмосферы в выбранных спектральных каналах в инфракрасном диапазоне 8–14 мкм. Оптические толщины определяются по измеренным ИКФС-2 интенсивностям уходящего излучения и расчетным интенсивностям излучения земной поверхности или верхней границы облаков для яркостной температуры в спектральном канале ИКФС-2 с волновым числом 900,1 см⁻¹. Эталонными значениями XCO₂ для построения регрессии служили результаты контактных измерений CO₂ на мачте международной обсерватории ZOTTO (Центральная Сибирь) и в обсерватории NOAA на вулкане Мауна-Лоа (Гавайи) в 2015–2016 гг. Важной особенностью методики является ее работоспособность в условиях облачности.

В 2021-2022 годах определение XCO₂ проводилась по измерениям ИКФС-2 КА Метеор-М № 2. Высокая стабильность радиометрических характеристик прибора [2] позволила использовать вид и значения коэффициентов регрессии, полученной по результатам измерений семилетней давности, без каких-либо изменений. Для территории России, ограниченной координатами 40 – 70 град. с.ш., 30 – 120 град. в.д., рассчитаны годовые тренды среднего по территории XCO₂, а также по отдельным широтным и долготным зонам. Отметим, что характер и амплитуды изменения XCO₂ над Россией в течение года, широтная зависимость и особенности сезонных изменений в целом соответствуют опубликованным (например, [3]) теоретическим и экспериментальным данным.

Для валидации методики проводилось сравнение XCO₂, полученного по измерениям ИКФС-2 на КА Метеор-М № 2, с параллельными измерениями над Сибирью по приборам IASI на спутнике MetOp, CrIS на NOAA-20, OCO-2 спутника Orbiting Carbon Observatory 2 (OCO) и TANSO-FTS спутника GOSAT. Кроме того, было выполнено сопоставление наших оценок XCO₂ с данными наземных измерений. Помимо упомянутых обсерваторий ZOTTO и Мауна-Лоа, использовались данные отдельных обсерваторий в Германии, Канаде, Японии и на Аляске. Выявленные взаимные несоответствия различных методов обсуждаются в работе.

Проведенная валидация методики показала применимость использования ИКФС-2 для анализа глобального распределения и временных трендов общего содержания углекислого газа.

1. Голомолзин В., Рублев А., Киселева Ю., Козлов Д., Прокушкин А., Панов А. Определение общего содержания диоксида углерода над территорией России по данным отечественного космического аппарата «Метеор-М» №2. - Метеорология и гидрология, 2022, № 4, с. 79-95
2. Козлов Д., Козлов И., Успенский А., Рублев А., Тимофеев Ю., Поляков А., Колесников М. Оценка ковариационной матрицы шума в измерениях бортового инфракрасного фурье-спектрометра ИКФС-2. - Исследование Земли из космоса, 2022, №1. с.53-67
3. Аршинов, М., Белан Б., Давыдов Д., Креков Г., Фофонов А., Бабченко С., Иноуз Г., Мачида Т., Максюттов Ш., Сасакава М., Шимойяма К. Динамика вертикального распределения парниковых газов в атмосфере. - Оптика атмосферы и океана, 2012, №12, с. 1051 - 1061

Carbon dioxide retrieval from Meteor-M No. 2 satellite in 2022 and validation with measurements from space and ground-based observation network

V. V. Golomolzin¹(vvg@rcpod.ru), A.N. Rublev², Yu.V. Kiseleva², A.A. Kostornaya¹

¹ SC Planeta State Research Center on Space Hydrometeorology, Novosibirsk, Russia

² Planeta State Research Center on Space Hydrometeorology, Moscow, Russia

The retrieval of atmospheric column-averaged dry-air mole fractions of carbon dioxide (XCO₂) from the data of IKFS-2 infrared Fourier spectrometer on board the Meteor-M Russian meteorological satellites was carried out over several years at the Research Center "Planeta".

The recovery method is based on estimating XCO₂ using second order regression. The predictors are the optical thicknesses of the atmosphere in the selected spectral channels in the infrared range of 8–14 μm. The optical depths are determined from the measured IKFS-2 outgoing radiation intensities and the calculated radiation intensities of the earth's surface or the upper cloud boundary for the brightness temperature obtained from IKFS-2 measurements in the spectral channel with a wavenumber of 900.1 cm⁻¹. The reference XCO₂ values for constructing the regression were the results of contact measurements of CO₂ at the mast of the international observatory ZOTTO (Central Siberia) and at the NOAA observatory on the Mauna Loa volcano (Hawaii) in 2015–2016. The obtained regression coefficients did not change during the entire observation period. An important feature of the method is its practical independence from the presence of clouds.

In 2021-2022, XCO₂ retrieval was carried out over the territory of Russia, limited by coordinates 40 - 70 N and 30 - 120 E. The annual trends of the average XCO₂ value for the observed territory and for individual latitudinal and longitude zones of the observed territory were plotted. The results obtained, such as the nature and amplitude of XCO₂, changes during the year, the latitudinal dependence and the features of seasonal changes, generally correspond to the previously obtained theoretical and experimental data.

The methodology was validated by comparing the XCO₂ retrieved from Meteor-M No. 2 IKFS-2 with parallel measurements over Siberia by the using IASI instruments on the MetOp satellite, CrIS on the NOAA-20 satellite, OCO-2 on the Orbiting Carbon Observatory (OCO) satellite and TANSO-FTS of GOSAT satellite. In addition to the ZOTTO and Mauna Loa observatories, some observatories in Germany, Canada, Japan, and Alaska were selected for validation using ground network data. As a result, the applicability of using IRFS-2 to analyze the global distribution of XCO₂ and time trends is shown. The differences in retrieval of XCO₂ by various methods are discussed in the work.

Сезонная, синоптическая и суточная изменчивость температуры поверхности Восточной Антарктиды по данным пассивного микроволнового зондирования из космоса

Митник Л.М. (lm_mitnik@mail.ru), Кулешов В.П., Митник М.Л., Баранюк А.В.

Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН, Владивосток, Россия

Потепление климата регистрируется в Южном океане, на Антарктическом полуострове и в прибрежной зоне континента. Индикатором изменений служит температура воды, атмосферы и земной поверхности. Измерения температуры атмосферы выполняются радиозондовыми станциями на побережье (дважды в сутки) и на франко-итальянской научной станции Concordia на высоте 3230 м (один раз в сутки), а также ежечасно на сети автоматических станций погоды (AWS), расположенных на побережье и на континенте. Наблюдения в инфракрасном диапазоне со спутников Terra, Aqua, SNPP, NOAA-20 и других используются для картирования поля температуры поверхности T_п (в безоблачных условиях) и температуры верхней границы облаков. Результаты моделирования переноса микроволнового излучения в системе атмосфера - фирн и данные измерений яркостных температур T_я со спутников GCOM-W1, Meteor-M № 2 и № 2-2 над Южным океаном и Антарктидой показали высокую чувствительность T_я к вариациям характеристик атмосферы и подстилающей поверхности. Основное внимание в работе уделено анализу данных зондирования на частотах в диапазонах 89-92 и 176-190 ГГц, полученных над холодными и сухими областями Восточной Антарктиды с круглогодичной отрицательной температурой поверхности и паросодержанием атмосферы V меньше 1,5 кг/м². Из анализа временных рядов среднесуточных значений T_я

на этих частотах по измерениям радиометров МТВЗА-ГЯ и AMSR2 в 2014-2017 и 2019-2022 годах над тестовой областью у станции Concordia и температуры воздуха T_o по данным AWS следует, что спутниковые и наземные измерения хорошо согласуются друг с другом при рассмотрении синоптических и сезонных процессов. Выполнены оценки погрешности восстановления T_o по спутниковым микроволновым данным, вызванные изменчивостью V . Также хорошо согласуются поля T_α на частоте 91,6 ГГц на вертикальной поляризации по данным радиометра МТВЗА-ГЯ и T_p , найденные по спутниковым ИК-измерениям при отсутствии облаков. Высокая корреляция T_α и T_p обусловлена малой глубиной проникновения в фирн электромагнитного излучения с длиной волны примерно 3 мм, быстрой подстройкой температуры скин-слоя к изменениям температуры T_o и малым, но учитываемым влиянием излучения атмосферы. При облачности поля T_p определяются по микроволновым радиометрическим измерениям. Исследование внутрисуточных изменений температуры поверхности выполнялось по данным T_α , полученным сканирующим радиометром МТВЗА-ГЯ в режимах широкой (2500 км) и узкой (1500 км) полосы обзора, что обеспечивало временное разрешение 1,5- 3 часа на широте станции Concordia (75 ° ю.ш.). Рассмотрены временные ряды T_α и T_o в периоды равноденствия и солнцестояния.

Работа выполнена в рамках темы гос. задания ТОИ ДВО РАН «Технологии дистанционного зондирования Земли и наземных измерительных систем в комплексных исследованиях динамических явлений в океане и атмосфере» (гос. рег. № 121021500054-3).

Seasonal, synoptic and daily surface temperature variability in East Antarctica from passive microwave sensing data from space

L.M. Mitnik (lm_mitnik@mail.ru), V.P. Kuleshov, M.L. Mitnik, A.V. Baranyuk
V.I. Ilyichev Pacific Oceanological Institute, Far Eastern Branch of RAS, Vladivostok, Russia

Climate warming is registered in the Southern Ocean, on the Antarctic Peninsula and in the continental coastal zone. Indicators of change are water, atmospheric, and land surface temperatures. Measurements of atmospheric temperature are carried out by radiosonde stations on the coast (twice a day) and at the Franco-Italian scientific station Concordia at an altitude of 3230 m (once a day), as well as hourly on a network of automatic weather stations (AWS) located on the coast and on the continent. Infrared observations from Terra, Aqua, SNPP, NOAA-20, and other satellites are used to map the surface temperature field T_s (in cloudless conditions) and cloud top temperature. The results of modeling of microwave radiative transfer in the atmosphere-firn system and brightness temperature T_b measurements from satellites GCOM-W1, Meteor-M No. 2 and No. 2-2 over the Southern Ocean and Antarctica have shown high sensitivity to variations in the atmosphere and underlying surface characteristics. The main attention in this work is given to the analysis of sensing data at frequencies in the 89-92 and 176-190 GHz bands obtained over the cold and dry regions of East Antarctica with year-round negative surface temperatures and atmospheric water vapor content V less than 1.5 kg/m². From the analysis of the time series of mean daily values of T_b at these frequencies according to the measurements of radiometers MTVZA-GY and AMSR2 in 2014-2017 and 2019-2022 over the test region near Concordia station and air temperature T_o according to AWS data, it follows that satellite and ground measurements agree well with each other when considering synoptic and seasonal processes. Estimates were made of the error of T_o reconstruction from satellite microwave data caused by V variability. The fields T_b at 91.6 GHz in vertical polarization according to the MTVZA-GY radiometer and T_s found from satellite infrared measurements in the absence of clouds also agree well. The high correlation between T_b and T_s is due to the shallow depth of penetration into the firn of electromagnetic radiation

with a wavelength of about 3 mm, rapid adjustment of the skin-layer temperature to the temperature changes of T_o and the small but accounted for influence of atmospheric radiation. When cloudy, the fields T_s are determined by microwave radiometric measurements. The study of intraday surface temperature changes was performed using T_b data obtained by the scanning radiometer MTVZA-GY in the modes of wide (2500 km) and narrow (1500 km) swath, which provided a temporal resolution of 1.5-3 hours at the latitude of Concordia station (75°S). The time series of T_b and T_o at the equinoxes and solstices were considered.

The work was carried out within the framework of the state task of the POI FEB RAS "Technologies of remote sensing of the Earth and ground-based measuring systems in complex studies of dynamic phenomena in the ocean and the atmosphere" (state registration number 121021500054-3).

Использование спутниковых данных разных спектральных диапазонов для оценки водообеспеченности территорий, находящихся в различных природных зонах

Музылев Е.Л.¹ (muzylev@iwr.ru), Старцева З.П.¹, Волкова Е.В.², Василенко Е.В.²

¹Институт водных проблем РАН, Москва, Россия

²Европейский центр "НИЦ "Планета", Москва, Россия.

Цель работы заключалась в усовершенствовании способов использования оценок характеристик подстилающей поверхности и метеорологических характеристик по спутниковым данным разных спектральных диапазонов при моделировании влагозапасов почвы W , суммарного испарения ET и других элементов водного и теплового режимов (ВТР) территорий сельскохозяйственных регионов, отличающихся степенью увлажнения, для сезона вегетации (величины W и ET рассматриваются как основные показатели водообеспеченности этих территорий). Расчеты элементов ВТР производились с помощью физико-математической модели влаго- и теплообмена подстилающей поверхности (ПП) с атмосферой LSM (Land Surface Model), пригодной для использования оценок характеристик ПП и метеорологических характеристик, построенных по данным измерений радиометров AVHRR/NOAA, SEVIRI/Meteosat-10, -11, -8 и МСУ-МР/Метеор-М №№ 2 и 2.2 в видимом и ИК диапазонах. К этим характеристикам относятся вегетационный индекс NDVI, излучательная способность ПП E , проективное покрытие растительностью B , листовой индекс LAI, температуры поверхности почвы и растительного покрова, эффективная ТПП и осадки.

Исследования проводились для территорий семи лесостепных областей Центрально-Черноземного региона России (Орловской, Курской, Белгородской, Липецкой, Воронежской, Тамбовской и Брянской) площадью 227300 км² и степных Саратовской, Волгоградской и Ростовской областей и Ставропольского края площадью, соответственно, 101200, 112900, 101000 и 66160 км² для сезонов вегетации 2019-2021 гг.

Разработанные и усовершенствованные технологии построения перечисленных спутниковых оценок были адаптированы к территориям исследуемых регионов с проверкой достоверности этих оценок. Исследованы возможности использования при расчетах B и LAI для различных видов растительности разных эмпирических зависимостей от NDVI. Подобраны значения B и LAI, сравнивавшиеся для засушливых регионов с полученными раньше для других территорий. Оценки осадков производились при использовании разработанной ранее методики детектирования облачности, выявления зон осадков и определения их интенсивности с последующим переходом к расчету их суточных сумм. Вероятность совпадения результатов расчета осадков по данным всех сенсоров с фактическими значениями составила порядка 80 % для всех исследуемых регионов. Значения ТПП были получены с помощью вычислительного алгоритма, разработанного на основе упомянутой методики. Сопоставление спутниковых оценок ТПП

с результатами наземных измерений выявило их близость для большинства сроков наблюдений кроме случаев локального послеполуденного перегрева поверхности почвы в жаркие летние месяцы. Использование в LSM спутниковых оценок LAI, В, осадков и ТПП производилось при замене результатов наземных измерений этих величин на данные оценки на каждом временном шаге в каждом узле вычислительной сетки модели.

В работе также исследованы возможности использования при моделировании влагозапасов почвы W оценок влажности поверхности почвы (ВПП), полученных по данным измерений скаттерометра ASCAT/MetOp-A,-B,-C - всепогодного зондировщика ПП в микроволновом диапазоне. Сравнение полей ВПП, построенных по данным ASCAT и по результатам расчетов по модели, показало, что для исследуемых территорий различия спутниковых и модельных оценок данной величины в большинстве случаев находились в допустимых пределах. Сравнение построенных по результатам модельных расчетов полей влагозапасов W для рассматриваемых территорий также продемонстрировало, что использование данных ASCAT при таких расчетах повышает точность оценки величин W .

Результаты расчета W , ET и других элементов ВТР с использованием описанных спутниковых оценок, являющиеся основным модельным продуктом, представляются в виде распределений значений этих величин по площади исследуемых регионов за сезоны вегетации 2019-2021 гг. Погрешности результатов расчета составили 15-20 % для W и 20-25 % для ET, что соответствует стандартной величине ошибки их оценки.

Работа выполнена в рамках государственного задания темы № FMWZ-2022-0002 ИВП РАН Министерства науки и высшего образования РФ.

Utilizing satellite data of different spectral ranges to assess the water availability of territories located in diverse natural zones

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

¹Water Problem Institute of RAS, Moscow, Russia

²European Center "SRC "Planeta", Moscow, Russia

The aim of the study was to improve the methods to utilize estimates of the land surface (LS) and meteorological characteristics from satellite data of different spectral ranges when modeling soil water content W , evapotranspiration ET and other water and heat regime (WHR) elements of agricultural region territories that differ in the degree of moistening for the vegetation season. (The W and ET values are considered as the main indicators of the water availability of these territories). The WHS elements were calculated using the physical-mathematical model of water and heat exchange between the LS and the atmosphere, suitable for utilizing estimates of the LS and meteorological characteristics derived from the measurement data of AVHRR/NOAA, SEVIRI/Meteosat-10, -11, -8 and MSU-MR/Meteor-M No. 2 and 2.2 radiometers in the visible and IR ranges. These characteristics include vegetation index NDVI, LS emissivity E , vegetation cover fraction B , leaf area index LAI, soil surface and canopy temperatures, effective LS temperature (LST) and precipitation.

The study was carried out for the territories of seven forest-steppe provinces of the Central Black Earth region of Russia (Orel, Kursk, Belgorod, Lipetsk, Voronezh, Tambov and Bryansk) with total area of 227300 km² and for the steppe Saratov, Volgograd and Rostov provinces and Stavropol Territory with an area of 101200, 112900, 101000, and 66160 km², respectively, for the vegetation seasons of 2019-2021.

The developed and improved technologies to build the listed satellite estimates were adapted to the territories of the regions under study with the verification of the reliability of these estimates. The possibilities of using different empirical dependences on NDVI when calculating B and LAI for different vegetation types were studied. The values of B and LAI were

selected and these values for arid regions were compared with those obtained earlier for other territories. Precipitation estimates were produced using the previously developed method for detecting clouds, identifying precipitation zones, and determining their intensity, followed by the transition to calculating their daily sums. The probability of coincidence of the precipitation calculation results from all sensor data with the actual values was about 80% for each region under study. The LST values were obtained using a computational algorithm developed on the basis of the mentioned methodology. Comparison of satellite-derived estimates of the LST with the results of ground-based measurements revealed their closeness for most observation periods, except for cases of local afternoon overheating of the soil surface in the hot summer months. To utilize satellite-derived estimates of LAI, B, precipitation, and LST in the LSM the replacement of ground-measured quantities of these values by satellite estimates was carried out at each time step in all nodes of the model computational grid.

There was also explored the possibility of using soil surface moisture (SSM) estimates obtained from measurements of the ASCAT/MetOp-A,-B,-C scatterometer, an all-weather LS sounder in the microwave range, in modeling soil water content W. Comparison of the ASCAT-derived and modeled SSM fields showed that in most cases for territories of interest the differences between satellite-based and model estimates of this value were within acceptable limits. Comparison of the modeled soil water content W fields for the considered territories also demonstrated that the use of ASCAT data in such model calculations increases the accuracy of estimating the values of W.

The results of calculating W, ET and other WHR elements using the described satellite estimates are the main model product. They are presented in the form of the mentioned value distributions over the area regions under study for the vegetation seasons of 2019-2021. Discrepancies of the calculation results were 15–20% for W and 20–25% for ET, which corresponds to the standard value of their estimation error.

The study was carried out within the framework of the state assignment, topic No. FMWZ-2022-0002, IWP RAS, Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation.

Алгоритм восстановления высоты нижней границы облаков по спутниковым данным MODIS на основе самоорганизующихся нейронных сетей

Скороходов А.В.¹ (vazime@yandex.ru), Пустовалов К.Н.^{1,2},
Харюткина Е.В.², Астафуров В.Г.¹

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

²Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск, Россия

Высота нижней границы облаков (ВНГО) является одной из наиболее важных характеристик, изучаемых в климатологии и метеорологии. Сведения о данном параметре необходимы для обеспечения безопасности полетов воздушных судов, для оценки влияния облачности на радиационный перенос и транспорт атмосферного аэрозоля, а также в радиолокации. Традиционным подходом к определению ВНГО является использование наземных светолокационных или лазерных регистраторов, часть из которых объединена в международную сеть ASOS. Очевидным недостатком этих приборов является локальность выполняемых ими измерений, которая в совокупности с неравномерностью их распределения по планете делает невозможным выполнение оперативного мониторинга исследуемого параметра в глобальном масштабе (особенно в высоких широтах и над поверхностью океанов). Поэтому в настоящее время активно стали развиваться методы восстановления ВНГО на основе применения результатов дистанционного зондирования Земли из космоса.

Существующие спутниковые системы можно условно разделить на две группы по способу получения информации: активные и пассивные. Первые из них позволяют восстанавливать ВНГО напрямую на основе анализа испускаемых ими лазерных импульсов или радиосигналов. К ним, в частности, относится лидар CALIOP (спутник CALIPSO) и радар CPR (спутник CloudSat). Основным недостатком этих приборов является низкая периодичность съемки (16 суток) и малые размеры (1-3 км) их пятен сканирования. Пассивные датчики позволяют получать напрямую только информацию о верхней границе облаков. Такие же параметры облачности, как оптическая толщина или водозапас восстанавливаются косвенно на основе применения моделей переноса излучения. Пассивные системы менее точные по сравнению с активными датчиками, но главным их достоинством является высокая периодичность съемки.

Результаты многолетних синхронных наблюдений за облаками лидаром CALIOP, радаром CPR и спектрорадиометром MODIS (спутник Aqua) поспособствовали созданию методов восстановления ВНГО только на основе результатов пассивного зондирования. В настоящее время существует два основных подхода к решению указанной задачи. Основная идея первого из них заключается в непосредственном использовании эмпирических регрессионных моделей, построенных с помощью результатов сопоставления активных и пассивных наблюдений за облаками. Второй подход опирается на концепцию «донор-реципиент», согласно которой результаты восстановления ВНГО вдоль трассы лидара/радары, наложенной на синхронный снимок с оптического радиометра, экстраполируются на другие участки этого изображения. Основным недостатком обоих подходов является трудоемкость их адаптации к различным регионам наблюдения, сезонам года и условиям съемки. Решением данной проблемы является использование методов интеллектуального анализа данных, когда регрессионная модель строится автоматически на основе имеющихся обучающей и тестовой выборки.

Впервые методы искусственного интеллекта были применены для восстановления ВНГО в работах (Minnis et al. 2021; Tan et al., 2022). Однако представленные в них алгоритмы позволяют определять высоту основания облачности с оптической толщиной меньше 30. В докладе приводится описание оригинальной методики восстановления ВНГО на основе применения самоорганизующихся нейронных сетей. При этом рассматривается однослойная облачность во всем диапазоне допустимых значений оптической толщины. Восстановление ВНГО осуществляется в качестве частного случая решения задачи классификации. При этом классификационными признаками являются различные характеристики облаков из тематических продуктов пассивной спутниковой съемки. Классами выступают узкие интервалы высот (0,05 км) в диапазоне от 0 до 20 км. Обучение классификатора осуществляется на основе сопоставления результатов активных и пассивных измерений высоты основания облачности. Среднее смещение полученных разработанным алгоритмом оценок ВНГО относительно эталонных данных ASOS/CALIOP/CPR составляет $-0,2$ км при среднеквадратичном отклонении 1,2 км.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 21-71-10076, <https://rscf.ru/project/21-71-10076/>).

Algorithm of cloud-base height estimation from MODIS data based on self-organizing neural networks

A.V.Skorokhodov¹(vazime@yandex.ru), K.N. Pustovalov^{1,2}, E.V. Kharyutkina², V.G. Astafurov¹

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

²Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems SB RAS, Tomsk, Russia

The cloud-base height (CBH) is one of the most important parameters studied in climatology and meteorology. Information about this feature is needed to ensure the safety of aircraft flights, to estimate the effect of cloud cover on the radiation transfer and transport of atmospheric aerosol, as well as in radiolocation. The traditional approach to determining CBH is the use of ground-based optical drum or laser ceilometers, some of which are integrated into the international ASOS network. The obvious disadvantage of these devices is the local aspect of their measurements, which together with the irregularity of their distribution over the planet makes it impossible to perform operational monitoring of the studied feature on a global scale (especially at high latitudes and over the oceans). Therefore, CBH estimation methods based on the application of space remote sensing results have been actively developed at present.

Existing satellite instruments can be divided into two groups according to the way of obtaining information: active and passive. The first of them allow to reconstruct CBH directly on the basis of the analysis of laser pulses or radio waves emitted by them. In particular, these include CALIOP lidar (CALIPSO satellite) and CPR radar (CloudSat satellite). The main disadvantage of these instruments is the low periodicity (16 days) and the small size (1-3 km) of their footprints. Passive sensors allow to obtain information directly only about the tops of clouds. Such cloud parameters as optical thickness or waterpath are retrieved indirectly based on the application of radiative transfer models. Passive systems are lesser accurate than active instruments, but their main advantage is the high periodicity.

The results of long-term synchronous cloud observations by CALIOP lidar, CPR radar, and MODIS spectroradiometer (Aqua satellite) have contributed to the creation of methods for CBH estimation based on passive remote sensing data only. Currently, there are two main approaches to the solving of this problem. The main idea of the first one is the direct use of empirical regression models built by comparing active and passive cloud observations. The second approach relies on the "donor-recipient" concept, according to which the results of CBH estimation along a lidar/radar track superimposed on a synchronous image from an optical radiometer are extrapolated to other parts of this image. The main disadvantage of both approaches is the difficulty of adapting them to different observation regions, seasons, and remote sensing conditions. A problem solving is the use of intelligent data analysis methods, when a regression model is built automatically on the basis of the available training and test sets.

Artificial intelligence methods were first applied to CBH estimation in papers (Minnis et al. 2021; Tan et al., 2022). However, the algorithms presented in them allow us to determine the CBH for clouds with an optical thickness of less than 30. The report describes an original technique for CBH estimation based on the application of self-organizing neural networks. It considers single-layer clouds over the entire range of permissible values of optical thickness. The CBH estimation is performed as a particular case of the classification problem. The classification features are different parameters of clouds from passive satellite data products. The classes are narrow altitude intervals (0.05 km) in the range from 0 to 20 km. The classifier is trained on the basis of comparing the results of active and passive measurements of CBH. The average bias of the CBH estimation obtained by the developed algorithm with respect to the ASOS/CALIOP/CPR reference data is -0.2 km with a standard deviation of 1.2 km.

The work was supported by the Russian Science Foundation (grant No. 21-71-10076, <https://rscf.ru/project/21-71-10076/>).

Анализ временных и пространственных вариаций спектров уходящего теплового ИК излучения (прибор ИКФС-2)

Тимофеев Ю.М.¹ (y.timofeev@spbu.ru), Неробелов Г.М.^{1,2}, Козлов Д.А.³, Черкашин И.С.³

¹Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

² Научно-исследовательский центр РАН, Санкт-Петербург, Россия

экологической безопасности РАН

³АО ГНЦ "Центр Келдыша", Москва, Россия

Измеренные спектры уходящего теплового ИК излучения несут в себе информацию о многих параметрах физического состояния системы атмосфера-поверхность – температуру атмосферы и поверхности, газовый и аэрозольный состав и т.д. Но результаты решения обратных задач для получения указанных атмосферных параметров содержат в себе и использованную априорную информацию в том или ином виде.

Глобальные спектры теплового излучения Земли, измеренные с помощью спутников, являются компонентами радиационного баланса Земли. Анализ их пространственных и временных вариаций позволяет оперативно получать информацию о тенденциях изменений климата Земли. Это, в частности, обусловлено высокой радиометрической точностью и постоянной абсолютной калибровкой спектров современных ИК приборов.

Инфракрасный Фурье-спектрометр ИКФС-2 на российском спутнике «Метеор-М N2» измеряет уходящее излучение Земли уже 8 полных лет с 2015 по 2022 гг. и 5 месяцев в 2014 г. В докладе анализируются усредненные спектры по широтным зонам для разных месяцев и сезонов. Изучена информативность и число независимых параметров, содержащихся в данных прибора ИКФС-2, а также долговременные тренды уходящего излучения в различных спектральных областях.

Analysis of temporal and spatial variations of the spectra of outgoing thermal IR radiation (IKFS-2 instrument)

Yu.M. Timofeev¹ (y.timofeev@spbu.ru), G.M. Nerobelov^{1,2}, D.A. Kozlov³, I.S. Cherkashin³

¹Saint Petersburg State University, Saint Petersburg, Russia

² Scientific Research Centre for Ecological Safety of the RAS, Saint Petersburg, Russia

³State Scientific Center of the Russian Federation "Keldysh Research Center", Moscow, Russia

Measured spectra of outgoing thermal infrared (IR) radiation provide information on many parameters of the physical state of the atmosphere-surface system such as atmospheric and surface temperature, composition etc. However, in addition, the results of solving inverse problems to obtain atmospheric parameters contain the a priori information of different types.

The global spectra of thermal Earth radiation measured by satellites are components of the Earth radiation balance. An analysis of their spatial and temporal variations allows us to obtain quickly the trends of climate changes on the planet. This is, in particular, due to the high radiometric accuracy and continuous absolute calibration of the spectra of modern IR instruments.

The Infrared Fourier-spectrometer IKFS-2 on the Russian satellite "Meteor-M N2" has been measuring outgoing radiation 8 full years in a period 2015-2022 and during 5 months in 2014. In this report the measured spectra of thermal Earth radiation averaged over latitudinal zones for different months and seasons are analyzed. The informativeness and the number of independent parameters contained in the data measured by the IKFS-2, as well as long-term trends of outgoing Earth radiation in different spectral regions, have been studied.

Валидация оценок температуры поверхности океана по данным МСУМР российского космического аппарата Метеор-М №2-2

Фролова Е.А.¹ (katelinka@yandex.ru), Зайцев А.А.², Киселева Ю.В.¹

¹ ФГБУ «НИЦ «Планета», Москва, Россия

² АО «Российские космические системы», Москва, Россия

Представлены результаты валидации оценки температуры поверхности океана (ТПО) по измерениям многозонального сканирующего устройства малого разрешения (МСУМР), установленного на космическом аппарате (КА) Метеор-М № 2-2, и буйковыми измерениями. Алгоритм оценки ТПО, разработанный В. И. Соловьевым для МСУ-МР на КА Метеор-М №2, был адаптирован к измерениям в инфракрасных каналах МСУ-МР КА Метеор-М № 2-2, с учетом различий радиометрических характеристик каналов МСУ-МР обоих аппаратов по результатам интеркалибровки. Интеркалибровка проводилась путем сравнения измерения в аналогичных каналах радиометра SEVIRI в районе подспутниковой точки КА Meteosat-11.

Валидация оценок ТПО проводилась для усредненных значений в ячейках широтодолготной сетки размером 0,1° x 0,1°. Среднегодовые величины среднеквадратичных отклонений оценок ТПО не превышают 1,5 К. Получаемые в процессе мониторинга поля ТПО могут быть использованы для решения различных прикладных задач и ассимиляции в численных моделях прогноза погоды.

Validation of sea surface temperature estimates derived from MSUMR/Meteor-M 2-2 data

E.A. Frolova¹ (katelinka@yandex.ru), A.A. Zaicev², Yu.V. Kiseleva¹

¹FSBI «SRC «Planeta», Moscow, Russia

²“Russian space systems”, Moscow, Russia

The validation results are presented for the SST estimates derived from MSU-MR measurements on board Meteor-M 2-2 satellite. The SST derivation algorithm developed by V.I. Solovyov for MSU-MR/Meteor-M 2 was adjusted to the MSU-MR/Meteor-M 2-2 radiometric characteristic.

Validation of SST estimates was carried out for average values in the cells of the latitude/longitude grid of 0.1° x 0.1°. The average annual values of standard deviations of SST estimates do not exceed 1.5 K. The SSTs obtained from MSU-MR/Meteor-M 2-2 can be used for various applications, in particular, for the assimilation in NWP schemes.

Отражение климатической изменчивости в динамических характеристиках свободной тропосферы

Нерушев А.Ф. (nerushev@rpatyphoon.ru), Вишератин К.Н., Ивангородский Р.В.

Научно-производственное объединение «Тайфун», Обнинск, Россия

Скорость и направление ветра относятся к числу важнейших климатических параметров в свободной атмосфере, которые согласно рекомендациям ВМО необходимо контролировать периодически и длительное время. Эффективным инструментом такого контроля являются измерения с геостационарных метеорологических спутников, выполняемые с высоким временным (~15 мин) и пространственным (1-3 км) разрешением. Поле ветра в свободной атмосфере практически не зависит от характера подстилающей поверхности и определяется атмосферными процессами различного пространственно-временного масштаба, в том числе глобальными. В верхней тропосфере присутствуют высотные струйные течения (СТ), в которых сосредоточена основная кинетическая энергия атмосферы.

В докладе исследуется изменчивость поля ветра и основных характеристик струйных течений Северного полушария в широтной области $(30 - 60)^{\circ}$ с.ш. и долготном интервале 60° з.д. - 60° в.д. на разных временных масштабах: от месяца до десятилетий. Исходной информацией служат данные зондирования атмосферы радиометром SEVIRI европейских геостационарных метеорологических спутников второго поколения Meteosat 8 – Meteosat 11 за период 2007-2022 гг.

Выявлено изменение знака тренда модуля среднемесячной скорости ветра на рубеже 2015-2017 гг. с положительного на отрицательный. Наибольшие положительные тренды, значимо отличные от нуля с вероятностью более 95%, отмечаются над Атлантикой и всей областью в целом. Отрицательный тренд значим только над Атлантикой. Для наиболее важных характеристик СТ: максимальной скорости ветра на оси (V_m) и широтного положения центра струйного течения (ϕ) на рубеже 2013-2014 гг. наблюдается смена знака тренда с отрицательного на положительный. При этом среднее положение центра СТ по долготе сдвигается на запад от 3° в.д. до 3° з.д.

Внутрисезонная изменчивость среднемесячных значений скорости ветра хорошо выражена с минимумом в летние месяцы и максимумом – в зимние. Годовой ход среднемесячных значений V_m и ϕ за 2007-2016 гг. также хорошо выражен. Максимальные значения ϕ (сдвиг к полюсу) наблюдаются в летне-осенний период, а минимальные – в зимний. Минимальные значения V_m наблюдаются весной-начале лета, максимальные – в июле-октябре, а также зимой. При этом максимальные значения V_m и ϕ практически совпадают по времени в летне-осенний период.

Внутримесячная изменчивость V_m и ϕ различна для разных месяцев. Наибольшие изменения V_m испытывает в апреле, а ϕ – в октябре. Аномалии V_m и ϕ на временном интервале 2017-2021 гг. отражают влияние климатических изменений и демонстрируют рост скорости ветра и сдвиг СТ к полюсу.

Исследована связь временной изменчивости скорости ветра и характеристик СТ с важнейшими климатическими параметрами и крупномасштабными атмосферными процессами. Показано, что главными факторами изменчивости являются вариации площади арктического морского льда и температурных характеристик тропосферы на уровнях 500 и 200 гПа. Предложена схема влияния ускоряющегося сокращения площади арктического морского льда, связанного с глобальным потеплением, на скорость ветра в свободной атмосфере.

Reflection of climatic variability in the dynamic characteristics of the free troposphere

A.F. Nerushev (nerushev@rpatyphoon.ru), K.N. Visheratin, R.V. Ivangorodsky
Research and Production Association "Typhoon", Obninsk, Russia

Wind speed and direction are among the most important climatic parameters in the free atmosphere, which, according to WMO recommendations, must be monitored periodically and for a long time. An effective tool for such control are measurements from geostationary meteorological satellites, performed with high temporal (~ 15 min) and spatial (1-3 km) resolution. The wind field in the free atmosphere practically does not depend on the nature of the underlying surface and is determined by atmospheric processes of various spatio-temporal scales, including global ones. In the upper troposphere, in particular, there are high-altitude jet streams (JSs), in which the main kinetic energy of the atmosphere is concentrated.

The report examines the variability of the wind field and the main characteristics of the jet streams of the Northern Hemisphere in the latitudinal region $(30 - 60)^{\circ}$ N and longitude interval 60° W - 60° E on different time scales: from months to decades. The initial information

is the data of atmospheric sounding by the SEVIRI radiometer of the European geostationary meteorological satellites of the second generation Meteosat 8 - Meteosat 11 for the period 2007-2022.

The trend sign of the module of mean monthly wind speed at the turn of 2015-2017 was changed from positive to negative. The largest positive trends, significantly different from zero with a probability of more than 95%, are observed over the Atlantic and the entire region as a whole. The negative trend is significant only over the Atlantic. At the turn of 2013-2014 there is a change in the trend sign from negative to positive for the most important JS characteristics: maximum wind speed on the axis (V_m) and the latitudinal position of the jet stream center (ϕ). At the same time, the average position of JS center shifts in longitude to the west from 3° E to 3° W.

Intra-seasonal variability of average monthly wind speed values is well expressed with a minimum in the summer months and a maximum in the winter months. Annual variation of monthly averages of V_m and ϕ for 2007-2016 also well expressed. The maximum values of ϕ (poleward shift) are observed in the summer-autumn period, while the minimum values are observed in winter. The minimum values of V_m are observed in spring – early summer, the maximum – in July-October, as well as in winter. At the same time, the maximum values of V_m and ϕ practically coincide in time in the summer-autumn period.

The daily variability of V_m and ϕ is different for different months with the greatest changes in April and in October accordingly. Anomalies of V_m and ϕ in the time interval 2017-2021 reflect the impact of climate change and demonstrate an increase in wind speed and a poleward shift of the JS.

The relationship between the temporal variability of wind speed and JS characteristics and the most important climatic parameters and large-scale atmospheric processes has been studied. It is shown that the main factors of this variability are variations in the area of Arctic sea ice and temperature characteristics of the troposphere at levels of 500 and 200 hPa. A scheme of the influence of the accelerating Arctic sea ice reduction associated with global warming on the wind speed in the free atmosphere is proposed.

Пространственно-временная динамика атмосферных параметров во время событий быстрого роста площади лесных пожаров в Восточной Сибири

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

Институт космических исследований и аэронавтики им. Ю.Г. Шафера СО РАН, Якутск, Россия

В последние десятилетия потепление климата приводит к формированию более благоприятных условий для возникновения и развития природных пожаров как в региональном, так и в глобальном масштабе. Возникновение и скорость распространения лесных пожаров зависят от нескольких факторов: наличия горючего материала, погодноклиматических условий и источников возгорания. В данной работе проанализирована пространственно-временная динамика атмосферных параметров во время событий быстрого роста площади (БРП) лесных пожаров в Восточной Сибири за период 2001-2021 гг. по данным атмосферного реанализа и спутниковых наблюдений. Показано, что события БРП наблюдаются на фоне характерных метеорологических условий – положительных аномалий Z500, дипольной картины циркуляции в меридиональной компоненте ветра V300, положительных аномалий температуры приземного воздуха, отрицательных аномалий осадков и, как итог, общей повышенной пожароопасности. Наблюдаемая картина соответствует антициклонической циркуляции. Установлено, что атмосферные параметры начинают нарастать/снижаться относительно

среднегодовыми значениями за 4-8 дней до событий, достигают максимума/минимума примерно в день события и постепенно возвращаются к среднегодовым значениям. Это обстоятельство может быть использовано при прогнозировании возникновения подобных событий.

Spatio-temporal dynamics of atmospheric parameters during events of rapid growth of forest fires in Eastern Siberia

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

Yu.G. Shafer Institute of Cosmophysical Research and Aeronomy SB RAS, Yakutsk, Russia

In recent decades, a warming climate has resulted in more favourable conditions for the occurrence and development of wildfires, both regionally and globally. The occurrence and rate of spread of wildfires depend on several factors: the availability of combustible material, weather and climatic conditions, and sources of ignition. This paper analyzes the spatial and temporal dynamics of atmospheric parameters during rapid growth events of forest fires in Eastern Siberia for the period 2001-2021 based on atmospheric reanalysis and satellite observations. It is shown that such events are observed against the characteristic meteorological conditions - positive Z500 anomalies, dipole circulation pattern in the meridional wind component V300, positive surface air temperature anomalies, negative precipitation anomalies and, as a result, general increased fire hazards. The observed pattern corresponds to an anticyclonic circulation. It was found that atmospheric parameters begin to increase/decrease relative to mean annual values 4-8 days before the events, reach a maximum/minimum around the day of the event and gradually return to mean annual values. This can be used to predict the occurrence of such events.

Анализ характеристик температурно-влажностного режима при развитии лесных пожаров в результате молниевой активности на территории Западной Сибири за период 2016–2021 гг

Харюткина Е.В. (kh_ev@mail2000.ru), Морару Е.И.

Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск, Россия

В рамках исследования для территории Западной Сибири (50–70°с.ш. и 60–90°в.д.) проводится анализ температурно-влажностных характеристик атмосферы и влажности лесной подстилки во время возникновения природных пожаров, вызванных грозовой деятельностью за теплый сезон 2016–2021 гг.

Вследствие удара молнии возможно возникновение природного пожара только в том случае, если в приземной атмосфере будут формироваться соответствующие для этого погодные условия.

Данные о молниевых разрядах получены из Всемирной грозопеленгационной сети (WWLLN), о местоположении очагов возгораний лесных пожаров - из Fire Information for Resource Management System (FIRMS)). Поскольку некоторые тепловые аномалии могут относиться, например, к предприятиям топливно-энергетического комплекса, мы исключали из рассмотрения локальные антропогенные источники тепла. Для уточнения факта наличия пожаров использовалась база данных постоянных огней ИКИ РАН (<http://скр.geosmis.ru/>). Осуществлялась также оценка характеристик дымовых шлейфов от пожаров на основе продукта Aerosol Index (AI), рассчитанного с использованием данных спутникового спектрорадиометра MODIS. Пространственная и временная

изменчивость температуры и относительной влажности воздуха на 1000 гПа и на 850 гПа, скорости ветра, атмосферные осадки, характеристик влажности подстилки оценивалась по суточным данным из реанализа ERA5 с пространственным разрешением $0,25^\circ \times 0,25^\circ$ по широте и долготе. Для получения оценок влажности поверхности почвы привлекались данные о влагонасыщении почвы из спутниковых данных (ESA Climate Change Initiative) с временным разрешением 1 сутки и с пространственным разрешением $0,25^\circ \times 0,25^\circ$. Отдельно выделялись случаи пожаров от «сухих» гроз (принималось условие, что удар молнии происходит без существенных осадков или, когда осадки испаряются, не достигнув земли). Анализ проводился с учетом преобладающего типа растительности (MODIS Land Cover images).

Таким образом, был получен диапазон значений (пороговые значения) метеовеличин (температура и относительная влажность воздуха), характеристик влажности подстилки, которые наблюдаются в день возникновения пожара вследствие грозовой деятельности.

Полученные результаты будут полезны при дальнейшем комплексном анализе условий, способствующих возгоранию от «сухих» гроз.

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда (РНФ), проект № 22-27-00494, <https://www.rscf.ru/en/project/22-27-00494>.

Analysis of temperature and humidity regime characteristics during the occurrence of lightning-ignited fires in Western Siberia for 2016–2021

E.V. Kharyutkina (kh_ev@mail2000.ru), E.I. Moraru

Institute of monitoring of climatic and ecological systems SB RAS, Tomsk, Russia

In the framework of the study for the territory of Western Siberia ($50\text{--}70^\circ\text{N}$ and $60\text{--}90^\circ\text{E}$) the analysis of temperature and humidity characteristics in the surface atmosphere and the moisture content of the forest floor during the occurrence of wildfires caused by thunderstorm activity is carried out for the warm season of 2016–2021.

After a lightning strike a wildfire can occur only if the weather conditions in the surface atmosphere are appropriate for this.

Information on lightning discharges are obtained from the Worldwide Lightning Location Network (WWLLN), and on the location of fires - from the Fire Information for Resource Management System (FIRMS)). Since some thermal anomalies can be related, for example, to enterprises of the fuel and energy complex, we excluded local anthropogenic heat sources from the dataset. To clarify the fact of the fires the database of constant fires, developed in Space Research Institute RAS was used (<http://ckp.geosmis.ru/>).

The characteristics of smoke plumes from fires were also analyzed based on the Aerosol Index product, calculated using data from the MODIS satellite spectroradiometer.

Spatial and temporal variability of air temperature and relative humidity at 1000 hPa and 850 hPa, wind speed, precipitation, fuel moisture characteristics were estimated from daily ERA5 reanalysis data with spatial resolution of $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ in latitude and longitude.

We also defined cases of ignition from "dry" thunderstorms (it was considered that a lightning strike occurs without significant precipitation or when precipitation evaporates before reaching the ground). The analysis was carried out taking into account the predominant type of vegetation (MODIS Land Cover images).

Thus, ranges for values (threshold values) of meteorological parameters (air temperature and relative humidity) and fuel moisture characteristics, that are observed on the day of a fire due to thunderstorm activity were derived.

The results obtained will be useful for further comprehensive analysis of the conditions conducive to ignition from "dry" thunderstorms.

This research is supported by Russian Science Foundation (RSF), project # 22-27-00494, <https://www.rscf.ru/en/project/22-27-00494>.

Усиливаются ли атмосферные конвективные явления над Россией?

Чернокульский А.В. (a.chernokulsky@ifaran.ru)

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

Проанализированы изменения повторяемости и интенсивности конвективных опасных явлений погоды, включая сильные ливни, грозы, град, шквалы и смерчи в регионах России в теплый период года на основе различных независимых источников информации. На основе данных наблюдений на российских метеорологических станциях за период 1966–2020 гг. оценена повторяемость гроз, града и сильного ветра, вклад экстремальных ливневых осадков в общую сумму осадков, а также доля небосвода, закрытая кучево-дождевыми облаками. На основе спутниковых данных оценена повторяемость и интенсивность смерчевых и шкваловых событий, вызвавших ветровалы (за 1986–2021 гг.), и высота верхней границы облаков глубокой конвекции (за 2002–2021 гг.). На основе данных реанализа ERA5 оценена повторяемость условий, характерных для развития умеренных и интенсивных конвективных явлений. Результаты анализа указывают на общую интенсификацию КОЯП в большинстве регионов России за исключением ряда регионов на юге европейской территории России. Повторяемость умеренных конвективных явлений имеет тенденцию к уменьшению, а наиболее сильных — к росту. Полученные результаты целесообразно принимать во внимание при разработке планов адаптации российских регионов и отраслей к изменению климата.

Are atmospheric convective events intensifying over Russia?

A.V. Chernokulsky (a.chernokulsky@ifaran.ru)

Obukhov Institute of Atmospheric Physics RAS, Moscow, Russia

Changes in the frequency and intensity of severe convective events, including heavy showers, thunderstorms, hail, squalls, and tornadoes are analyzed for the Russian regions for the warm season based on various independent sources of information. We used surface observations from Russian meteorological stations for the period 1966–2020 to analyze the frequency of thunderstorms, hail and strong winds, amount of cumulonimbus clouds, as well as contribution of extreme showers to the total amount of precipitation. We used satellite data to estimate the frequency and intensity of tornado and squall events that caused windthrow (for 1986–2021) and the deep convection cloud top height (for 2002–2021). Based on the data of the ERA5 reanalysis, we analyzed the frequency of occurrence of conditions that are favorable for the development of moderate and intense convective events. The results of the analysis highlight a general intensification of the convective events in the majority of Russian regions except for several regions in the south of the European Russia. The frequency of occurrence of moderate convective events tends to decrease, while those of strong convective events tend to increase. The obtained results should be taken into account when developing plans for climate change adaptation of Russian regions and industries.

Эмпирические зависимости между характеристиками конвективных штормов, вызывающих смерчи и шквалы в Северной Евразии, и значениями параметров неустойчивости атмосферы

Чернокульский А.В.¹, Шихов А.Н.² (and3131@inbox.ru), Ярынич Ю.И.³, Спрыгин А.А.⁴

¹Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия

²Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь, Россия

³Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

⁴Научно-производственное объединение «Тайфун», Обнинск, Россия

Идентификация конвективных штормов и оценка их характеристик по спутниковым данным является важным направлением исследования конвективных опасных явлений погоды с 1970-х гг. XX века. В последние десятилетия достигнуты большие успехи в автоматизации этого процесса (см. напр. Cintineo et al., 2020). Однако недостаточное внимание уделялось зависимостям характеристик штормов от атмосферных условий их возникновения, в частности от значений различных конвективных параметров, применяемых в рамках ингредиентного подхода (Brooks et al., 2018). В настоящей работе выполнен совместный анализ информации о случаях шквалов и смерчей, выявленных по данным о ветровалах в лесной зоне Северной Евразии, характеристик конвективных штормов, вызвавших эти события (с акцентом на структуру их верхней части облаков), и данных о конвективных параметрах, полученных на основе реанализа ERA5. Выборка включает 138 случаев смерчей и 141 случай шквалов, связанных со 128 различными конвективными облачными системами (конвективными штормами), за период 2006-2021 гг.

Большинство случаев шквалов и смерчей связаны с прохождением суперячейковых облаков или квазилинейных конвективных систем. Большинство из них были долгоживущими (средняя продолжительность жизни 9,5 ч). Температура верхней границы облаков (ВГО) в случаях со шквалами статистически значимо ниже, чем в случаях со смерчами (-63°C и -61°C соответственно). В 54% случаев со смерчами и в 68% случаев со шквалами наблюдались сигнатуры интенсивных восходящих потоков на верхней границе облаков – пробои тропопаузы (ОТ), кольцевые или U-V образные структуры. Доля случаев с сигнатурами возрастает для долгоживущих штормов, тогда как короткоживущие ячейки масштаба мезо- β сопровождалась возникновением сигнатур всего в 21% случаев.

Суперячейки формируются при существенно более низких значениях энергии неустойчивости (CAPE), влагосодержания атмосферы (PW) и уровня конденсации (LCL), в сравнении с другими типами штормов. Для формирования суперячеек большее значение имеет сдвиг ветра. В свою очередь, сигнатуры восходящих потоков (ОТ, кольцевые или U-V образные структуры) чаще наблюдались при более высоких значениях CAPE, PW и композитных параметров. Минимальная температура ВГО имеет сильную отрицательную корреляцию с CAPE, PW и рядом композитных параметров, поскольку они характеризуют интенсивность восходящих потоков. Для продолжительности жизни штормов выявлена статистически значимая зависимость со значениями параметра WMAXSHEAR.

Исследование выполнено при поддержке РФФИ (18-77-10076)

1. Brooks, H.E.; Doswell, C.A., III; Zhang, X.; Chernokulsky, A.; Tochimoto, E.; Hanstrum, B.; Nascimento, E.; Sills, D.; Antonescu, B.; Barrett, B. A century of progress in severe convective storm research and forecasting. Meteorol. Monographs 2018, 59, 18.1–18.41.

2. Cintineo, J.L.; Pavolonis, M.J.; Sieglaff, J.M.; Wimmers, A.; Brunner, J.; Bellon, W. A deep-learning model for automated detection of intense midlatitude convection using geostationary satellite images. Weather Forecast. 2020, 35, 2567–2588

Empirical relationships between the characteristics of convective storms inducing tornadoes and squalls in Northern Eurasia and the values of atmospheric instability parameters

A.V. Chernokulsky¹, A.N. Shikhov² (and3131@inbox.ru), Yu.I. Yarynich³, A.A. Sprygin⁴

¹*A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics RAS, Moscow, Russia*

²*Perm State University, Perm, Russia*

³*Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia*

⁴*Scientific and production association "Typhoon", Obninsk, Russia*

Identification of convective storms and evaluation of their characteristics based on satellite data has been an important direction in the study of convective hazardous weather events since the 1970s. Recently, substantial efforts have been directed to automating the identification of storms and their characteristics from satellite data (see e.g. Cintineo et al., 2020). However, insufficient attention was paid to the relationships between storm characteristics and the atmospheric environments associated with their occurrence, in particular, on the values of various convective parameters used within the ingredient approach (Brooks et al., 2018). In this study, we analyzed the information on squalls and tornadoes which caused windthrow events in the forest zone of Northern Eurasia, the characteristics of convective storms that caused these events (focusing on the structure of their cloud tops), and the data on convective parameters obtained from the ERA5 reanalysis. The sample includes 138 tornadoes and 141 squalls associated with 128 different convective cloud systems (convective storms) over the period 2006-2021.

Most of squall and tornado events are associated with supercell storms or with quasi-linear convective systems. Most of them were long-lived (average lifetime 9.5 hours). The cloud top temperature (CTT) in cases with squalls is significantly lower than in cases with tornadoes (-63°C and -61°C , respectively). In 54% of cases with tornadoes and in 68% of cases with squalls, signatures of intense updrafts like overshooting tops (OTs), cold-ring or U-V shaped structures were observed at the cloud tops. The proportion of cases with signatures increases for long-lived storms, while short-lived meso- β scale storms were accompanied by these signatures in only 21% of cases.

Supercells form at significantly lower values of convective available potential energy (CAPE), atmospheric moisture content (PW), and condensation level (LCL) compared to other types of storms. Wind shear is more important for the formation of supercells. In turn, signatures on the cloud tops (OT, ring or U-V shaped structures) were more often observed at higher values of CAPE, PW and composite parameters. The minimum CTT has a strong negative correlation with CAPE, PW, and a number of composite parameters, since they characterize the intensity of updrafts. For the lifetime of storms, a statistically significant correlation with the values of the WMAXSHEAR parameter was found.

The study was funded by the Russian Science Foundation (18-77-10076).

1. Brooks, H.E.; Doswell, C.A., III; Zhang, X.; Chernokulsky, A.; Tochimoto, E.; Hanstrum, B.; Nascimento, E.; Sills, D.; Antonescu, B.; Barrett, B. A century of progress in severe convective storm research and forecasting. *Meteorol. Monographs* 2018, 59, 18.1–18.41.

2. Cintineo, J.L.; Pavolonis, M.J.; Sieglaff, J.M.; Wimmers, A.; Brunner, J.; Bellon, W. A deep-learning model for automated detection of intense midlatitude convection using geostationary satellite images. *Weather Forecast.* 2020, 35, 2567–2588

М.В.Келдыш, Г.И.Марчук, К.Я.Кондратьев: пилотируемая космонавтика и аэрокосмическое ДЗЗ. К 300-летию Академии наук

Сушкевич Т.А. (tamaras@keldysh.ru)

К 300-летию Академии наук важно вспомнить заслуги и достижения АН СССР и академиков М.В.Келдыша, Г.И.Марчука, К.Я.Кондратьева, которые сыграли ключевую роль в покорении и освоении космоса. Главный Теоретик космонавтики М.В.Келдыш и Главный Конструктор космонавтики С.П.Королев открыли «космическую эру человечества». М.В.Келдыш – идеолог космических исследователей и пилотируемой космонавтики, Г.И.Марчук и К.Я.Кондратьев – его единомышленники. В Москве, Ленинграде и Новосибирске они подготовили и возглавили коллективы исследователей, которые начали покорение космоса и создали фундаментальные основы пилотируемой космонавтики и аэрокосмического дистанционного зондирования Земли. 1946 год – ключевой в судьбе М.В.Келдыша, когда были сделаны первые шаги на пути выхода в космос. Датой основания ракетно-космической отрасли считается 13.05.1946, когда И.В.Сталин подписал Постановление Совета Министров СССР №1017-419сс (гриф снят) «Вопросы реактивного вооружения», в котором были определены конкретные меры по созданию «Ракетно-ядерного щита». 30.11.1946 М.В.Келдыш в возрасте 35 лет избран академиком в Отделении технических наук АН СССР по специальности «математика, механика». С тех пор «незаменимый» М.В.Келдыш стал лидером и главным математиком страны - проводил работы и отвечал за направления по «прикладной математике». 02.12.1946 при поддержке И.В.Сталина молодого академика назначают Начальником Реактивного научно-исследовательского института (РНИИ, НИИ-1 МАП) – впервые математик стал руководителем технического института! При поддержке И.В.Сталина в возрасте 42 лет М.В.Келдыш основал Первый в мире Институт прикладной математики АН СССР (ОПМ МИАН СССР) для выполнения «Трех проектов» – «Атомный», «Космический», «Ракетно-ядерный щит» – на основе «новых технологий»: прикладная математика, расчеты, ЭВМ и т.д. Согласно Распоряжению СМ СССР от 18.04.1953 № 6111-рс об образовании Отделения прикладной математики Математического института имени В.А.Стеклова АН СССР (рассекречено) М.В.Келдыш назначен директором института, А.Н.Тихонов – его заместителем. Историческая дата: 14.02.1954 в кабинете М.В.Келдыша прошло ПЕРВОЕ совещание по искусственному спутнику Земли (ИСЗ). В этом совещании участвовали его ученики и те ученые и специалисты, кто был непосредственно связан с созданием космической техники и кто мог высказать предложения по научным исследованиям, которые нужно было бы проводить со спутников. По указанию М.В.Келдыша в 1955 г. из АН СССР с помощью Г.А.Скуридина разослали письма в разные организации и ученым разных специальностей с одним вопросом: "Как можно использовать космос?" Мнений и предложений было много и разных. Для убеждения руководителей СССР в необходимости освоения космического пространства и запусков космических спутников и кораблей М.В.Келдыш как государственный деятель выделил две главные задачи: разведка и наблюдения Земли. Это был стратегический выбор в XX веке, актуальный и в XXI веке. Под эти задачи сформировались многие научно-исследовательские проекты, новые отрасли человеческой деятельности, новые научные институты. Ключевым явился 1955 год – год становления космической отрасли. В 1955 г. были созданы Министерство общего машиностроения и другие ведомства, 12.02.1955 вышло Постановление о строительстве космодрома «Байконур». В ноябре 1955 г. из АН СССР в ЦК КПСС и Совет Министров было направлено письмо с Программой космических исследований. Родилось новое научное направление REMOTE SENSING – аэрокосмическое дистанционное зондирование Земли. 08.08.1955 прошло заседание Президиума ЦК КПСС «О создании искусственного спутника Земли». Из Постановления СМ СССР № 149-88с от 30.01.1956 «О создании объекта «Д»»: «... организовать при Президиуме Академии наук

СССР Комиссию по осуществлению научного руководства при создании объекта «Д» во главе с академиком Келдышем и с участием ведущих ученых.» С.П.Королев и М.К.Тихонравов – заместители, Г.А.Скуридин – ученый секретарь. Из Постановления ЦК КПСС и СМ СССР «О развитии исследований по космическому пространству» от 10.12.1959 №1388-618 (секретно особой важности – гриф снят): «Придавая важное значение делу дальнейшего освоения космического пространства и обеспечению ведущей роли нашей страны в этой области, Центральный Комитет КПСС и Совет Министров Союза ССР ПОСТАНОВЛЯЮТ: 4. Для научно-технического руководства работами по исследованию космического пространства организовать при Академии наук СССР постоянно действующий Междуведомственный научно-технический совет по космическим исследованиям (МНТС по КИ). Утвердить Президиум Междуведомственного научно-технического совета в составе тт. Келдыша М.В. (председатель), Королева С.П. (заместитель председателя), Благонравова А.А (заместитель председателя), Бушуева К.Д. (заместитель председателя); членов совета тт. Седова Л.И., Глушко В.П., Рязанского М.С., Янгеля М.К., Тюлина Г.А., Соколова А.И., Федорова Е.К., Амбарцумяна В.А., Агальцова Ф.А., Лейпунского А.И., Пашкова Г.Н., Гришина Л.А., Шокина А.И.» С 1959 по 1978 гг. М.В.Келдыш – Председатель МНТС по КИ в статусе Министра СССР. М.В.Келдыш лично провожал всех космонавтов в полет на космодроме, а затем проводил пресс-конференции в Актовом зале МГУ им. М.В.Ломоносова. 12.04.1961 Ю.А.Гагарин с орбиты КК «Восток-1» впервые увидел Землю – первые визуальные наблюдения, а 06.08.1961 Г.С.Титов на КК «Восток-2» впервые выполнил фотографирование и кинокамерой «Конвас» съемки Земли – первые инструментальные наблюдения, выполненные человеком из космоса. 60 лет назад 16.06.1963 был проведен первый научный эксперимент космонавтами: В.Ф.Быковский с КК «Восход-5» и В.В.Терешкова с КК «Восход-6» сфотографировали горизонт Земли и впервые были подтверждены научные идеи о стратосферных аэрозольных слоях. В СССР 19.04.1971 состоялся запуск первой Долгосрочной орбитальной станции «Салют-1», без которой не было бы Международной космической станции (МКС, 1998). СССР стал лидером пилотируемой космонавтики и аэрокосмического дистанционного зондирования Земли.

M.V.Keldysh, G.I.Marchuk, K.Ya.Kondratiev: manned cosmonautics and aerospace remote sensing. For the 300th anniversary of the Academy of Sciences

T.A. Sushkevich (tamaras@keldysh.ru)

Keldysh Institute of Applied Mathematics of the RAS, Moscow, Russia

To the 300th anniversary of the Academy of Sciences, it is important to remember the merits and achievements of the USSR Academy of Sciences and academicians M.V.Keldysh, G.I.Marchuk, K.Ya.Kondratiev, who played a key role in the conquest and development of space. The Chief Theorist of cosmonautics M.V.Keldysh and Chief Designer of cosmonautics S.P.Korolev opened the "space age of universe". M.V.Keldysh is the ideologist of space researchers and manned cosmonautics, G.I.Marchuk and K.Y.Kondratiev are his adherents. In Moscow, Leningrad and Novosibirsk, they prepared and led teams of researchers who began the conquest of space and created the fundamental foundations of manned cosmonautics and aerospace remote sensing of the Earth. 1946 was a key year in the destiny of M.V.Keldysh, when the first steps were taken on the way to space. The date of the foundation of the rocket and space industry is regard to be 13.05.1946, when I.V.Stalin signed the Resolution of the Council of Ministers of the USSR No. 1017-419ss (stamp removed) "Issues of jet weapons", which identified specific measures for the creation of "Nuclear missile shield". On November

30, 1946, M.V.Keldysh at the age of 35 years was elected an academician in the Department of Technical Sciences of the USSR Academy of Sciences, specialty "mathematics, mechanics". Since then, the "irreplaceable" M.V.Keldysh became the leader and chief mathematician of the country - he carried out work and was responsible for directions in "applied mathematics". On December 2, 1946, with the support of I.V.Stalin, the young academician was appointed Director of the Jet Research Institute (RNII, NII-1 MAP) - for the first time a mathematician became the head of a technical institute! With the support of I.V.Stalin, at the age of 42, M.V.Keldysh founded the World's First Institute of Applied Mathematics of the USSR Academy of Sciences (OPM MIAN USSR) to carry out "Three projects" - "Atomic", "Space", "Nuclear missile shield" - based on "new technologies": applied mathematics, calculations, computers, etc. According to the Decree of the Council of Ministers of the USSR No. 6111-pc dated April 18, 1953 on the formation of the Department of Applied Mathematics of the V.A.Steklov Mathematical Institute of the USSR Academy of Sciences (declassified), M.V.Keldysh was appointed Director of the Institute, A.N.Tikhonov - his Deputy. Historical date: February 14, 1954, the FIRST meeting on a man-made Earth sputnik (MES) was held in the office of M.V.Keldysh. This meeting was attended by his students and those scientists and specialists who were directly involved in the creation of space technology and who could make proposals for scientific research that should be carried out from satellites. At the direction of M.V.Keldysh, in 1955, the USSR Academy of Sciences, with the help of G.A.Skuridin, sent letters to various organizations and scientists of various specialties with one question: "Why do we need space?" Opinions and proposals were many and varied. To convince the leaders of the USSR of the need to explore cosmic space and launch space satellites and ships, M.V.Keldysh, as a statesman, singled out two main tasks: reconnaissance and observation of the Earth. It was a strategic choice in the 20th century and relevant in the 21st century. Under these tasks, many research projects, new branches of human activity, new scientific institutes were formed. The key year was 1955, the year of the formation of the space industry. In 1955, the Ministry of General Mechanical Engineering and other departments were created, and on February 12, 1955, a Decree on the construction of the Baikonur cosmodrome was issued. In November 1955, a letter was sent from the USSR Academy of Sciences to the Central Committee of the CPSU and the Council of Ministers with the Space Research Program. A new scientific direction REMOTE SENSING was born - aerospace remote sensing of the Earth. 08.08.1955 a meeting of the Presidium of the Central Committee of the CPSU "On the creation of a man-made sputnik of the Earth" was held. From the Resolution of the Council of Ministers of the USSR No. 149-88c dated 30.01.1956 "On the creation of object "D" ": "... to organize a Commission under the Presidium of the Academy of Sciences of the USSR for the implementation of scientific guidance in the creation of object "D" headed by Academician Keldysh and with the participation of leading scientists." S.P.Korolev and M.K.Tikhonravov – deputies, G.A.Skuridin – Scientific secretary. From the Resolution of the Central Committee of the CPSU and the USSR Council of Ministers "On the development of Space research" dated 10.12.1959 No. 1388-618 (classified of special importance – the stamp is removed): "Attaching great importance to the further development of outer space and ensuring the leading role of our country in this area, the Central Committee of the CPSU and the Council of Ministers of the USSR DECIDE: 4. For the scientific and technical management of work on the exploration of cosmic space, organize under the Academy of Sciences of the USSR a standing operating Interdepartmental Scientific and Technical Council for Space Research (ISTC for CI). Approve the Presidium of the Interdepartmental Scientific and Technical Council as part of the comrades Keldysh M.V. (Chairman), Korolev S.P. (Deputy Chairman), Blagonravov A.A. (Deputy Chairman), Bushuev K.D. (vice-chairman); members of the council Sedov L.I., Glushko V.P., Ryazansky M.S., Yangel M.K., Tyulin G.A., Sokolov A.I., Fedorov E.K., Ambartsumyan V.A., Agaltsov F. .A., Leipunsky A.I.,

Pashkov G.N., Grishin L.A., Shokin A.I. From 1959 to 1978 M.V.Keldysh - Chairman of the ISTC for CI in the status of USSR Minister. M.V.Keldysh personally saw off all the cosmonauts on their flight at the cosmodrome, and then held press conferences in the Assembly Hall of Moscow State University. M.V.Lomonosov. 12.04.1961 Yu.A.Gagarin from the orbit of the "Vostok-1" spacecraft saw the Earth for the first time – the first visual observations, and 06.08.1961 G.S.Titov on the "Vostok-2" spacecraft for the first time performed photographing and filming of the Earth with the "Convax camera" – the first instrumental observations made by a man from space. 60 years ago, on June 16, 1963, the first scientific experiment was carried out by cosmonauts: V.F.Bykovsky with the "Voskhod-5" spacecraft and V.V.Tereshkova with the "Voskhod-6" spacecraft photographed the Earth's horizon and for the first time scientific ideas about stratospheric aerosol layers were confirmed. In the USSR, on April 19, 1971, the first Long-term orbital station "Salyut-1" was launched, without which there would be no International Space Station (ISS, 1998). The USSR became the leader of manned cosmonautics and aerospace remote sensing of the Earth.

Постерная сессия

Мониторинг характеристик облачного покрова, осадков и опасных явлений погоды по данным МСУ-ГС-ВЭ КА Арктика-М для территории России и Арктики

Волкова Е. В. (quantocosa@bk.ru), Кухарский А. В.
ФГБУ «НИЦ «Планета», Москва, Россия

На запущенном в феврале 2021 г. российском высокоэллиптическом метеорологическом КА «Арктика-М» №1 установлен прибор МСУ-ГС-ВЭ (многозональное сканирующее устройство – геостационарное, высокоэллиптическое), аналогичный радиометру SEVIRI на европейских геостационарных метеоспутниках серии Meteosat [1]. С помощью МСУ-ГС-ВЭ каждые 15 мин проводится съёмка в 10-ти спектральных каналах: с пространственным разрешением в надире ~4 км для инфракрасного диапазона спектра (каналы 4-10, $\lambda = 3,75, 6,2, 8,0, 8,7, 9,7, 10,7$ и $11,9$ мкм) и ~1 км для видимого диапазона спектра (каналы 1-3, $\lambda = 0,58, 0,73$ и $0,85$ мкм).

Для анализа и интерпретации данных измерений МСУ-ГС-ВЭ/Арктика-М в ФГБУ «НИЦ «Планета» был создан и внедрён в опытную эксплуатацию автоматизированный программный комплекс (АПК) «АРКТИКАнсер». АПК позволяет в круглосуточном режиме по данным МСУ-ГС-ВЭ и численного прогноза NCEP GFS оперативно дешифровать и классифицировать по косвенным признакам пороговым методом 24 параметра облачного покрова, осадков и опасных явлений погоды (ОЯП) для отдельных сроков спутниковых наблюдений, а также рассчитывать накопленные и средние за сутки, месяц и год 16 «климатических» параметров облачности, осадков и ОЯП. Кроме того, выполняется валидация «срочных» и «климатических» выходных продуктов по облачности, осадкам и ОЯП (ежедневно и ежемесячно) путём сравнения с результатами наземных наблюдений на метеостанциях и климатическими оценками; по результатам валидации автоматически формируется заключение о качестве выходных продуктов в среднем по территории и за период времени (сутки или месяц).

Методической основой АПК является оригинальная авторская Комплексная пороговая методика (КПМ) дешифрования и классифицирования по косвенным признакам макро- и микрофизических параметров облачности, зон осадков и ОЯП [2].

КПМ использует данные измерений радиационной температуры в каналах 4-10 МСУ-ГС-ВЭ, прогностические поля температуры воздуха в атмосфере на стандартных изобарических уровнях и атмосферного давления на уровне моря (NCEP GFS, сетка 0,5°, сроки 0, 6, 12 и 18 ч UTC), цифровую модель рельефа (gtopo30), а также оценки параметров облачности и осадков, полученные на предыдущих этапах классификации. Пороговые значения предикторов рассчитываются для каждого пикселя спутникового изображения как функции высоты места над уровнем моря, высоты солнца, приземной температуры воздуха и приведённой к уровню моря, географической широты и др. Они получены эмпирическим путём и учитывают климатические особенности характеристик облачности и метеоявлений для территории России и Арктики, а также их сезонность, зональность и суточный ход.

Выходные «срочные» и «климатические» продукты АПК по облачности, осадкам и ОЯП получаются в виде числовых матриц (в точных значениях или кодах классов/градаций) и соответствующих им растровых карт: для полного круга обзора МСУ-ГС-ВЭ с исходным разрешением и для территории России и Арктики в двух картографических проекциях: косой азимутальной стереографической (масштаб ~4 км) и нормальной цилиндрической равнопромежуточной (масштаб 1,5' (0,025°)). Время обработки одного срока спутникового наблюдения, включая предварительную подготовку, классификацию и запись в файлы, не превышает 1 мин.

Авторская валидация (на материале архива синхронных спутниковых и наземных наблюдений на метеостанциях за 2022 г.) показала удовлетворительное качество выходных информационных продуктов, которые оказались близкими по качеству аналогичным оценкам по данным SEVIRI/Meteosat. В соответствии с результатами валидации выходные продукты могут быть рекомендованы к использованию в качестве дополнения к наземным метеонаблюдениям для мезомасштабного мониторинга облачного покрова и его параметров.

1. Асмус В.В., Милехин О.Е., Крамарева Л.С., Хайлов М.Н., Ширшаков А.Е., Шумаков И.А. Первая в мире высокоэллиптическая гидрометеорологическая космическая система «Арктика-М» // Метеорология и гидрология. 2021. № 12. С. 11-26.

2. Волкова Е.В., Кухарский А.В. Оперативный мониторинг параметров облачного покрова, осадков и опасных явлений погоды по данным МСУ-ГС-ВЭ КА Арктика-М // Материалы 20й Международной конференции "Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса". Электронный сборник материалов конференции. ИКИ РАН, Москва, 2022. С. 409. doi 10.21046/20DZZconf-2022a. ISBN 978-5-00015-008-

Monitoring of cloud cover characteristics, precipitation and dangerous weather phenomena over Russia and Arctic territories based on MSU-GS-VE instrument data from Arktika-M No. 1 satellite

E.V. Volkova (quantocosa@bk.ru), A.V. Kukharsky
State Research Centre on Space Hydrometeorology "Planeta", Moscow, Russia

In February, 2021 the Arktika-M No. 1 spacecraft was launched into a highly elliptical Molniya-type orbit with multispectral scanning geostationary device MSU-GS-VE as key payload. The MSU-GS-VE device is similar to the SEVIRI radiometer on European geostationary weather satellites of the Meteosat series. It has 10 spectral channels and provides multi-spectral VIS/IR imagery (full disk) every 15 min with spatial resolution in the nadir of ~4 km for the IR range of the spectrum (channels 4-10, $\lambda = 3,75, 6,2, 8,0, 8,7, 9,7, 10,7$ and $11.9 \mu\text{m}$) and ~1 km for the VIS range of the spectrum (channels 1-3, $\lambda = 0.58, 0.73$ and $0.85 \mu\text{m}$).

To analyze and interpret the MSU-GS-VE/Arktika-M No. 1 measurements, the software package "ARKTIKAncap" was developed and put into experimental operation at the SRC "Planeta". The software package allows to classify and to evaluate 24 parameters of cloud cover, precipitation and dangerous weather phenomena (DWP) for each observation time around the clock from the MSU-GS-VE data and the NCEP GFS output products, as well as to calculate the accumulated and average "climatic" estimates of 16 cloud cover, precipitation and DWP parameters for a day, month and year. In addition, validation of output products (daily and / or monthly) is performed by comparing with the results of ground-based observations at weather stations or climatic estimates; according to the results of validation, a report on the quality of output products is automatically generated as average for the territory and for a period of time (day or month).

The methodological basis of the software package is the Complex Threshold Technique, which uses measured brightness temperatures in the MSU-GS-VE channels 4-10, prognostic fields of air temperature at standard isobaric levels and atmospheric pressure at sea level (NCEP GFS, grid 0.5°, 0, 6, 12 and 18 h UTC), as well as a digital relief model (gtopo30) and estimates of cloud cover and precipitation parameters obtained at previous stages of classification. The dynamic thresholds are calculated for each pixel of the satellite image using the author's empirically obtained functions of relief height, solar height, air temperature at ground and at sea level, latitude, etc. and take into account climatic features of clouds and precipitation for the territory of Russia and Arctic along with their seasonal, zonal and diurnal changes.

The output products of the software package are numerical matrices (in exact values or codes of classes or gradations) and corresponding raster maps for the MSU-GS-VE full disk imagery with the original resolution and for the territory of Russia and the Arctic in two cartographic projections - oblique azimuthal stereographic (scale ~4 km) and normal cylindrical equidistant (scale 1.5' (0.025°)).

The author's verification and validation (based on the archive of synchronous satellite and ground-based observations at weather stations for 2022) showed satisfactory quality of output information products, which turned out to be close in quality to similar estimates from SEVIRI/Meteosat data. In accordance with the validation results, the output products can be recommended for the use as a supplement to ground-based meteorological observations for mesoscale monitoring of cloud cover and its parameters.

Некоторые результаты сопоставления измерений общего содержания CO орбитального прибора TROPOMI с данными наземных спектрометров ИФА РАН.

Ракитин В.С., Кириллова Н.С. (n.kirillova65@gmail.com), Федорова Е.И., Сафронов А.Н.,
Казаков А.В., Джола А.В., Гречко Е.И.
Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия

Представлены результаты валидации измерений общего содержания оксида углерода (ОС СО) орбитального спектрометра высокого разрешения TROPOMI наземными спектроскопическими измерениями в пунктах ИФА им. А.М. Обухова РАН Москва и Звенигородская научная станция (ЗНС) в период 28.06.2018 – 31.12.2021. С помощью разработанного в ИФА РАН многофункционального программного комплекса TROPOMI_tools были выполнены расчеты зависимости параметров корреляции орбитальных и наземных данных от альbedo подстилающей поверхности, наблюдаемых углов и высоты пограничного слоя атмосферы ПСА в разном пространственном разрешении данных TROPOMI (0.1×0.1, 0.25×0.25 и 0.5×0.5 градуса).

Отмечено отсутствие влияния альbedo поверхности на параметры соответствия орбитальных и наземных данных. Получены высокие коэффициенты корреляции $R \sim 0,81-0,97$ в зависимости от пункта наблюдения, пространственного усреднения и применяемой фильтрации. Установлено улучшение корреляции при уменьшении наблюдаемых азимутальных углов до 40 градусов (до $R \sim 0.97$), а также при росте высоты ПСА (до $R \sim 0.90$) и отсутствие значимой зависимости параметров корреляции от наблюдаемых зенитных углов.

Период сопоставлений более продолжительный, а область проведенного исследования более обширна, чем в опубликованных международным коллективом результатах валидации TROPOMI по ОС CO на основе сопоставления с измерениями наземных станций NDACC и TCCON. Полученные в нашей работе параметры корреляции в целом соответствуют результатам этого международного сравнения, а относительная разность (невязка) между спутниковыми и наземными данными ИФА РАН меньше: $-1.1 \pm 7.5\%$ и $1.3 \pm 5.7\%$ в Москве и ЗНС соответственно против величин невязки $5.69 \pm 3.07\%$ (NDACC) и $9.22 \pm 3.45\%$ (TCCON), полученных в международных сравнениях.

Работа выполнена при поддержке Российского Научного фонда, Проект №21-17-00210.

Some results of comparison of TROPOMI CO total column measurements and data of OIAP RAS ground-based spectrometers.

V.S. Rakitin, N.S. Kirillova(n.kirillova65@gmail.com), E.I. Fedorova,
A.N. Safronov, A.V. Kazakov, A.V. Jola, E.I. Grechko
Obukhov Institute of Atmospheric Physics, RAS, Moscow, Russia

The results of validation measurements the carbon monoxide total column (CO TC) of high-resolution orbital spectrometer TROPOMI by ground-based spectroscopic measurements at the sites of A.M. Obukhov Institute of RAS (OIAP) Moscow and Zvenigorod Scientific Station (ZSS) in period 28.06.2018 – 31.12.2021 are presented. Using the software TROPOMI_tools developed at the OIAP RAS, ground-based data correlation dependence on different resolution, viewing orbital angles, surface albedo and the height of atmospheric boundary layer (ABL) has been investigated.

The absence of influence albedo on parameters correspondence of orbital and ground-based data is noted. The high values of the correlation coefficient are obtained ($R \sim 0.81-0.97$) depending on the observation point, spatial averaging, and filtration applied. An improvement in correlation was found with a decrease in the observed viewing azimuthal angles to 40 degrees (up to $R \sim 0.97$), as well as under an increase in the height of the atmospheric boundary layer (up to $R \sim 0.90$).

The comparison period is longer, and the scope of study is more extensive than in the results of TROPOMI validation for CO TC published by the international team based on comparison with measurements of NDACC and TCCON ground-based stations. The correlation parameters obtained in our work generally correspond to the results of this international comparison, and the relative difference (discrepancy) between the satellite and ground-based data of the OIAP RAS is less: $-1.1 \pm 7.5\%$ and $1.3 \pm 5.7\%$ in Moscow and ZSS, respectively, against the values of the discrepancy of $5.69 \pm 3.07\%$ (NDACC) and $9.22 \pm 3.45\%$ (TCCON) obtained in international comparisons.

The work was supported by the Russian Science Foundation, Project No. 21-17-00210.

Многолетние тренды характеристик однослойной и общей облачности в летнее и зимнее время над различными широтными зонами Западной Сибири по спутниковым данным MODIS

Курьянович К.В. (ksuyain@mail.ru), Скороходов А.В., Астафуров В.Г.

Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, Томск, Россия

Западная Сибирь является одним из основных «регионов-индикаторов» глобальных климатических изменений. Результаты наземных и спутниковых наблюдений, а также данные реанализов свидетельствуют о значительном увеличении здесь числа температурных аномалий за последние десятилетия во все сезоны. Этому способствуют орографические особенности региона. Западно-Сибирская равнина представляет собой низменную, сильно заболоченную и покрытую лесом территорию. На западе она граничит с Уральскими горами, на востоке со Среднесибирским плоскогорьем, на севере с Северным Ледовитым океаном, на юге с Казахским мелкосопочником, а на юго-востоке с предгорьями Алтая и Западных Саян. Перечисленные особенности создают условия для развития ярко выраженного меридионального переноса. В летнее время арктические воздушные массы, поступающие сюда в тылах полярных циклонов, взаимодействуют с прогретым континентальным воздухом, вызывая образование облаков и осадков. В более редких случаях на территории Западной Сибири наблюдается вхождение влажных атлантических и сухих среднеазиатских воздушных масс. Зимой климат исследуемого региона формируется под влиянием отрога Азиатского (Сибирского) антициклона, который способствует выносу холодного континентального воздуха с востока. Поэтому для Западной Сибири характерны значительные температурные колебания, а также продолжительные периоды аномально жаркой или холодной погоды. Можно предположить, что изменение режима циркуляции атмосферы в Западной Сибири за последние десятилетия оказало влияние на характеристики облачности. Облака являются одним из основных факторов неопределенности в прогнозировании будущих изменений климата и их маркером.

В докладе представлены результаты анализа многолетней изменчивости характеристик однослойной и общей облачности в летнее и зимнее время над Западной Сибирью по спутниковым данным MODIS, полученным за период 2001-2022 гг. Рассматриваются три широтные зоны целевого региона по-отдельности: северная ($>60^\circ$ с.ш.), переходная ($60-65^\circ$ с.ш.) и южная ($<60^\circ$ с.ш.). В качестве основного источника информации используются тематические продукты MOD08_M3 (спутник Terra) и MYD08_M3 (спутник Aqua) с пространственным разрешением $1^\circ \times 1^\circ$, содержащие среднемесячные значения таких характеристик облаков, как: процент покрытия территории, оптическая толщина, водозапас и другие. На их основе найдены многолетние тренды указанных характеристик за рассматриваемый период времени. В докладе приведены коэффициенты взаимной корреляции между некоторыми параметрами облачности в различных широтных зонах. Обсуждаются результаты анализа временных рядов и аномальные выбросы для различных характеристик облаков путем их сопоставления с материалами ежегодных оценочных докладов Росгидромета. Кроме этого, обсуждается взаимосвязь параметров облачности с изменчивостью температуры подстилающей поверхности и количеством выпавших осадков в целевом регионе.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 21-71-10076, <https://rscf.ru/project/21-71-10076/>).

Long-term trends of parameters for single-layer and total cloudiness in summer and winter over different latitudinal zones of Western Siberia from MODIS data

K.V. Kuryanovich (ksuyain@mail.ru), A.V. Skorokhodov, V.G. Astafurov
V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics SB RAS, Tomsk, Russia

Western Siberia is one of the main "marker regions" for global climate change. The results of ground-based and satellite observations, as well as reanalysis data show a significant increase in the number of temperature anomalies in all seasons during the last decades here. The orographic features of the region contribute to this. The West Siberian Plain is a low-lying, heavily swamped and forested area. In the west region borders on the Ural Mountains, in the east on the Middle Siberian Plateau, in the north on the Arctic Ocean, in the south on the Kazakh uplands and in the southeast on the foothills of the Altai and Western Sayan. These features create conditions for the development of pronounced meridional transport. In summer, the Arctic air masses arriving here in the rear of polar cyclones interact with the warmed continental air causing the formation of clouds and precipitation. In more rare cases, the entrance of humid Atlantic and dry Central Asian air masses is observed in the territory of Western Siberia. In winter, the climate of the studied region is formed under the influence of the Asian (Siberian) High, which contributes to carrying cold continental air from the east. Therefore, significant temperature fluctuations and long periods of abnormally hot or cold weather are typical for Western Siberia. It can be assumed that changes in the atmospheric circulation regime in the studied region during the last decades have influenced the cloud parameters. And clouds are one of the main factors of uncertainty in predicting future climate changes and their marker.

The report presents the results of an analysis of the long-term variability for single-layer and total cloud parameters in summer and winter over Western Siberia using MODIS data obtained for the period 2001-2022. Three latitudinal zones of the target region are considered separately: northern ($>60^\circ$ N), transitional ($60-65^\circ$ N), and southern ($<60^\circ$ N). The data products MOD08_M3 (Terra satellite) and MYD08_M3 (Aqua satellite) with spatial resolution $1^\circ \times 1^\circ$ are used as the main information source containing monthly average values of such cloud features as: fraction, optical thickness, waterpath and other. On their basis, the long-term trends of the above parameters were found for the time period under consideration. The Pearson correlation coefficients between some cloud features in different latitudinal zones are given in the report. The results of time series analysis and anomalous outliers for different cloud parameters are discussed by comparing them with the materials of Roshydromet annual assessment reports. In addition, the dependence between cloud features and the variability of the land surface temperature and the amount of precipitation in the target region is discussed.

The work was supported by the Russian Science Foundation (grant No. 21-71-10076, <https://rscf.ru/project/21-71-10076/>).

Регрессионные модели машинного обучения для оценки потоков углерода в северном полушарии по данным ДЗЗ

Розанов А. П.^{1,2} (alexey.rozanov@urfu.ru), Грибанов К.Г.¹

¹Уральский Федеральный Университет, Екатеринбург, Россия

²Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

Среди множества механизмов депонирования углерода, секвестрация в наземных экосистемах, обусловленная процессом фотосинтеза, рассматривается как один из возможных методов борьбы с глобальным изменением климата, вызванным ростом содержания углекислого газа в земной тропосфере. Метод турбулентных пульсаций (англ.: *eddy covariance*) дает возможность получить точечную оценку восходящих и

нисходящих потоков CO_2 в окрестности размером 100 - 2000 м от микрометеорологической станции. Однако для оценки углеродного цикла территорий в региональном масштабе нужны методы с глобальным покрытием. Модели на данных, основанные на алгоритмах машинного обучения, способны решить эту задачу, аппроксимируя точечные наземные наблюдения данными спутникового зондирования тропосферы и подстилающей поверхности и климатического реанализа с заданными пространственными и временными разрешениями. За последнее десятилетие вследствие роста вычислительных мощностей современных компьютеров, количество работ, связанных с оценкой потоков углерода с помощью моделей на данных увеличивалось. В частности, были использованы такие методы, как случайный лес (Random Forest) [1], искусственные нейронные сети (Artificial Neural Networks) [2], метод опорных векторов (Support Vector Machine) [3] и другие. При наличии удовлетворительного объема обучающих примеров, такие модели предоставляют более простой способ получения оценок параметров углеродного цикла, чем физические, построенные на динамическом ядре (системе дифференциальных уравнений в частных производных).

Цель данной работы - исследовать применимость нового алгоритма экстремального градиентного бустинга (xgboost) [4] для задач оценки потоков углерода в экосистемах и сравнить его с искусственной нейронной сетью, типа многослойный перцептрон, как одним из апробированных методов для решения задач оценки потоков углерода.

Для обучения моделей на данных необходимы, два набора данных - тренировочный и тестовый, в которые входят предикторы и целевые переменные.

В ходе данной работы были собраны ряды измерений потоков углерода методом турбулентных пульсаций, предоставленные международной сетью FLUXNET [5], со 180 метеорологических станций в Северном полушарии за период 2000-2014 гг. Для каждой точки извлечены ежедневные значения:

- RECO (экосистемное дыхание, полученное путем расширения ночных наблюдений на весь день);
- NEE (чистый экосистемный обмен, полученный суммированием ежечасных измерений);
- Флагов качества оценки NEE;
- GPP (первичная валовая продукция, рассчитанная из NEE и RECO).

Измерения с флагом качества $\text{NEE} < 0.9$ были исключены из набора данных. Для отобранных точек из сети FLUXNET были получены измерения MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) со спутника NASA Terra в виде двух продуктов: MOD09 CMG [6] и MCD12C1 [7]. Первый представлен ежедневными рядами значений отражательной способности земной поверхности в семи спектральных интервалах и яркостной температуры в четырех других с разрешением 0.05° , второй предоставляет карту земного покрова с тем же пространственным разрешением для 3 различных типов классификации, среди которых была выбрана классификация IGBP (International Geosphere-Biosphere Programme) [8]. Данные реанализа были представлены переменными из продукта ECMWF ERA5-Land [9] в виде компонент ветра, температуры воздуха на высоте 2м, точки росы на высоте 2м, температуры поверхности, уровня осадков за сутки, за 7 и 30 дней, уровня испарения, давления на поверхности, покрытия верхнего и нижнего ярусов растительности, чистого радиационного баланса поверхности за сутки, за 7 и 30 дней. Также в качестве предикторов использованы месяца года.

Обучение и оценка результатов производились с помощью пакетов pytorch [10] и xgboost на языке python. Качество моделей оценивалось с помощью нескольких метрик, таких как коэффициент детерминации (R^2), средняя абсолютная процентная ошибка (MAPE) и средняя квадратичная ошибка (MSE).

Согласно результатам оценки качества моделей на тестовом наборе данных, обе модели демонстрируют высокие коэффициенты детерминации для GPP - $R^2_{ANN}=0.874$ и $R^2_{XGBoost}=0.873$, для RECO - $R^2_{ANN}=0.865$ и $R^2_{XGBoost}=0.875$, для NEE - $R^2_{ANN}=0.761$ и $R^2_{XGBoost}=0.751$.

Исследование выполнено при поддержке Министерства высшего образования и науки РФ (проект №FEUZ-2023-0023).

1. Zeng J. et al. Global terrestrial carbon fluxes of 1999–2019 estimated by upscaling eddy covariance data with a random forest //Scientific data. – 2020. – Т. 7. – №. 1. – С. 313.
2. Yu T., Zhang Q., Sun R. Comparison of machine learning methods to up-scale gross primary production //Remote Sensing. – 2021. – Т. 13. – №. 13. – С. 2448.
3. Zhang C. et al. Mapping CO2 fluxes of cypress swamp and marshes in the Greater Everglades using eddy covariance measurements and Landsat data //Remote Sensing of Environment. – 2021. – Т. 262. – С. 112523.
4. Chen T., Guestrin C. Xgboost: A scalable tree boosting system //Proceedings of the 22nd acm sigkdd international conference on knowledge discovery and data mining. – 2016. – С. 785-794.
5. Pastorello, G., Trotta, C., Canfora, E. et al. The FLUXNET2015 dataset and the ONEFlux processing pipeline for eddy covariance data. Sci Data **7**, 225 (2020). <https://doi.org/10.1038/s41597-020-0534-3>
6. Vermote, E., R. Wolfe. MOD09GA MODIS/Terra Surface Reflectance Daily L2G Global 1km and 500m SIN Grid V006. 2015, distributed by NASA EOSDIS Land Processes DAAC, <https://doi.org/10.5067/MODIS/MOD09GA.006>.
7. Friedl, M., D. Sulla-Menashe. MCD12C1 MODIS/Terra+Aqua Land Cover Type Yearly L3 Global 0.05Deg CMG V006. 2015, distributed by NASA EOSDIS Land Processes DAAC, <https://doi.org/10.5067/MODIS/MCD12C1.006>
8. Loveland T. R., Belward A. S. The international geosphere biosphere programme data and information system global land cover data set (DISCover) //Acta Astronautica. – 1997. – Т. 41. – №. 4-10. – С. 681-689.
9. Muñoz Sabater, J. (2019): ERA5-Land hourly data from 1950 to present. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS). DOI: 10.24381/cds.e2161bac
10. Paszke, A. et al., 2019. PyTorch: An Imperative Style, High-Performance Deep Learning Library. In Advances in Neural Information Processing Systems 32. Curran Associates, Inc., pp. 8024–8035. Available at: <http://papers.neurips.cc/paper/9015-pytorch-an-imperative-style-high-performance-deep-learning-library.pdf>.

Machine learning regression models for carbon fluxes estimation in the northern hemisphere using remote sensing data

A.P. Rozanov^{1,2} (alexey.rozanov@urfu.ru), K.G. Gribanov¹

¹ Ural Federal University, Ekaterinburg, Russia

² ITMO University, Saint Petersburg, Russia

Among plenty of different mechanisms of atmospheric carbon capturing, the process of sequestration in terrestrial ecosystems comes to the fore as one of the most promising techniques for tackling climate change. Eddy covariance algorithm allows measuring upward and downward carbon fluxes in scope of 100 - 2000 m around a tower. However, to obtain carbon budget estimation in scale of a region or continent, it is necessary to have measurements with global coverage. Data-driven models like machine learning (ML) models are capable of solving this task when approximating in situ measurements with remote sensing and climate reanalysis data, which have fixed spatiotemporal resolution. During recent decades the growth of computational capabilities has caused the increase in the number of research on data-driven modeling of carbon fluxes. Particularly, Random Forest (RF) [1], Artificial Neural Networks (ANNs) [2], Support Vector Machine (SVM) [3] and some others were applied and investigated. If there is enough data, these models provide a simpler way of CO₂ fluxes estimation than process-based models, which are built on a system of partial differential equations.

The aim of this work is to investigate the applicability of a relatively new algorithm - extreme gradient boosting (xgboost) [4] for the task of carbon balance estimation and compare with the performance of ANN model (or multilayer perceptron), which is considered as one of the proven methods.

To train a data-driven model it is necessary to have two datasets: train and test which both include feature and target variables.

Time series of carbon fluxes measurements provided by the worldwide network of micro-meteorological stations FLUXNET [5] were collected for 180 points in the Northern Hemisphere for the time period of 2000-2014. Each station was represented with:

- Ecosystem Respiration (RECO) acquired by extending night-time hourly measurements (when photosynthesis stopped) to daily ones;
- Net Ecosystem Exchange (NEE) obtained by summing up hourly instrumental observations;
- NEE quality flags;
- Gross Primary Production (GPP), which is the difference between RECO and NEE.

All observations, where the NEE quality flag was less than 0.9 were excluded. For each selected FLUXNET station two products of Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) on NASA Terra satellite were used: MOD09 CMG [6] и MCD12C1 [7]. The first one is represented by the daily series of the surface spectral reflectance from 7 spectral bands and brightness temperature values from 4 thermal bands with 0.05° spatial resolution. The second product contains several ecosystem classification maps, including International Geosphere-Biosphere Programme [8] which was chosen for this work, with the same spatial resolution. As climate reanalysis data, several ERA5-land [9] variables such as wind components, 2 m air temperature, 2 m dew point temperature, skin temperature, total precipitation for the period of 1d, 7d and 30d, surface net solar radiation for the same time periods, evaporation, surface pressure, high and low vegetation cover were collected. Besides, months of observations were used as predictors as well.

The training and evaluation of the results were accomplished using such python libraries as pytorch [10] и xgboost [4]. The quality of the models was estimated using several metrics: determination coefficient (R^2), Mean Absolute Percentage Error (MAPE) and Mean Squared Error (MSE).

According to the evaluation on the test dataset, both models demonstrated high values of determination coefficient, which was the main metric, for GPP - $R^2_{ANN}=0.874$ and $R^2_{XGBoost}=0.873$, for RECO - $R^2_{ANN}=0.865$ and $R^2_{XGBoost}=0.875$, for NEE - $R^2_{ANN}=0.761$ and $R^2_{XGBoost}=0.751$.

The study was supported by the Ministry of Higher Education and Science of the Russian Federation (Project No. FEUZ-2023-0023).

Применение нейросетевых технологий для восстановления оптической толщины облаков по мультиспектральным данным дистанционного зондирования атмосферы

Русскова Т.В. (btv@iao.ru), Скороходов А.В.

Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, Томск, Россия

В работе рассматривается новый подход к восстановлению оптической толщины разорванной горизонтально-неоднородной облачности, состоящий в использовании результатов имитационного моделирования переноса солнечного излучения в облачной атмосфере и нейросетевых технологий. Общая идея подхода обсуждалась ранее в работах Т. Faure, С. Cornet и др. в качестве возможной альтернативы уже известным

методам решения обратных задач оптики атмосферы, реализующих традиционные способы обращения данных пассивных измерений рассеянной радиации (G. Plass, G. Kattawar, 1968; M. King, 1987; и др.). Среди традиционных методов определения оптической толщины облаков (ОТО) базовым является биспектральный подход, применяемый при обработке данных измерений спектрорадиометра MODIS (S. Platnick и др., 2003). Метод предполагает использование LUT-таблиц с предварительно рассчитанными значениями интенсивности отраженной солнечной радиации в двух спектральных каналах, один из которых включает в себя полосу поглощения излучения водяным паром. Принимаемое при этом приближение независимых пикселей (IPA) (A. Marshak и др., 1998) в предположении плоскопараллельной, горизонтально и вертикально однородной облачности для каждого пикселя спутникового изображения не соответствует реальным облачным реализациям в полной мере. Если пространственное разрешение спутникового сканера не является высоким, а в алгоритме обработки данных используется IPA-приближение, то возникает вопрос о точности восстановления искомым характеристикам в условиях разорванной облачности.

Идея альтернативного метода решения состоит в использовании искусственной нейронной сети, обученной с помощью реалистичных моделей облачных полей и результатов моделирования переноса излучения в облачной атмосфере с учётом всех наиболее значимых факторов. В целях создания отечественного инструмента тематической обработки спутниковых измерений нами была разработана первая версия нейронной сети, способной оперативно решать поставленную задачу. Для моделирования полей горизонтально-неоднородной сплошной и разорванной облачности была реализована фрактальная модель с лежащим в ее основе методом ограниченных каскадов (R.F. Cahalan и др., 1994). Фрактальный подход позволяет учесть изменчивость водозапаса слоисто-кучевых облаков в широком диапазоне его значений, а малопараметричность модели допускает использование ограниченного числа параметров, определяющих уникальные свойства каждой из облачных реализаций. Для сгенерированных таким образом полей облачности были проведены массовые мультиспектральные расчеты интенсивности отраженной солнечной радиации в направлении наблюдения 'в нади́р' с пространственным разрешением 50 м в широком диапазоне значений входных параметров. Сформированная база данных была задействована в обучении нейронной сети, разработанной с помощью интегрированной среды PyCharm и библиотек TensorFlow и Keras. Структура сети включает в себя два скрытых слоя, а в качестве функции активации нейронов используется функция 'ReLU'. Программная реализация процедуры обучения настроена таким образом, что для восстановления ОТО в области целевого пикселя могут быть учтены до 120 смежных пикселей, что в достаточной мере позволяет учесть горизонтальную неоднородность облачного поля. На накопленном на текущий момент статистическом наборе данных величина коэффициента корреляции между истинными и восстановленными значениями ОТО достигает 0.96.

В работе обсуждаются наиболее значимые особенности реализации алгоритма восстановления ОТО, а также предварительные результаты его апробации на данных имитационного моделирования.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 21-71-10076, <https://rscf.ru/project/21-71-10076/>.

Application of neural network technologies to retrieve optical thickness of clouds from multispectral remote sensing data

The paper presents a new approach to retrieve the optical thickness of broken horizontally inhomogeneous clouds, utilizing the results of simulation of solar radiation transfer in a cloudy atmosphere and neural network technologies. The general idea of the approach was discussed earlier in the works of T. Faure, C. Cornet and others as a possible alternative to the already known methods for solving inverse problems of atmospheric optics, which implement traditional methods of inverting data from passive measurements of scattered radiation (G. Plass, G. Kattawar, 1968; M. King, 1987; and others). Among the traditional methods for retrieving the cloud optical thickness (COT), the basic one is the bispectral approach used in the processing of measurement data from the MODIS spectroradiometer (S. Platnick et al., 2003). The method involves the use of LUT-tables with pre-calculated values of the reflected solar radiation intensity in two spectral channels, one of which includes the water vapor absorption band. The independent pixel approximation (IPA) (A. Marshak et al., 1998), implemented in assuming plane-parallel, horizontally and vertically uniform clouds for each pixel of the satellite image, does not fully correspond to real cloud realizations. If the spatial resolution of the satellite scanner is not high, and the IPA approximation is used in the data processing algorithm, then the question arises of the accuracy of retrieving the desired characteristics under broken cloud conditions.

The idea of an alternative solution is to use an artificial neural network trained using realistic models of cloud fields and the results of modeling the radiative transfer in a cloudy atmosphere, taking into account all the most significant factors. With a view to developing a national tool for thematic processing of satellite measurements, we designed the first version of a neural network capable of quickly solving the problem. To simulate the fields of horizontally inhomogeneous continuous and broken clouds, a fractal model was implemented with the underlying method of bounded cascades (R.F. Cahalan et al., 1994). The fractal approach makes it possible to take into account the variability of the water content of stratocumulus clouds in a wide range, and the low-parametric nature of the model allows the use of a limited number of parameters that determine the unique properties of each of the cloud realizations. For the cloud fields generated in this way, mass multispectral calculations of the intensity of reflected solar radiation in the direction of observation 'to the nadir' with a spatial resolution of 50 m were carried out in a wide range of input parameters. The database thus constituted was involved in training a neural network developed using the PyCharm integrated environment and the TensorFlow and Keras libraries. The network structure includes two hidden layers, and the 'ReLU' function is used as the neuron activation function. The software implementation of the training procedure is configured in such a way that up to 120 adjacent pixels can be taken into account to retrieve COT in the region of the target pixel, which sufficiently allows the horizontal inhomogeneity of the cloud field to be taken into consideration. On the currently collected statistical data set, the value of the correlation coefficient between the true and retrieved COT values achieves 0.96.

The paper discusses the most significant features of the implementation of the COT retrieval algorithm, as well as the preliminary results of its testing on simulation data.

The study was supported by the Russian Science Foundation grant No. 21-71-10076, <https://rscf.ru/project/21-71-10076/>.

Тренды общего содержания CO, CH₄ и NO₂ над Евразией на основе орбитальных спектроскопических измерений и результатов численного моделирования

Представлены результаты анализа трендов общего содержания (ОС) CO, CH₄ и NO₂ над Евразией по данным численного моделирования и сопоставления их со спутниковыми измерениями (спектрометры AIRS и OMI) с целью получения количественных оценок отклика состава атмосферы на климатические изменения, а также валидации модельных расчетов. Для вычислений использовалась глобальная транспортно-химическая модель GEOS-Chem версии 12-01 с метеорологией MERRA2 и эмиссиями CEDS (антропогенные), MEGAN (биогенные) и GFED4 (природные пожары).

Результаты сравнения распределений трендов, полученных на основе орбитального зондирования и модельных расчетов для периода 2003 – 2019 гг., позволяют утверждать, что модель воспроизводит региональные тренды общего содержания для всех трех примесей, но в целом завышает оценки относительно измерений. Анализ экспериментальных данных и численных расчетов позволил установить изменения (динамику) трендов ОС CO над всей Евразией после 2008 г.; обнаружено уменьшение скорости убывания или переход к росту. Положительная динамика составляет до 3%/год, в зависимости от сезона и региона. В ряде районов общее содержание CO после 2008 г. начало расти (до 1%/год в осенние месяцы).

ОС CH₄ повсеместно растет, при этом наибольшая скорость роста (до 0.4-0.5%/год) зафиксирована в тропическом и субтропическом поясе Евразии, а также в Северной Европе и Северной Атлантике. Для ОС NO₂ модель качественно воспроизводит тренды по направленности, величине и регионам, а величина рассчитанных трендов несколько превышает оценки на основе орбитальных данных (3%/год против 2–2.5% год для максимальных величин).

Дополнительно в докладе приводятся примеры распределения трендов ОС CO и CH₄ на основе орбитальных данных за более длительный период (по конец 2022 г.), подтверждающие выводы доклада о современных тенденциях изменений состава атмосферы.

Работа выполнена при поддержке РФФ, проект №20-17-00200.

CO, CH₄ and NO₂ total content trends over Eurasia based on orbital spectroscopic measurements and results of numerical simulation

V.S. Rakitin, Yu.A. Shtabkin (yuryshtabkin@gmail.com), N.S. Kirillova, E.I. Fedorova
A.M.Obukhov Institute of Atmospheric Physics RAS, Moscow, Russia

The results of analysis of CO, CH₄ and NO₂ total content (TC) trends over Eurasia are presented based on numerical simulation data and its comparison with satellite measurements (AIRS and OMI spectrometers) in order to obtain quantitative estimates of response in atmospheric composition to climate changes, as well as for model validation. For calculations was used GEOS-Chem global chemical-transport model version 12-01 with MERRA2 meteorology and CEDS (anthropogenic), MEGAN (biogenic) and GFED4 (wildfires) emissions.

The results of trend distributions comparing based on orbital sounding and model calculations for 2003-2019 show the model reproduces regional total content trends for all three impurities, but in general overestimates the results compared to measurements. The analysis of observation data and numerical calculations made it possible to establish changes (dynamics) in CO TC trends over Eurasia after 2008; there was detected a decrease in decrease rate or a transition to growth. The positive dynamics is up to 3%/year, depending on the season

and region. In some areas, the CO TC began to grow after 2008 (up to 1%/year in autumn months).

CH₄ TC is growing everywhere, with the highest growth rate (up to 0.4-0.5%/year) recorded in tropical and subtropical zone of Eurasia, as well as in Northern Europe and North Atlantic. For NO₂ TC, the model reproduces trends qualitatively, but the magnitude of calculated trends slightly exceeds estimates based on orbital data (3%/year versus 2-2.5% year for maximum values).

Additionally, examples of CO and CH₄ TC trends distribution based on orbital data for a longer period (until the end of 2022) are given, confirming the conclusions about current trends in atmospheric composition changes.

This work was supported by RSCF (grant No. 20-17-00200).

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

Председатель: д.ф.-м.н. Тимофеев Ю.М. (СПбГУ, Санкт-Петербург, Россия)

Сопредседатели: д.ф.-м.н. Costas Varotsos (Университет Афин, Афины, Греция), д.ф.-м.н. Фейгин А.М. (ИПФ, Нижний Новгород, Россия)

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

Chairman: Dr. Yu.M. Timofeev (SPbSU, Saint Petersburg, Russia)

Co-chairmen: Dr. Costas Vorotsos (University of Athens, Athens, Greece), Dr. A.M. Feigin (IAP RAS, Nizhny Novgorod, Russia)

Устные доклады

Восстановление вертикального распределения NO₂ в нижней тропосфере по многоугловым спектральным измерениям рассеянной солнечной радиации

Постыляков О.В.¹ (oleg.postylyakov@gmail.com), Шамсутдинов Д.Р.^{1,2}, Боровский А.Н.¹, Чуличков А.И.^{1,2}

¹Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва

²Московский Государственный Университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

Оксиды азота NO_x=NO+NO₂ являются одним из ключевых индикаторов антропогенного загрязнения воздуха, поскольку их основным источником является высокотемпературное горение топлива на объектах промышленности и транспорта. Наряду с приземными измерениями концентраций NO и NO₂ получают распространение наблюдения содержания NO₂ в нижней тропосфере дистанционным методом многоугловой дифференциальной спектроскопии (MAX DOAS). Ранее при решении задачи оценивания вертикального профиля примеси по таким измерениям использовались методы байесовского оценивания [1]. Однако, в большинстве случаев информации для корректного задания функции случайного распределения NO₂ оказывается недостаточно, что приводит к разбросу результатов, получаемых различными группами. Чтобы избежать этого в данной работе предлагается другой подход, состоящий в сужении класса возможных профилей на основе предположения о количестве возможных экстремумов в восстанавливаемом вертикальном распределении NO₂. Так в утренние часы, при высокой вероятности температурных инверсий, можно предполагать наличие нескольких максимумов в распределении примеси. После установления конвективного перемешивания более вероятно распределение NO₂ с одним максимумом. При этом априорная информация об ожидаемом количестве слоев может корректироваться, например, по данным температурного профилемера.

В результате первого этапа обработки наблюдений MAX DOAS получают набор измерений наклонных содержаний NO₂ при углах визирования θ_i , $i=1, \dots, m$

$$\xi(\theta_i) = \int_0^H m(h, \theta_i) n(h) dh + v_i, \quad (1)$$

искаженных шумом v_i . Здесь $m(h, \theta_i)$ - посылная эффективная воздушная масса слоя на высоте h , H - высота слоя NO₂, $n(h)$ - искомая концентрация NO₂ на высоте h . Величины

$m(h, \theta_i)$ вычисляются с использованием линеаризованной модели переноса излучения [2].

После дискретизации схему измерения (1) можно записать в виде $\xi = \mathbf{Mn} + \mathbf{v}$, где ξ , \mathbf{Mn} , \mathbf{v} – векторы размерности m , \mathbf{M} – матрица $m \times N$, переводящая вектор концентраций NO_2 $\mathbf{n} = (n(h_1), \dots, n(h_N))^T$ размерности N в вектор \mathbf{Mn} . Рассмотрим подход, состоящий в существенном сужении класса возможных профилей $\{\mathbf{n}\}$. Будем предполагать, что профиль концентрации представляет собой унимодальную функцию, что означает, что $n(h)$ не убывает на интервале от 0 до некоторой высоты h_c и не возрастает на интервале от h_c до H . Тогда для координат вектора \mathbf{n} выполнены неравенства $n_1 \leq \dots \leq n_c$ и $n_c \geq \dots \geq n_N$. Для оценки вектора \mathbf{n} решим задачу на минимум

$$\min_c \left\{ \min_{n_1 \leq \dots \leq n_c, n_c \geq \dots \geq n_N} \left\{ \max_i \left| \xi_i - \sum_{k=1}^N M_{ik} n_k \right| \right\} \right\} \quad (2)$$

При фиксированном положении высоты максимума концентрации h_c задача на минимум по координатам вектора \mathbf{n} сводится к задаче линейного программирования. Минимизация по c производится перебором $c=1, \dots, N$.

Проверить согласие предположения об унимодальности профиля концентрации NO_2 с результатом измерения можно, если известны ограничения на координаты v_i погрешности измерения. Если $|v_i| \leq \epsilon$, то полученный минимизацией (2) профиль не противоречит результату измерения, если значение минимума (2) не больше, чем ϵ . Если же это условие не выполнено, можно усложнить модель, считая, что профиль концентрации имеет два максимума и один минимум.

В докладе приводятся примеры восстановления вертикального профиля концентрации двуокиси азота для ряда модельных и реальных профилей.

1. Friess, U. et al. Intercomparison of MAX-DOAS vertical profile retrieval algorithms: studies using synthetic data, *Atmos. Meas. Tech.*, 12, 2155–2181, <https://doi.org/10.5194/amt-12-2155-2019>, 2019.
2. О.В. Постыляков. Модель переноса радиации в сферической атмосфере с расчетом послойных воздушных масс и некоторые ее приложения. *Известия РАН, ФАО*, 2004, 40, №3, 314-329.

Retrieval of the vertical distribution of NO_2 in the lower troposphere from MAX DOAS measurements

O.V. Postylyakov¹ (oleg.postylyakov@gmail.com), D.R. Shamsutdinov^{1,2}, A.N. Borovsky¹, A.I. Chulichkov^{1,2}

¹A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics RAS, Moscow, Russia

²M.V. Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

Nitrogen oxides $\text{NO}_x = \text{NO} + \text{NO}_2$ are one of the key indicators of anthropogenic air pollution, since their main source is high-temperature fuel combustion at industrial and transport facilities. Along with surface measurements of NO and NO_2 concentrations, observations of NO_2 content in the lower troposphere by multi-angle differential absorption spectroscopy (MAX DOAS) are gaining ground. Previously, when solving the problem of estimating the vertical profile of an impurity from such measurements, Bayesian estimation methods were used [1]. However, in most cases, information is not enough to correctly set the NO_2 random distribution function, which leads to a scatter in the results obtained by different groups. To avoid this, this paper proposes another approach, which consists in narrowing the class of possible profiles based on the assumption of the number of possible extrema in the reconstructed NO_2 vertical distribution. Thus, in the morning hours, with a high probability of temperature inversions, one can assume the presence of several maxima in the impurity

distribution. Once convective mixing is established, a NO₂ distribution with a single maximum is more likely. In addition, a priori information about the expected number of layers can be corrected, for example, according to the temperature profiler.

As a result of the first stage of processing MAX DOAS observations, a set of the NO₂ slant column depths is obtained at viewing angles θ_i , $i=1, \dots, m$

$$\xi(\theta_i) = \int_0^H m(h, \theta_i) n(h) dh + v_i, \quad (1)$$

distorted by noise v_i . Here, $m(h, \theta_i)$ is the effective air mass factor of the layer at height h , H is the height of the NO₂ near surface layer, $n(h)$ is the desired concentration of NO₂ at height h .

$m(h, \theta_i)$ are calculated using a linearized radiative transfer model [2].

After discretization, the measurement scheme (1) can be written in the form $\xi = \mathbf{Mn} + \mathbf{v}$, where ξ , \mathbf{Mn} , \mathbf{v} are vectors of dimension m , \mathbf{M} is an $m \times N$ matrix converting the NO₂ concentration vector $\mathbf{n} = (n(h_1), \dots, n(h_N))^T$ of dimension N into the vector \mathbf{Mn} . Let us consider an approach consisting in a significant narrowing of the class of possible profiles $\{\mathbf{n}\}$. We will assume that the concentration profile is a unimodal function, which means that $n(h)$ does not decrease in the interval from 0 to some height h_c and does not increase in the interval from h_c to H . Then the inequalities $n_1 \leq \dots \leq n_c$ and $n_c \geq \dots \geq n_N$ are satisfied for the coordinates of the vector \mathbf{n} . To estimate the vector \mathbf{n} , we solve the minimum problem

$$\min_c \left\{ \min_{n_1 \leq \dots \leq n_c, n_c \geq \dots \geq n_N} \left\{ \max_i \left| \xi_i - \sum_{k=1}^N M_{ik} n_k \right| \right\} \right\}. \quad (2)$$

For a fixed position of the concentration maximum height h_c , the problem of minimizing the coordinates of the vector \mathbf{n} is reduced to a linear programming problem. Minimization with respect to c is performed by enumeration of $c=1, \dots, N$.

It is possible to verify the agreement between the assumption about the unimodality of the NO₂ concentration profile and the measurement result if the limitations on the coordinates of the measurement error are known. If $|v_i| \leq \epsilon$, then the profile obtained by minimizing (2) does not contradict the measurement result if the minimum value (2) is not greater than ϵ . If this condition is not met, the model can be complicated by assuming that the concentration profile has two maxima and one minimum.

The report provides examples of reconstructing the vertical profile of nitrogen dioxide concentration for a number of model and real profiles.

1. Friess, U. et al. Intercomparison of MAX-DOAS vertical profile retrieval algorithms: studies using synthetic data, *Atmos. Meas. Tech.*, 12, 2155–2181, <https://doi.org/10.5194/amt-12-2155-2019>, 2019.
2. Postlyakov, O.V. Spherical radiative transfer model with computation of layer air mass factors and some of its applications. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2004, 40(3), 276-290.

Аэрозольное зондирование тропосферы и стратосферы лидарными и аэрологическими технологиями

Балугин Н.В.¹ (horst2007@yandex.ru), Маричев В.Н.², Юшков В. А.¹, Фомин Б.А.¹,
Бочковский Д.А.²

¹ФГБУ Центральная аэрологическая обсерватория Росгидромета, Долгопрудный, Россия

²ФГБУН Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, Томск, Россия

Хорошо известны возможности лидарного метода зондирования атмосферы, а также его ограничения. Наличие облачности заметно снижает возможности дистанционных наблюдений, а перспективы в развитии многоволновости лидарного

зондирования атмосферы ограничиваются сложностью технических решений. Аэрологическое зондирование прямыми методами является всепогодным и хорошо дополняет дистанционные наблюдения. Для зондирования атмосферного аэрозоля применяется зонд обратного рассеяния, который по своему принципу действия подобен лидару – измерения сигнала обратного молекулярного и аэрозольного рассеяния света происходит от бортовых источников излучения. Конструкция прибора реализует измерение обратного рассеяния света из ближней зоны объемом 3 м³, расположенной всего на расстоянии 1-5 метров от излучателя. При этом измеряется температура атмосферы в анализируемом объеме, что позволяет точнее оценивать вклад молекулярного рассеяния света в общий сигнал.

Возможен выбор и установка бортовых источников излучения - светодиодов для пары длин волн следующего номинала: 470, 528, 650, 850 и 940 нм. Полетный прибор укомплектован навигационным модулем и телеметрическим передатчиком, что позволяют выполнять автономные измерения таким аэрологическим прибором-аэрозольный зонд обратного рассеяния (АЗОР).

15-16 марта 2023 года в Томске на базе Института оптики атмосферы СО РАН был проведен совместный аэрозольный лидарно-аэрологический эксперимент. Лидарные измерения проводились в интервале высот от 7 до 50 км, зондом - от 0 до 30 км. Получены вертикальные профили отношения рассеяния на длинах волн 355 и 532 нм (лидар) и 470, 528, 850, 940 нм (зонд). Продемонстрировано хорошее согласие в полученных вертикальных профилях значения отношения обратного рассеяния R(H) для близких длин волн (528 и 532 нм для АЗОР и лидара, соответственно). Для восстановления микрофизических параметров аэрозоля при проведении совместных лидарно-баллонных экспериментов показана возможность расширения 2-х волновых (353 и 532 нм) лидарных измерений дополнительным набором длин волн (470, 850, 940 нм) с помощью оптического баллонного аэрозольного зонда

Согласованность лидарных и баллонных измерений обратного рассеяния для близких длин волн дает возможность рассматривать АЗОР как мобильное средство для сравнения работ лидаров, расположенных в различных географических точках. Современная элементная база позволяет создать многоволновой зонд, работающий одновременно на 5-6 длинах волн (457, 530, 590, 630, 850, 940 нм), что может быть использовано для определения микрофизических характеристик аэрозоля.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-27-00057, <https://rscf.ru/project/23-27-00057>

Aerosol sounding of the troposphere and stratosphere by lidar and aerological technologies

N.V. Balugin¹ (horst2007@yandex.ru), V.N. Marichev², V.A. Yushkov¹, B.A. Fomin¹, D.A. Bochkovskiy²

¹ Federal State Budgetary Institution Central Aerological Observatory of Roshydromet, Dolgoprudny

² V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics SB RAS (IOA SB RAS), Tomsk

The capabilities of the lidar method of atmospheric sounding, as well as its limitations, are well known. The presence of clouds significantly reduces the possibilities of remote observations, and the prospects for the development of multi-wave lidar sensing of the atmosphere are limited by the complexity of technical solutions. Aerological sensing by direct methods is all-weather and complements remote observations well. To probe atmospheric aerosol, a backscattering sonde is used, which is similar in its principle of operation to lidar –

measurements of the signal of reverse molecular and aerosol light scattering come from onboard radiation sources. The design of the device implements the measurement of backscattering of light from the near zone with a volume of 3 m^3 , located only at a distance of 1-5 meters from the emitter. At the same time, the temperature of the atmosphere in the analyzed volume is measured, which makes it possible to more accurately assess the contribution of molecular light scattering to the overall signal.

It is possible to select and install onboard radiation sources - LEDs for a pair of wavelengths of the following nominal values: 470, 528, 650, 850 and 940 nm. The flight instrument is equipped with a navigation module and a telemetry transmitter, which allows performing autonomous measurements with such an aerological device -an aerosol backscattering sonde (AZOR).

On March 15-16, 2023, a joint aerosol lidar-aerological experiment was conducted in Tomsk on the basis of the Institute of Atmospheric Optics SB RAS. Lidar measurements were carried out in the range of heights from 7 to 50 km, with a probe - from 0 to 30 km. Vertical profiles of the scattering ratio at wavelengths of 355 and 532 nm (lidar) and 470, 528, 850, 940 nm (sonde) were obtained. A good agreement was demonstrated in the obtained vertical profiles of the backscattering ratio $R(H)$ for close wavelengths (528 and 532 nm for AZOR and lidar, respectively). To restore the microphysical parameters of the aerosol during joint lidar-balloon experiments, the possibility of expanding 2-wave (353 and 532 nm) lidar measurements with an additional set of wavelengths (470, 850, 940 nm) using an optical balloon aerosol sonde is shown.

The consistency of lidar and balloon backscattering measurements for close wavelengths makes it possible to consider AZOR as a mobile tool for comparing the work of lidars located in different geographical locations. The modern element base allows you to create a multi-wave probe operating simultaneously at 5-6 wavelengths (457, 530, 590, 630, 850, 940 nm), which can be used to determine the microphysical characteristics of the aerosol. The research was carried out at the expense of the grant of the Russian Science Foundation No. 23-27-00057, <https://rscf.ru/project/23-27-00057>.

Мониторинг прозрачности атмосферы в темное время суток по данным оптических инструментов Национального Гелиогеофизического комплекса

Белецкий А.Б.(beletsky@iszf.irk.ru), Сыренова Т.Е., Тащилин М.А., Васильев Р.В., Татарников А.В., Щеглова Е.С
ИСЗФ СО РАН, Иркутск, Россия

В настоящее время данные дистанционного зондирования Земли из космоса — это единственный надёжный источник информации о глобальном поле облачности. Эти сведения могут быть использованы для изучения изменчивости характеристик облачности различных типов в течение суток. Однако для таких методов актуальной является проблема интерпретации данных, полученных в ночное время, из-за отсутствия информации в видимом диапазоне спектра. Это исключает возможность надёжного визуального дешифрования спутниковых снимков в темное время суток [Волкова, 2013]. В настоящей работе рассматривается возможность мониторинга облачности и прозрачности атмосферы в темное время суток с помощью существующих наземных широкоугольных оптических систем, предназначенных для регистрации собственного излучения атмосферы Земли. Контроль прозрачности атмосферной толщи в ночное время позволит дополнить данные дневных измерений, проводимых, например, с помощью солнечных фотометров CIMEL международной сети Aeronet (<https://aeronet.gsfc.nasa.gov/>), и

позволит проводить круглосуточный мониторинг облачности и содержания аэрозоля в атмосфере наземными методами.

Существование аэрозоля на разных высотах атмосферы может влиять на спектральное распределение сумеречного и ночного свечения атмосферы за счет составляющей непрерывного фона, зависящего от состояния атмосферы и образующегося в результате многократно рассеянной солнечной радиации. В случае выделения сплошного спектра собственного излучения верхней атмосферы анализ составляющей непрерывного фона целесообразно проводить с учетом динамики аэрозольных образований и оптических характеристик нижней атмосферы [Михалев и др., 2007]. В работе [Михалев и др., 2019] с использованием ранее полученных спектральных характеристик АОТ и влагосодержания атмосферы проведен анализ влияния атмосферного аэрозоля на результаты наземных наблюдений собственного излучения верхней атмосферы в эмиссионных линиях атомарного кислорода [OI] 557.7 и 630.0 нм. Отмечается спектральная зависимость коэффициентов корреляции между интенсивностями эмиссий 557.7, 630,0 и АОТ и выявлен ее нелинейный характер: рост коэффициентов корреляции при малых значениях АОТ (до 0,5) и спад при больших замутнениях. В работах [Михалев и др., 2007; Михалев и др., 2019] данные прозрачности атмосферы были получены с помощью солнечного фотометра и, в общем случае, могут не отражать динамики аэрозоля в темное время суток.

В работе представлены результаты расчета атмосферного поглощения в темное время суток на основе данных широкоугольных оптических систем Национального Гелиогеофизического комплекса (НГК) за 2021-2023 гг. Методика основана на определении интенсивности идентифицированных звезд с разными углами места и в дальнейшем расчету по методам Бугера и Никонова [Миронов, 2008]. Обсуждается предполагаемая точность методики и возможность ее применения для экологического мониторинга и для внесения поправок при регистрации собственного излучения верхней атмосферы Земли.

Работа выполнена в рамках гранта № 075-15-2020-787 Министерства науки и высшего образования РФ на выполнение крупного научного проекта по приоритетным направлениям научно-технологического развития (проект «Фундаментальные основы, методы и технологии цифрового мониторинга и прогнозирования экологической обстановки Байкальской природной территории»).

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. Р. В. Васильев, М. Ф. Артамонов, А. Б. Белецкий, Жеребцов Г.А., Зоркальцева О.С., Комарова Е.С., Медведева И.В., Михалёв А.В., Подлесный С.В., Ратовский К.Г., Сыренова Т.Е., Тащилин М.А., Ткачев И.Д. Научные задачи оптических инструментов национального гелиогеофизического комплекса // Солнечно-земная физика. – 2020. – Т. 6. – № 2. – С. 105-122. – DOI 10.12737/szf-62202008. – EDN MIKJNS.
3. А.В. Михалев, М.А. Тащилин, С.М. Сакерин Влияние атмосферного аэрозоля на результаты наземных наблюдений излучения верхней атмосферы // Оптика атмосферы и океана. 2019. Т. 32. № 03. С. 202–207.
4. А.В. Михалев, М.А. Тащилин Некоторые задачи солнечно-земной физики, связанные с образованием и динамикой атмосферного аэрозоля. // Оптика атмосферы и океана. – 2007. – Т. 20. - № 06. - С. 555-558.
5. А.В. Миронов Основы астрофотометрии. Практические основы фотометрии и спектрофотометрии звезд.//М. Физматлит, ISBN 978-5-9221-0935-2, 2008 г.

Monitoring of atmospheric transparency in the dark time according to the data of Optical Instruments of the National Heliogeophysical Complex

A.V. Beletsky(beletsky@iszf.irk.ru), T.E. Syrenova, M.A. Tashilin, R.V. Vasiliev, A.V. Tatarnikov, E.S. Sheglova

At present, Earth remote sensing data from space is the only reliable source of information about the clouds field. This information can be used to study the variability of cloudiness characteristics of various types during the day. However, for such methods, the problem of interpreting data obtained at night is relevant due to the lack of information in the visible range of the spectrum. This excludes the possibility of reliable visual decoding of satellite images at night [Volkova, 2013]. In this paper, we consider the possibility of monitoring the cloudiness and transparency of the atmosphere at night using the existing ground-based wide-angle optical systems designed to record the airglow. Monitoring the transparency of the atmospheric thickness at night will make it possible to supplement the data of daytime measurements carried out, for example, using CIMEL solar photometers of the Aeronet international network (<https://aeronet.gsfc.nasa.gov/>), and will allow round-the-clock monitoring of cloudiness and aerosol content in the atmosphere ground methods.

The existence of an aerosol at different altitudes of the atmosphere can affect the spectral distribution of the twilight and night airglow due to the continuous background component, which depends on the state of the atmosphere and is formed as a result of multiply scattered solar radiation. In the case of separating a continuous spectrum of the airglow, it is advisable to take into account the component of the continuous background, taking into account the dynamics of aerosol formations and the optical characteristics of the lower atmosphere [Mikhalev et al., 2007]. In [Mikhalev et al., 2019], using the previously obtained spectral characteristics of the AOT and the moisture content of the atmosphere, an analysis was made of the influence of atmospheric aerosol on the results of ground-based observations of the airglow in the emission lines of atomic oxygen [OI] 557.7 and 630.0 nm. A spectral dependence of the correlation coefficients between the emission intensities of 557.7, 630.0 and AOT is noted, and its non-linear nature is revealed: an increase in the correlation coefficients at low AOT values (up to 0.5) and a decrease at high turbidity. In [Mikhalev et al., 2007; Mikhalev et al., 2019] the atmospheric transparency data were obtained using a solar photometer and, in the general case, may not reflect the aerosol dynamics in the dark time.

The paper presents the results of calculating the atmospheric absorption at night based on the data of wide-angle optical systems of the National Heliogeophysical Complex (NGC) for 2021-2023. The technique is based on determining the intensity of identified stars with different elevation angles and further calculation using the Bouguer and Nikonov methods [Mironov, 2008]. The expected accuracy of the technique and the possibility of its application for environmental monitoring and for making corrections when registering the airglow are discussed.

The work was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, the grant No. 075-15-2020-787 for implementation of Major scientific projects on priority areas of scientific and technological development (the project «Fundamentals, methods and technologies for digital monitoring and forecasting of the environmental situation on the Baikal natural territory»).

**Первые результаты измерений содержания NO₂ в приземном слое атмосферы в г.
Кисловодске
методом MAX-DOAS**

Боровский А.Н. (alexander.n.borovski@gmail.com), Постыляков О.В., Елохов А.С., Сеник И.А.
Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия

Одной из наиболее серьезных современных экологических проблем является загрязнение атмосферы. Как следствие, ухудшается качество воздуха, изменяется

радиационный режим и климат Земли. Большое количество источников загрязняющих веществ располагается в городах. Интенсивные эмиссии загрязняющих веществ от городов влияют не только на качество воздуха в самих городах, но и далеко за их пределами. Возникает необходимость в выявлении источников загрязнения воздуха, проведении оценки или уточнения эмиссий загрязняющих веществ от различных предприятий, оценке совокупного антропогенного влияния на качество воздуха. Для решения этих задач требуется разработка методов и прецизионной аппаратуры для проведения качественных измерений содержания в нижних слоях атмосферы примесей-индикаторов интенсивности химических процессов.

Контроль качества воздуха, поиск и анализ источников загрязнения воздуха особенно важен для курортных районов. Одним из крупнейших российских бальнеологических и горноклиматических курортов государственного значения является г. Кисловодск, который находится в особо охраняемом эколого-курортном регионе Кавказских Минеральных Вод.

В апреле 2022 года в г. Кисловодске установлен прибор, который позволяет проводить измерения содержания примесей в приземном слое атмосферы методом многоугловой дифференциальной спектроскопии (MAX DOAS). Прибор состоит из двух блоков: блок управления измерениями и блок ввода излучения. Блок управления расположен в помещении и состоит персонального компьютера и двух спектрометров, регистрирующих интенсивности в ближней УФ (300-450 нм) и видимой (420-560 нм) областях спектра. Блок ввода излучения расположен под открытым небом и оснащён двумя двигателями, которые позволяют сканировать небосвод по углу места и азимуту без слепых зон. Измерения спектров интенсивности рассеянного солнечного излучения проводятся под несколькими малыми углами возвышения телескопа прибора над горизонтом. Такая геометрия повышает чувствительность измерений к содержанию примеси в нижней тропосфере. Проведение таких измерений позволяет решить обратную задачу, связанную с определением вертикального распределения газов в нижней тропосфере. Такие измерения проводятся при нескольких выбранных фиксированных азимутах. Это предоставляет возможность для попытки восстановления пространственного распределения примеси не только по вертикали, но и по горизонтали. Поле зрения телескопа прибора по вертикали составляет 0.3° , по горизонтали – 0.8° .

Одной из важнейших примесей-индикаторов интенсивности химических процессов является двуокись азота, которая играет важную роль в химии атмосферы, в частности, в процессах, связанных с образованием и разрушением озона. В работе приведены первые результаты измерений интегрального содержания двуокиси азота в г. Кисловодске, полученные с использованием нового прибора.

Для проведения измерений было выбрано несколько характерных направлений сканирования. Предполагалось, что повышенное содержание будет наблюдаться в направлении на районы города с повышенной интенсивностью автотранспорта. В докладе приведены примеры сравнения содержания двуокиси азота в наклонном столбе атмосферы, которые получены при нескольких выбранных азимутах.

First MAX-DOAS measurements of NO₂ content in the lower troposphere in Kislovodsk

A.N. Borovski (alexander.n.borovski@gmail.com), O.V. Postilyakov, A.S. Elokhov, I.A. Senik
A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics of the RAS, Moscow, Russia

One of the most serious modern environmental problems is atmospheric pollution. As a result, the air quality deteriorates, the radiation regime and the Earth's climate change. A large

number of sources of pollutants are located in cities. Intensive emissions of pollutants from cities affect not only the air quality in the cities themselves, but also far beyond their borders. Therefore it is necessary to identify sources of air pollution, to assess or clarify emissions of pollutants from various enterprises, to assess the cumulative anthropogenic impact on air quality. To solve these problems, it is necessary to develop methods and high-precision instruments for qualitative measurements of content of traces which are indicators of the intensity of chemical processes.

Air quality control, identification and analysis of air pollution sources is especially important for resort areas. One of the largest Russian balneological and mountain climatic resorts of national importance is the city of Kislovodsk, which is located in the specially protected ecological and resort region of the Caucasian Mineral Waters.

In April 2022, an instrument was installed in Kislovodsk that allows measurements of the content of impurities in the atmospheric boundary layer by the method of multi-axis differential optical absorption spectroscopy (MAX-DOAS). The device consists of two units: a measurement control unit and a radiation input unit. The control unit is located indoors and consists of a personal computer and two spectrometers that register intensities in the near UV (300-450 nm) and visible (420-560 nm) spectral regions. The radiation input unit is located in the open air and is equipped with two motors that allow to scan the elevation and azimuth without blind spots. Measurements of the intensity spectra of scattered solar radiation are carried out at several small angles of elevation of the instrument telescope above the horizon. This geometry increases the sensitivity of measurements to the trace content in the lower troposphere. Such measurements make it possible to solve the inverse problem of determining the vertical distribution of gases in the lower troposphere. Such measurements are carried out at several selected fixed azimuths. This makes it possible to attempt to retrieve the spatial distribution of the trace content not only vertically, but also horizontally. The field of view of the instrument's telescope is 0.3° vertically, 0.8° horizontally.

One of the most important traces-indicators of the intensity of chemical processes is nitrogen dioxide, which plays an important role in atmospheric chemistry, in particular, in the processes associated with the formation and destruction of ozone. Here we presents the first results of measurements of the integral content of nitrogen dioxide in Kislovodsk, obtained using a new device.

Several specific azimuth directions were selected for the elevation scanning. It was assumed that the increased content of NO₂ would be observed in the direction of areas of the city with increased traffic intensity. Here we provides examples of comparing the slant column densities of nitrogen dioxide, which were obtained at several selected azimuths.

Оптические характеристики облаков верхнего яруса по данным лазерного поляризационного зондирования 2009–2023 гг. в Томске

Брюханов И.Д.^{1,2} (plyton@mail.tsu.ru), Кучинская О.И.¹, Ни Е.В.¹, Пензин М.С.¹, Животенюк И.В.¹, Дорошкевич А.А.¹, Кириллов Н.С.¹, Стыкон А.П.¹, Самохвалов И.В.¹

¹Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия

²Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, Томск, Россия

Облака являются важнейшим фактором климатической системы Земли, влияющим на количество солнечной энергии, поступающим к её поверхности. Ошибки определения оптических и микрофизических характеристик облаков приводят к неточностям расчётов радиационных потоков и оценок тенденций изменений климата. Облака верхнего яруса (ОВЯ) играют общепризнанно важную роль в образовании климата (например, [1–2]). Они

состоят, в основном, из частиц льда несферических форм [3], имеющих, при определённых условиях, преимущественно горизонтальную ориентацию. Она является причиной аномального (зеркального) обратного рассеяния оптического излучения, падающего на грани частиц по нормали [4] – облака, проявляющие это свойство, получили название зеркальных.

В существующих моделях атмосферы (включая глобальную модель Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды и глобальную оперативную модель ПЛАВ (ПолуЛагранжева, основанная на уравнении Абсолютной завихренности) Гидрометцентра РФ), особенности микроструктуры ОВЯ не учитываются. Как правило, используется понятие «эффективного радиуса», основанное на равенстве одной из характеристик частиц и некоторой модельной сферы [5]. Это упрощение позволяет использовать теорию Ми при расчёте радиационных характеристик ОВЯ, но, по-видимому, является грубым и приводит к ошибкам в синоптических и климатических прогнозах.

В Томском государственном университете (ТГУ) с 2009 г. систематически выполняются эксперименты по поляризационному лазерному зондированию ОВЯ. Высотный матричный поляризационный лидар ТГУ, благодаря оригинальным техническим решениям, обеспечивает получение вертикальных профилей всех 16-ти элементов матриц обратного рассеяния света облаков (например, [6]). К настоящему моменту массив экспериментальных данных, накопленных с декабря 2009 г. по апрель 2023 г. объединяет результаты более 3100 серий измерений (более 797 часов). ОВЯ регистрировались при отсутствии облаков нижних ярусов в течение 1329 серий (около 354 часов). Результаты экспериментов сопоставляются с вертикальными профилями метеорологических величин, полученных по данным аэрологического зондирования [7] и реанализа Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды ERA5 [8]. В докладе приводятся результаты анализа накопленного массива данных, приводятся оценки повторяемости оптических характеристик ОВЯ и метеорологических характеристик формирования зеркальных ОВЯ.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, Грант № 21-72-10089.

1. Кондратьев К.Я. // Метеорология и гидрология. 2004. №4. С. 93–119.
2. Neysfield A.J. // Meteor. Monogr. 2017. V. 58. P. 2.1–2.26.
3. Радиационные свойства перистых облаков / Под ред. Е.М. Фейгельсон. М.: Наука, 1989. – 223 с.
4. Морозов А.М. и др. // Оптика атмосферы и океана. 2017. Т. 30, №1. С. 88–92.
5. Дмитриева-Араго Л.Р. и др. // Труды Гидрометцентра России. 2017. №363. С. 19–34.
6. Брюханов И.Д. и др. // Оптика атмосферы и океана. 2021. Т. 34, №4. С. 272–279.
7. University of Wyoming. URL: <http://weather.uwyo.edu>.
8. Copernicus Climate Data Store. URL: <https://cds.climate.copernicus.eu>.

Optical characteristics of high-level clouds in Tomsk according to the 2009–2023 laser polarization sensing data

I.D. Bryukhanov^{1,2} (plyton@mail.tsu.ru), O.I. Kuchinskaya¹, E.V. Ni¹, M.S.Penzin¹, I.V. Zhivotenyuk¹, A.A. Doroshkevich¹, N.S. Kirillov¹, A.P. Stykon¹, I.V. Samokhvalov¹

¹National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia

²V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics SB RAS, Tomsk, Russia

Clouds are the most important factor in the Earth's climate system, which affects the amount of solar energy reaching its surface. Errors in determining the optical and microphysical characteristics of clouds lead to inaccurate calculations of radiation fluxes and estimates of climate trends. High-level clouds (HLCs) play a generally recognized important role in climate formation (e.g., [1–2]). They consist mainly of non-spherical ice particles [3], which have, under

certain conditions, a preferred horizontal orientation. It is the reason of anomalous (specular) backscattering of optical radiation falling normally on the particle faces [4]. Clouds exhibiting this property were called specular clouds.

In the existing atmospheric models (including the global model developed at the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts and the SL-AV (Semi-Lagrangian, based on the Absolute Vorticity equation) global model of the Hydrometcentre of Russia), the HLC special features microstructure are not considered. As a rule, the notion of "effective radius", based on the equality of one of the particle characteristics and some model sphere, is used [5]. This simplification allows the Mie theory to be used when calculating the HLC radiation characteristics, but is apparently crude and leads to errors in synoptic and climatic forecasts.

In the Tomsk State University (TSU), experiments on polarization laser sensing of HLCs are performed systematically from 2009. The TSU high-altitude matrix polarization lidar, due to its original technical solutions, provides vertical profiles of all 16 elements of the backscattering phase matrices of clouds (e.g., [6]). To date, the experimental data array accumulated from December 2009 to April 2023 contains the results of more than 3100 series of measurements (more than 797 hours). The HLCs were registered in the absence of low-level clouds during 1329 series (about 354 hours). The experimental results are compared with the vertical profiles of meteorological parameters obtained from the data of radiosonde sensing [7] and reanalysis of the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts ERA5 [8]. In the present report, the results of the analysis of the accumulated data array are presented, and the estimates of the repeatability of HLC optical characteristics and the meteorological characteristics of specular HLC formation are given.

The work was performed with the financial support of the Russian Science Foundation, Grant No. 21-72-10089.

1. Kondratyev K.Ya. // Meteorolog. Gidrolog. 2004. No. 4. P. 93–119.
2. Heymsfield A.J. // Meteor. Monogr. 2017. V. 58. P. 2.1–2.26.
3. Radiative Properties of Cirrus Clouds / E.M. Feigelson eds. Nauka, Moscow, 1989.
4. Morozov A.M., et al. // Opt. Atm. Okeana. 2017. V. 30, No. 1. P. 88–92.
5. Dmitrieva-Arrago L.R., et al. // Trudy Gidromet. Rossii. 2017. No. 363. P. 19–34.
6. Bryukhanov I.D., et al. // Opt. Atm. Okeana. 2021. V. 34, No. 4. P. 272–279.
7. University of Wyoming. URL: <http://weather.uwyo.edu>.
8. Copernicus Climate Data Store. URL: <https://cds.climate.copernicus.eu>.

Наземные и спутниковые исследования климатические и экологически важных атмосферных газов в ЛГУ и СПбГУ

Тимофеев Ю.М. (y.timofeev@spbu.ru), Поберовский А.В., Поляков А.В., Виролайнен Я.А.,
Неробелов Г.М., Филиппов Н.Н., Имхасин Х., Никитенко А., А.
Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

Газовый состав атмосферы Земли играет важную роль в формировании погоды, климата и экологии окружающей среды. В связи с этим созданы разнообразные системы мониторинга различных климатически и экологически атмосферных газов (КЭАГ), основанные на локальных и дистанционных методах измерений и использование различных типов приборов и геометрий измерений. В настоящее время проводятся регулярные наземные, самолетные, аэростатные и спутниковые измерений КЭАГ. Список АГ очень широк и включает парниковые газы, озон и озоноразрушающие газы и большое число газов-загрязнителей.

Приведена краткая история измерений КЭАГ в ЛГУ и СПбГУ, начатых профессором физического факультета Родионовым С.Ф в 1939 году на Кавказе, продолженных под руководством академика Кондратьева К.Я на кафедре физики атмосферы (60-80-ые годы

прошлого столетия). Регулярные наземные спектроскопические измерения КЭАГ были начаты в 1990 году, а с 2009 года с помощью фурье спектрометра Брукер высокого спектрального разрешения. Эти измерения позволяют определять общие содержания более 20 КЭАГ, а также (для некоторых газов) элементов вертикальных профилей ряда КЭАГ (O₃, CO₂, HNO₃ и т.д.)

Первые спутниковые измерения были осуществлены К.Я. Кондратьевым и сотрудниками с участием космонавтов, а позднее на станции «МИР» и спутнике «Метеор». С 2014 года глобальные исследования КЭАГ осуществлялись с помощью российского фурье спектрометра ИКФС-2. на спутнике «Метеор-2М».

В докладе приведен краткий обзор важнейших результатов наземных и спутниковых измерений, полученных в СПбГУ.

Ground-based and satellite studies of climatic and environmentally important atmospheric gases at LSU and SPbSU.

Yu.M. Timofeev (y.timofeev@spbu.ru), A.V. Poberovsky, A.V. Polyakov, Ya.A. Virolainen, G.M. Nerobelov, N.N. Filippov, H. Imhasin, A.A. Nikitenko.
Saint Petersburg State University, Saint Petersburg, Russia

The gas composition of the Earth's atmosphere plays an important role in the formation of weather, climate and environmental ecology. In this regard, a variety of monitoring systems for various climatically and environmentally atmospheric gases (CEAG) based on local and remote measurement methods and the use of different types of instruments and measurement geometries have been established. Regular ground-based, airborne, balloon and satellite measurements of CEAGs are currently carried out. The list of AGs is very broad and includes greenhouse gases, ozone and ozone-depleting gases and a large number of pollutant gases.

A brief history of CEAG measurements at Leningrad State University and St. Petersburg State University is given, started by S. F. Rodionov, professor of the Physics Department, in 1939 at the Caucasus, and continued under the leadership of Academician K. Ya. Kondratyev at the Atmospheric Physics Department (60-80s of the last century). Regular ground-based spectroscopic measurements of CEAG were started in 1990, and since 2009 using a high spectral resolution Fourier spectrometer Bruker. These measurements make it possible to determine the total contents of more than 20 CEAGs, as well as (for some gases) the vertical profile elements of a number of CEAGs (O₃, CO₂, HNO₃, etc.)

The first satellite measurements were carried out by K.Ya. Kondratyev and collaborators with the participation of cosmonauts, and later on the MIR station and the Meteor satellite. Since 2014 global studies of CEAG have been carried out with the Russian Fourier spectrometer IKFS-2. on the Meteor-2M satellite

The report gives a brief overview of the most important results of ground-based and satellite measurements obtained in SPbSU.

Распространение импульсов лазерного излучения в тонких облачных слоях

Илюшин Я.А. (ilyushin@phys.msu.ru), Хунли Чжао
Московский Государственный Университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

В данной работе исследуется распространение импульсного светового пучка в слое рассеивающей среды. Компьютерное моделирование распространения лазерного импульса в рассеивающем плоском облачном слое в различных направлениях проводится

прямым численным решением векторного и скалярного уравнения переноса излучения конечно разностным методом и методом Монте-Карло соответственно. На основе анализа результатов моделирования выведены эмпирические закономерности, описывающие динамику рассеянного светового поля в слое среды. Исследованы различные направления распространения лазерных импульсов, в т.ч. по нормали к границам плоскопараллельного слоя, а также в толще слоя параллельно им. В отдельных частных случаях построены аналитические модели, описывающие указанную динамику на уровне полуколичественного соответствия [1,2]. Полученные результаты могут оказаться полезными в связи с развитием техники летательных аппаратов, в т.ч. беспилотных, обеспечивающих возможность проведения дистанционного зондирования облаков и осадков импульсным и непрерывным лазерным излучением в широком диапазоне углов и направлений.

Работа выполнена с использованием оборудования Центра коллективного пользования сверхвысокопроизводительными вычислительными ресурсами МГУ имени М.В. Ломоносова [3].

1. Ilyushin Y. A. Transient polarized radiative transfer in cloud layers: numerical simulation of imaging lidar returns // Journal of the Optical Society of America A: Optics and Image Science, and Vision. — 2019. — Vol. 36, no. 4. — P. 540–548.
2. Ilyushin Y. A. Dynamic backscattering halo of pulsed laser beams in thin cloud layers // Radiophysics and Quantum Electronics (English Translation of Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Radiofizika). — 2019. — Vol. 62, no. 3. — P. 192–199.
3. Vl. Voevodin, A. Antonov, D. Nikitenko, P. Shvets, S. Sobolev, I. Sidorov, K. Stefanov, Vad. Voevodin, S. Zhumatiy: Supercomputer Lomonosov-2: Large Scale, Deep Monitoring and Fine Analytics for the User Community. In Journal: Supercomputing Frontiers and Innovations, Vol.6, No.2 (2019). pp.4–11. DOI:10.14529/jsfi190201

Laser pulse propagation in thin cloud layers

Ya.A. Ilyushin (ilyushin@phys.msu.ru), Hongli Zhao
M.V. Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

In this paper, we study the propagation of a pulsed light beam in a layer of a scattering medium. Computer simulation of the propagation of a laser pulse in a scattering flat cloud layer in different directions is carried out by direct numerical solution of the vector and scalar radiative transfer equations by the finite difference method and the Monte Carlo method, respectively. Based on the analysis of the simulation results, empirical regularities are derived that describe the dynamics of the scattered light field in the medium layer. Various directions of propagation of laser pulses were studied, including along the normal to the boundaries of the plane-parallel layer, as well as in the thickness of the layer parallel to them. In some special cases, analytical models have been constructed that describe the indicated dynamics at the level of semi-quantitative correspondence [1, 2]. The results obtained may be useful in connection with the development of aircraft technology, incl. unmanned, providing the possibility of remote sensing of clouds and precipitation by pulsed and continuous laser radiation in a wide range of angles and directions.

The research is carried out using the equipment of the shared research facilities of HPC computing resources at Lomonosov Moscow State University [3].

1. Ilyushin Y. A. Transient polarized radiative transfer in cloud layers: numerical simulation of imaging lidar returns // Journal of the Optical Society of America A: Optics and Image Science, and Vision. — 2019. — Vol. 36, no. 4. — P. 540–548.
2. Ilyushin Y. A. Dynamic backscattering halo of pulsed laser beams in thin cloud layers // Radiophysics and Quantum Electronics (English Translation of Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Radiofizika). — 2019. — Vol. 62, no. 3. — P. 192–199.
3. Vl. Voevodin, A. Antonov, D. Nikitenko, P. Shvets, S. Sobolev, I. Sidorov, K. Stefanov, Vad. Voevodin, S. Zhumatiy: Supercomputer Lomonosov-2: Large Scale, Deep Monitoring and Fine Analytics for the User Community. In Journal: Supercomputing Frontiers and Innovations, Vol.6, No.2 (2019). pp.4–11. DOI:10.14529/jsfi190201

Возможности определения физических параметров ледяной поверхности Галилеевых спутников Юпитера по данным субмиллиметровой радиометрии.

Илюшин Я.А.¹ (ilyushin@phys.msu.ru), Хартог П.²

¹Московский Государственный Университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

²Институт исследований солнечной системы, Геттинген, Германия

В докладе рассматривается вопрос о дистанционном зондировании ледяных поверхностей Галилеевых спутников Юпитера. Исследуются возможности определения физических параметров поверхности по данным субмиллиметровой радиометрии. Показано, что параметры модели не всегда могут быть определены из данных поляризационной радиометрии, но некоторые их комбинации могут быть однозначно идентифицированы. Поляризованный перенос излучения в пористом льду с потерями моделируется численно. Байесовский алгоритм поиска максимального правдоподобия был разработан и протестирован на смоделированных данных в широком диапазоне изменения параметров модели. Дисперсии оценок параметров вычислены с помощью границ Крамера-Рао. Выявлено, что эффективный размер рассеивателя можно надежно определить в диапазоне значений, где параметр асимметрии рассеяния однозначно зависит от волнового параметра и при относительно высоких значениях альбеда однократного рассеяния, при которых существенно рассеяние в среде. Аналогичным образом устанавливаются области надежного определения альбеда однократного рассеяния и глубины теплового скин-слоя.

1. Ilyushin Y. A., Hartogh P. Submillimeter wave instrument radiometry of the Jovian icy moons // *Astronomy and Astrophysics*. — 2020. — Vol. 644. — P. A24–A24.

Possibilities of determining the physical parameters of the ice surface of the Galilean moons of Jupiter from submillimeter radiometry data

Y. A. Ilyushin (ilyushin@phys.msu.ru), P. Hartogh

¹*M.V. Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia*

²*Institute for Solar System Research, Göttingen, Germany*

The issue of remote sensing of the surfaces of Galilean icy moons is addressed in the proposed talk. We investigate the prospects for retrieval of the physical parameters of the Jovian icy moons surface from the submillimeter wave radiometry data.

It is shown that the model parameters could not be completely retrieved from the polarized radiometry data, but some of their combinations can be effectively constrained.

The polarized radiative transfer in lossy porous ice is simulated numerically. A Bayesian maximum likelihood retrieval algorithm was developed and tested on the simulated data in a wide range of variation of the model parameters. The uncertainty of the retrievals is evaluated with the Cramer-Rao bounds. These combinations of the model parameters, which can be effectively constrained from the measured data, are established.

It has been revealed that the effective scatterer size can be reliably constrained in the range of values, where the scattering asymmetry parameter uniquely depends on the wave parameter, and for relatively high values of the single scattering albedo, for which the scattering in the medium is significant. Similarly, the domains of reliable retrieval of the single scattering albedo and thermal skin depth are established.

Radiative transfer of submillimeter thermal radiation in the icy moons' surface layer is considered. Numerical simulations of the polarized radiative transfer have been performed. A

Bayesian approach to retrieval of the unknown model parameters has been tested on simulated radiometry data. Limitations of possible retrievals are established.

1. Ilyushin Y. A., Hartogh P. Submillimeter wave instrument radiometry of the Jovian icy moons // *Astronomy and Astrophysics*. — 2020. — Vol. 644. — P. A24–A24.

Сопоставление динамики термальных точек и зарегистрированных гроз с динамикой молниевых разрядов на байкальской природной территории в 2012-2018 гг.

Васильев Р.В. (roman_vasilyev@iszf.irk.ru), Тащилин М.А., Татарников А.В.
Институт Солнечно-Земной Физики СО РАН, Иркутск, Россия

Грозы являются опасным природным явлением наносящим значительный ущерб энергетическим сетям, системам связи, коммунальным структурам, лесному фонду и пр. Глобальное изменение климата сопровождается сменой типа общей, глобальной циркуляции атмосферы, вследствие чего увеличиваются факторы, способствующие возникновению гроз. Исследования гроз наиболее удобно вести при помощи сетей синхронизированных радиоприёмников СДВ диапазона, которые регистрируют радиосигналы молниевых разрядов и по ним определяют местоположение разряда и его мощность. Поскольку грозы являются одним из основных факторов возникновения пожаров в лесах, без учёта человеческого фактора, исследование динамики пожаров и гроз достаточно актуально как для фундаментальных исследований пожарогенных факторов и их связи с окружающей средой, так и для формирования методов предсказания лесных пожаров. В работе исследованы динамика статистических характеристик и корреляций параметров гроз, термальных точек ассоциированных с пожарами и фактически зарегистрированных пожаров на байкальской природной территории.

Работа выполнена в рамках гранта № 075-15-2020-787 Министерства науки и высшего образования РФ на выполнение крупного научного проекта по приоритетным направлениям научно-технологического развития (проект «Фундаментальные основы, методы и технологии цифрового мониторинга и прогнозирования экологической обстановки Байкальской природной территории»).

Comparison of the dynamics of hot spots and recorded thunderstorms with the dynamics of lightning discharges over the Baikal natural territory in 2012-2018

R.V. Vasilyev (roman_vasilyev@iszf.irk.ru), M.A. Tashilin, A.V. Tatarnikov
Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS, Irkutsk, Russia

Thunderstorms are the dangerous natural hazards damaging energetic systems, communications, forests etc. The global climate change accompanied by changing the atmospheric circulation regime therefore grow the factors contribute to the thunderstorms. Research of thunderstorms is useful to perform with network of synchronised radio VLF range registering radiosignals from lightning discharges and retrieving position of lightning and the power of discharge. As thunderstorms are one of important factor for initiation of forest fires (without human factors) the research of fires and thunderstorms rather actual for fundamental research of fires in context of the environment. Besides this is useful for creation of forest fire forecasting methods. We studying the dynamic of statistical properties and correlations parameters of thunderstorms, hot spots associated with fires and registered fires over the Baikal natural territory.

The work was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, the grant No. 075-15-2020-787 for implementation of Major scientific projects on priority areas of scientific and

technological development (the project «Fundamentals, methods and technologies for digital monitoring and forecasting of the environmental situation on the Baikal natural territory»).

Изучение пространственных распределений аэрозоля в тропосфере по данным проекта DELICAT

Мамонтов А.Е. (alex1372049@gmail.com), Федорова О.В., Горбунов М.Е.
Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия

В работе рассмотрены спектры флуктуаций мощности рассеянного сигнала, полученного в измерениях в экспериментальных полетах общеевропейского научного проекта DELICAT, с целью изучения пространственных спектров флуктуаций плотности аэрозоля. Для анализа выбирались отрезки полета с постоянными: высотой, направлением и скоростью самолета. Сигнал рассматривается на плоскости, где одной координатой является расстояние от самолета до рассеивающего объема, а другой – путь самолета относительно воздушной массы, получаемый интегрированием воздушной скорости. В этих координатах облака аэрозоля проявляются в виде полос, наклоненных под углом 45 градусов. Для вычисления усредненных одномерных пространственных спектров флуктуаций плотности аэрозоля используется двумерное преобразование Фурье. В полученных таким образом двумерных спектрах наблюдаются ярко выраженные гребни. По этим спектрам были получены усредненные одномерные пространственные спектры. Предполагается сильная взаимосвязь спектров флуктуации плотности аэрозоля с аналогичными спектрами плотности земной атмосферы.

Study of spatial distributions of aerosol in the troposphere according to the data of the DELICAT

A.E. Mamontov (alex1372049@gmail.com), O.V. Fedorova, M.E. Gorbunov
A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics, Moscow, Russia

The paper considers the fluctuation spectra of the power of the scattered signal, obtained in measurements in experimental flights of the all-European scientific project DELICAT, in order to study the spatial spectra of aerosol density fluctuations. For analysis, flight segments were selected with constants: altitude, direction and speed of the aircraft. The signal is considered on a plane, where one coordinate is the distance from the aircraft to the scattering volume, and the other is the path of the aircraft relative to the air mass, obtained by integrating the airspeed. At these coordinates, aerosol clouds appear as bands inclined at an angle of 45 degrees. The two-dimensional Fourier transform is used to calculate the averaged one-dimensional spatial spectra of aerosol density fluctuations. In the two-dimensional spectra obtained in this way, pronounced ridges are observed. These spectra were used to obtain averaged one-dimensional spatial spectra. A strong correlation is assumed between the spectra of aerosol density fluctuations and similar density spectra of the Earth's atmosphere.

Cooling by Cyprus Lows of surface water in Lake Kinneret, Israel

Pavel Kishcha (pavelk@tauex.tau.ac.il)
Department of Geophysics, Tel Aviv University, Tel Aviv, Israel

Cyprus lows are the main reason for precipitation over Lake Kinneret during the rainy season (December–May): these lows are centered over the Mediterranean Island of Cyprus.

Cyprus lows are responsible for cold weather conditions when westerly winds transport cold moist air from the eastern Mediterranean into north Israel (including Lake Kinneret). Such cold weather conditions, accompanied by rainfall and a decrease in solar radiation (due to an increase in cloudiness over the lake), could cause cooling of Kinneret and eastern Mediterranean water temperature (WT) in rainy seasons.

However, in the Eastern Mediterranean and in Lake Kinneret, surface water temperature is increasing by ~ 1.5 oC over the last 40 years. Moreover, climate model predictions showed a reduction by one third in the appearance of Cyprus lows by the end of the 21st century. This suggests a reduction in cooling by Cyprus lows of water in the Eastern Mediterranean and in Lake Kinneret. Therefore, a comprehensive investigation of the influence of Cyprus lows on water temperature in subtropical Lake Kinneret and the Eastern Mediterranean is environmentally important.

Comparisons, conducted on a monthly basis, between high-precipitation (HP) years and low-precipitation (LP) years led to our main findings, which are as follows: Cyprus lows are instrumental in the cooling of surface and epilimnion water in subtropical Lake Kinneret and in the cooling of eastern Mediterranean surface water (Kishcha et al., 2022). In particular, comparison between HP and LP years of Kinneret surface water temperature (SWT) and epilimnion water temperature (WT) have shown water cooling of up to 2 °C in HP years, in the daytime. This study was carried out using the 21-year period of satellite and in-situ data: (1) MODIS 1 km \times 1 km resolution records of SWT, and (2) shipboard measurements of WT vertical profiles down to a depth of 40 m (2000–2020). We found that the decrease in solar radiation (caused by Cyprus lows due to an increase in cloudiness) was the main factor contributing to Kinneret water cooling. In spring (March–April), SWT and epilimnion WT, averaged over the HP years, was lower by ~ 2 °C and ~ 1.4 °C, respectively, than SWT and epilimnion WT averaged over the LP years. This was when SR increased and became the main factor contributing to water heating. In situ shipboard measurements of WT at a depth of 1 m and 5 m, at five monitoring sites within Lake Kinneret, showed similar patterns of the WT difference between HP and LP years. This is evidence that cooling by Cyprus lows of Kinneret water was evenly distributed within the lake. Water cooling by Cyprus lows was also observed in eastern Mediterranean surface water. In particular, in the spring months (March–April), Mediterranean SST averaged over the same HP years was lower by ~ 1.2 oC than that averaged over LP years. This is evidence of the regional character of the water-cooling phenomenon caused by Cyprus lows.

Kishcha et al. (2022). *Remote Sensing* 2022, 14, 4709. <https://doi.org/10.3390/rs14194709>

Вариации интегрального влагосодержания атмосферы в периоды сильной конвекции

Маслова М.В., Хуторова О.Г. (olga.khutorova@kpfu.ru), Хуторов В.Е.

Казанский федеральный университет, Казань, Россия

Исследования проводились с помощью программно-аппаратного комплекса, часть которого - сеть приемников глобальных спутниковых навигационных систем (ГНСС) в окрестностях г. Казани. В работе представлены результаты исследования изменчивости интегрального влагосодержания атмосферы (IWV) и его вариаций при интенсификации атмосферной конвекции. Решается задача выявления связи измеряемого с помощью ГНСС приемников интегрального влагосодержания атмосферы с характеристиками конвективных процессов по данным мониторинга в г. Казань за 2009-2021 гг.

Для оценки конвективных процессов использовались физико-статистические параметры неустойчивости, рассчитанные в модели ECMWF и представленные в виде данных реанализа ERA5. На основе данных о скорости и направлении ветра, влажности и

температуры воздуха на определенных высотах или изобарических поверхностях рассчитывались характеристики, которые часто используются для оценки вероятности опасных конвективных явлений.

Разработана методика оценки корреляции вариаций интегрального влагосодержания атмосферы с различными параметрами неустойчивости атмосферы. Для выявления синхронности вариаций параметров конвективной активности и измеряемых IWV оценивалась локальная вейвлет-корреляция рядов в масштабах от 1 до 12 часов. В качестве материнской функции взята функция Морле в виде для выделения одиночных импульсов необходимого временного масштаба. Показано, что при превышении пороговых значений индексов, зависящих от потенциальной доступной энергии неустойчивости и вертикального сдвига ветра вариации интегрального влагосодержания когерентны вариациям индексов неустойчивости. Значения вейвлет корреляции в этих случаях превышают 0,8. Большая часть этих вариаций имеет временные масштабы от 1 до 4 часов.

Получены оценки разности времени максимумов вариаций интегрального влагосодержания атмосферы, зенитной тропосферной задержки, ее меридионального и зонального градиентных параметров относительно конвективной энергии неустойчивости, максимума вертикальной скорости ветра и других характеристик конвективных процессов. Показано, что статистические характеристики интегрального влагосодержания атмосферы значительно изменяется в зависимости от индексов, зависящих от потенциальной доступной энергии неустойчивости и вертикального сдвига ветра.

Variations of the integral water vapor of the atmosphere during periods of strong precipitation

M.V. Maslova, O.G. Khutorova (olga.khutorova@kpfu.ru), V.E. Khutorov
Kazan Federal University, Kazan, Russia

The studies were carried out using a software and hardware complex, part of which is a network of global navigation satellite systems (GNSS) receivers in the vicinity of Kazan. The paper presents the results of a study of the variability of the integral water vapor of the atmosphere (IWV) and its variations during the intensification of atmospheric convection. The problem of identifying the relationship between the integral moisture content of the atmosphere measured using GNSS receivers and the characteristics of convective processes according to monitoring data in Kazan for 2009-2021 is being solved.

To evaluate the convective processes, we used the physical and statistical parameters of instability calculated in the ECMWF model and presented as ERA5 reanalysis data. Based on data on wind speed and direction, humidity and air temperature at certain heights or isobaric surfaces, characteristics were calculated that are often used to assess the probability of dangerous convective phenomena.

A technique has been developed for estimating the correlation of variations in the integral water vapor of the atmosphere with various parameters of atmospheric instability. To identify the synchronism of variations in the parameters of convective activity and measured IWV, the local wavelet correlation of the series was estimated on a scale from 1 to 12 hours. As the mother function, the Morlet function was taken in the form for isolating single pulses of the required time scale. It is shown that when the threshold values of the indices, which depend on the potential available instability energy and vertical wind shear, are exceeded, the variations in the integral water vapor are coherent with the variations in the instability indices. Wavelet

correlation values in these cases exceed 0.8. Most of these variations have time scales from 1 to 4 hours.

Estimates are obtained for the time difference between the maxima of variations in the integral water vapor of the atmosphere, the zenith tropospheric delay, its meridional and zonal gradient parameters relative to the convective energy of instability, the maximum vertical wind speed, and other characteristics of convective processes. It is shown that the statistical characteristics of the integral water vapor of the atmosphere significantly change depending on the indices depending on the potential available instability energy and vertical wind shear.

Измерения УФИ в составе комплексной экспедиции в Тыву и Хакасию летом 2022 г.

Смирнов С.В.^{1,2} (smirnov@imces.ru), Оглезнева М.В.¹, Пустовалов К.Н.^{1,2}, Сат А.А.¹

¹Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск, Россия

²Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия

В ходе комплексных экспедиционных исследований летом 2022 г. на территории Тывы и Хакасии, в разных ландшафтных зонах Южной Сибири, включая высокогорье и полупустыню, были проведены измерения ультрафиолетового (УФИ) и фотосинтетически активного (ФАИ) излучения, а также измерения общего содержания озона (СО) и прозрачности атмосферы в области 380 нм с помощью многоканального фильтрового радиометра NILU-UV-6T. Измерения выполнялись с одномоментным временным разрешением и усреднением. По данным измерений была рассчитана энергетическая освещённость в областях УФ-А/Б, биологически активного и эритемного УФИ, получены оценки пространственно-временной изменчивости УФ освещённости, проведён сравнительный анализ взаимосвязи данных спектрофотометрических измерений с данными метеорологических и атмосферно-электрических измерений.

Исследование выполнено за счёт гранта российского научного фонда № 22-27-00482 в соответствии с требованиями, перечисленными в соглашении между РФФИ, ИМКЭС СО РАН и руководителем проекта, и требованиями к конкурсной документации (<https://www.rscf.ru/en/project/22-27-00482>).

UV measurements as part of a comprehensive expedition to Tyva and Khakassia in the summer of 2022

S.V. Smirnov^{1,2} (smirnov@imces.ru), M.V. Oglezneva¹, K.N. Pustovalov^{1,2}, A.A. Sat¹

¹Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems SB RAS, Tomsk, Russia

²National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia

During complex expedition studies in the summer of 2022 on the territory of Tyva and Khakassia in different landscape zones of Southern Siberia including high mountains and semi-desert UV radiation and photosynthetically active radiation were measured using a NILU-UV-6T multichannel filter radiometer. In addition, measurements of the total ozone column and atmospheric transparency at 380 nm were also carried out. The measurements were performed with a one-minute time resolution and averaging. Based on the measurement data, the irradiation in the areas of UV-A/B, biologically active and erythemal UV radiation was calculated, estimates of the spatial and temporal variability of irradiation were obtained, and a comparative analysis of the relationship between the data of spectrophotometric measurements with the data of meteorological and atmospheric-electrical measurements¹ was carried out.

This study was funded by the Russian Science Foundation, Grant No. 22-27-00482.

Результаты наземных верификационных измерений прибора ODS (Optical Depth Sensor)

Хоркин В.С.^{1,2} (vs_khorkin@mail.ru), Федорова А.А.¹, Доброленский Ю.С.¹, Дзюбан И.А.¹, Вязоветский Н.А.¹, Титов А.Ю.¹, Кораблев О.И.¹, Сапгир А.Г.¹

¹Институт космических исследований РАН, Москва, Россия

²МГУ им. М.В.Ломоносова, физический факультет, Москва, Россия

Прибор ODS (Optical Depth Sensor) был разработан в ИКИ РАН для участия в научной миссии ЭкзоМарс-2022. ODS был установлен на посадочной платформе и входил в состав метеокомплекса [Zelenyi и др., 2015]. Основной научной задачей прибора ODS является мониторинг состояния атмосферы и определение ее среднесуточной толщины. В случае атмосферы Марса пыль играет большую роль в радиационном балансе [Haberle и др., 2017]. Взвешенная в атмосфере пыль эффективно поглощает и рассеивает солнечное излучение, что приводит к перераспределению энергии и нагреву самой атмосферы. Также пыль влияет на циклы воды, выступая ядрами конденсации, а также на циклы CO₂ льда, изменяя альбедо поверхности вблизи полюсов Марса [Haberle и др., 2017].

Прибор ODS позволяет измерять среднесуточное значение оптической толщины τ атмосферы планеты в двух спектральных каналах – синем ($\lambda = 320-500$ нм) и красном ($\lambda = 700-1050$ нм). Основной принцип работы прибора – измерение как рассеянного атмосферой излучения, так и сумму рассеянного и прямого Солнечного излучения. Это достигается благодаря конструкции прибора, описание которой представлено в работе. Также в данной работе представлены результаты наземных верификационных измерений прибора ODS, проведенных в Москве летом 2022 года на территории ИКИ РАН. Полученные зависимости величины сигнала ODS в синем и красном каналах анализировались при помощи созданной модели, описывающие свойства атмосферы в приближении псевдосферической геометрии. Расчеты рассеянного излучения проводились методом сферических гармоник и дискретных ординат с учетом многократного рассеяния при помощи программы SHDOM [Evans, 2007]. Основная цель проведенных измерений – проверка корректности моделирования оптической схемы прибора ODS, а также накопление экспериментальных данных для верификации созданной модели. В первую очередь проверялся алгоритм поиска оптимальных углов поворота прибора. Рассчитанные в ходе моделирования значения сравнивались с фактическими углами поворота прибора в каждый из дней измерения. Полученные в работе результаты показывают хорошее совпадение между модельными и экспериментальными зависимостями, отличия углов поворота не превышают 2°. Также по результатам измерений проверялся алгоритм нахождения среднесуточного значения оптической толщины атмосферы в «синем» и «красном» спектральных каналах с учетом найденных углов поворота прибора. В результате получено хорошее качественное совпадение теоретических и экспериментальных зависимостей, благодаря чему удалось определить оптическую толщину атмосферы τ с точностью 0.1.

1. L.M. Zelenyi, O.I. Korablev, D.S. Rodionov, B.S. Novikov, K.I. Marchenkov, O.N., Andreev, E.V. Larionov, Sol.Syst.Res., V. 49, No 7, p.509-517, 2015.

2. Haberle R., Clancy R., Forget F., Smith M., Zurek R., The Atmosphere and Climate of Mars. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2017. 588 p.

3. K.F. Evans, Journal of the Atmospheric sciences–special section, p.3854-3864, 2007, doi: 10.1175/2006JAS2047.1

Results of ground-based verification measurements

of ODS (Optical Depth Sensor) instrument

V.S. Khorkin^{1,2} (vs_khorkin@mail.ru), A.A. Fedorova¹, Yu.S. Dobrolenskiy¹, I.A. Dzyuban¹, N.A. Vyazovetskiy¹, A.Yu. Titov¹, O.I. Korablev¹, A.G. Sapgir¹

¹Space Research Institute Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

²Lomonosov Moscow State university, faculty of physics, Moscow, Russia

The ODS instrument (Optical Depth Sensor) was designed by Space Research Institute for scientific mission ExoMars-2022. This instrument was established on the landing platform and was included in the meteorological suite [Zelenyi et al., 2015]. The main scientific task of the ODS device is to monitor the state of the atmosphere and determine daily average optical depth. In case of the Martian atmosphere, dust plays an important role in the radiation balance [Haberle et al., 2017]. The dust suspended in the atmosphere effectively absorbs and dissipates solar radiation, which leads to the redistribution of energy and heating of the atmosphere itself. Dust also affects the cycles of water, as well as the cycles of CO₂ ice, changing the surface albedo in the polar region of Mars [Haberle et al., 2017].

The ODS instrument allows measure the daily average optical depth value of the atmosphere in two spectral channels – blue channel ($\lambda = 320-500$ nm) and red channel ($\lambda = 700-1050$ nm). The basic principle of measurements is the following: the ODS instrument measured the value of scattered radiation in the atmosphere and sum value of scattered and direct solar radiation. This is achieved due to the design of the device. The description of the ODS optical scheme is presented in this work. In this paper we also present the results of ground-based verification measurements of the ODS instrument provided in Moscow in the summer of 2022 on the Space Research Institute Russian Academy of Science territory. The obtained dependences of ODS signal in the blue and red channels were analyzed using the created model describing the properties of the atmosphere using the pseudospheric geometry approximation. Calculations of scattered radiation were carried out using the SHDOM program: the method of spherical harmonics and discrete ordinates, taking into account multiple scattering of radiation [Evans, 2007]. Using the results of ground-based measurements we verified the correctness of the modeling of the ODS optical scheme and also we have accumulated the experimental data to verify our created program modeling of atmospheric properties. First of all, we tested the algorithm for finding the optimal rotation angles of the ODS instrument. The calculated values during the simulation were compared with the actual rotation angles of the device for each day of the measurement. We obtained a good agreement between the model and experimental dependencies, the differences in the values of rotation angles do not exceed 2°. Then using the same experimental results we tested our algorithm for finding the average daily value of the atmosphere optical depth in the blue and red ODS spectral channels, taking into account the optimal value of rotation angles. As a result a good qualitative coincidence of modeling and experimental dependencies was obtained. Using created program we determine the atmosphere optical depth with an accuracy of 0.1.

1. L.M. Zelenyi, O.I. Korablev, D.S. Rodionov, B.S. Novikov, K.I. Marchenkov, O.N., Andreev, E.V. Larionov, *Sol.Syst.Res.*, V. 49, No 7, p.509-517, 2015.

2. Haberle R., Clancy R., Forget F., Smith M., Zurek R., *The Atmosphere and Climate of Mars*. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2017. 588 p.

3. K.F. Evans, *Journal of the Atmospheric sciences–special section*, p.3854-3864, 2007, doi: 10.1175/2006JAS2047.1

**Оптико-информационное обеспечение обнаружения артефактов
роботизированной системой на сложном фоне**

Целью научного исследования является разработка метода оптико-информационного обеспечения обнаружения артефактов роботизированной системой на сложном фоне при следующих допущениях:

- артефактом, подлежащим обнаружению, является беспилотное воздушное судно (БВС);

- информационным каналом роботизированной системы является пассивная оптико-электронная система (ПОЭС).

- видеoinформация о находящихся в поле зрения ПОЭС фоне и артефактах после окончательной обработки представляется в бинарном виде.

Атмосферный фон (АФ), на котором происходит обнаружение БВС, формируется излучением облачной атмосферы при наблюдении с земной поверхности. Особый интерес вызывает сложный фон, созданный кучевыми облаками различной балльности или другими классами облаков, имеющими разрывы. ПОЭС в процессе приема и обработки излучения атмосферного фона и БВС формирует на конечном устройстве видеопоток, каждый кадр которого представляет собой двумерный массив, элементы которого содержат информацию об уровне энергетической яркости излучения атмосферного фона в выбранном направлении.

Разработанный метод оптико-информационного обеспечения обнаружения артефактов роботизированной системой на сложном фоне основанный на фоновом принципе извлечения информации состоит из трех способов получения необходимых составляющих оптико-информационного обеспечения: пространственного; пространственно-временного; временного.

Способ получения пространственного оптико-информационного обеспечения обнаружения артефактов роботизированной системой на сложном фоне, позволяет путем последовательного применения алгоритма сегментации и алгоритма пороговой обработки сегментов фоно-целевого изображения (ФЦИ) получить информацию о наличии артефактов в поле зрения ПОЭС, представленную в бинарном виде с возможностью определения координат БВС.

Способ получения пространственно-временной составляющей оптико-информационного обеспечения позволяет оптимизировать интервал времени с периодичностью которого следует обновлять выбор размера сегмента. Это составляет основу способа получения пространственной составляющей оптико-информационного обеспечения, необходимой для реализации пространственного способа обнаружения БВС на АФ, состоящего из алгоритма сегментации ФЦИ и алгоритма пороговой обработкой.

Способ получения временной составляющей оптико-информационного обеспечения позволяет оптимизировать выбор частоты подачи кадров из видеопотока для последующей обработки пространственным способом обнаружения БВС на АФ. Оценка временной изменчивости проводилась путем оценки частоты основной гармоники спектральной плотности мощности (СПМ) флуктуаций яркости излучения неоднородностей АФ, образованных различными классами облачности и согласования с ней частоты подачи кадров для обработки из видеопотока.

Optical Information Support for Artifact Detection robotic system on a complex background

The purpose of the scientific research is to develop a method of optical information support for the detection of artifacts by a robotic system against a complex background under the following assumptions:

- the artifact to be detected is an unmanned aerial vehicle (UAV);
- the information channel of the robotic system is a passive optical-electronic system (POES).
- video information about the background and artifacts in the field of view of the POES after final processing is presented in binary form.

Atmospheric background (AF), on which the detection of the UVS occurs, is formed by the radiation of the cloudy atmosphere when observed from the earth's surface. Of particular interest is the complex background created by cumulus clouds of various intensities or other classes of clouds that have breaks. POES in the process of receiving and processing atmospheric background radiation and UWS forms a video stream on the terminal device, each frame of which is a two-dimensional array, the elements of which contain information about the level of radiance of atmospheric background radiation in the selected direction.

The developed method of optical information support for the detection of artifacts by a robotic system against a complex background, based on the background principle of information extraction, consists of three methods for obtaining the necessary components of optical information support: spatial; space-time; temporary.

The method for obtaining spatial optical-information support for the detection of artifacts by a robotic system against a complex background allows, by sequential application of the segmentation algorithm and the algorithm for thresholding segments of the phono-target image (FCI), to obtain information about the presence of artifacts in the field of view of the POES, presented in binary form with the possibility of determining the coordinates of the UAV.

The method for obtaining the spatiotemporal component of optical information support allows optimizing the time interval with the frequency of which the selection of the segment size should be updated. This forms the basis of the method for obtaining the spatial component of optical information support, which is necessary for the implementation of the spatial method for detecting UA on the AF, which consists of the FCI segmentation algorithm and the thresholding algorithm.

The method for obtaining the temporal component of optical information support makes it possible to optimize the choice of the frame rate from the video stream for subsequent processing by the spatial method of detecting the UAV on the AF. The temporal variability was estimated by estimating the frequency of the fundamental harmonic of the power spectral density (PSD) of fluctuations in the brightness of the emission of AF inhomogeneities formed by different classes of cloudiness and matching the frame rate to it for processing from the video stream.

Экспериментальные исследования корреляции характеристик радио и оптического излучения молниевых разрядов

Ковалевская О.И. (okovalevs@yandex.ru), Бусыгин В.П., Щиплецов М.В., Ковалевский К.П., Тамара И.В., Ракитянский Б.И., Савочкин Д.Л., Евневич А.Э., Татаринцев Н.Н.
ФГКУ «12 ЦНИИ» Минобороны России, Сергиев Посад, Россия

Настоящая работа, выполненная сотрудниками ФГКУ «12 ЦНИИ» Минобороны России, посвящена экспериментальному исследованию корреляционных характеристик

электромагнитных импульсов (ЭМИ) и оптического излучения (ОИ) молниевых разрядов. Приведено описание экспериментальной установки и условия проведения измерений.

Измерения проводились в период грозовой активности 2022 года. К обработке были приняты сигналы ЭМИ и ОИ молниевых разрядов, полученные в результате 802 запусков регистрирующей аппаратуры. В ходе обработки результатов регистрации было выделено 611 пар ассоциированных импульсов ЭМИ и ОИ молниевых разрядов.

Коэффициент корреляции амплитуд выделенных пар ассоциированных импульсов составил 0,39. Сравнительно небольшая корреляция амплитуд сигналов ЭМИ и ОИ молниевых разрядов возможно определяется большим разнообразием трасс распространения излучения как по расстоянию, так и по их природе и состоянию. Для анализа влияния трасс распространения ЭМИ и ОИ на корреляционные характеристики их амплитуд выбраны два сеанса регистрации с ближним и удаленным грозowymi очагами. Для каждого сеанса получены эмпирические распределения плотности вероятности амплитуд ЭМИ и ОИ и их корреляционные характеристики.

Показано, что корреляция амплитуд ЭМИ и ОИ ближних гроз значительно выше корреляции амплитуд ЭМИ и ОИ дальних грозowych очагов. По мнению авторов, данное расхождение может быть объяснено достаточно высокой корреляцией амплитуд ЭМИ и ОИ «в источнике» (более 0,6) и значительным влиянием на коэффициент корреляции трассы распространения ЭМИ и ОИ молниевых разрядов (0,68 для ближней грозы и 0,06 для дальней грозы).

Полученные данные о распределении амплитуд ЭМИ и ОИ молниевых разрядов и их корреляционные характеристики могут быть использованы в качестве исходных данных для выбора диапазонов чувствительности каналов регистрации при проектировании регистрирующей аппаратуры.

Experimental researches of the correlation characteristics of the radio and optical lightning emission

O.I. Kovalevskaya (okovalevs@yandex.ru), M.V. Shchipletsov, V.P. Busygin,
K.P. Kovalevskii, I.V. Tamara, B.I. Rakityanskii, D.L. Savochkin, A.E. Yevnevich, N.N. Tatarintsev
12 CRII Ministry of Defense of the Russian Federation, Sergiev Posad, Russia

This work, which was carried out by scientists of '12 CSRI' of the Ministry of Defense of Russia, is devoted to the experimental study of radiofrequency and optical emission correlation characteristics of lightning discharges. The description of experimental facility and test conditions are provided.

The measurements were carried out during the period of thunderstorm activity in 2022. Signals of radiofrequency and optical emission of lightning discharges received as a result of 802 launches of recording equipment were accepted for processing. In the course of processing of registration results were identified 611 pairs of associated radiofrequency and optical of lightning discharges.

Correlation coefficient of the selected pairs amplitudes of associated signals is composed 0,39. A relatively small correlation of radiofrequency and optical emission pulses of lightning discharges is possibly determined by the large variety of radiation propagation paths both in distance and in their nature and state. To analyze the influence of signal propagation paths on the correlation characteristics of radiofrequency and optical emission amplitudes, two recording sessions with near and distant thunderstorm sources were selected. For each session, empirical probability density distributions of radiofrequency and optical emission signal amplitudes and their correlation characteristics were obtained.

It is shown that the correlation of radiofrequency and optical emission amplitudes of near thunderstorms is much higher than the correlation of radiofrequency and optical emission amplitudes of distant thunderstorms. According to the authors, this discrepancy can be explained by a rather high correlation of radiofrequency and optical emission signal amplitudes in the source (more than 0,6) and a significant effect on the correlation coefficient of the propagation path of radiofrequency and optical emission of lightning discharges (0,68 for near thunderstorms and 0,06 for distant thunderstorms).

The obtained data on the distribution of radiofrequency and optical emission signal amplitudes of lightning discharges and their correlation characteristics can be used as initial data for selecting the sensitivity ranges of the registration channels when designing equipment.

Постерная сессия

Наземный микроволновый метод измерений вертикального профиля содержания озона

Бордовская Ю.И. (bordovskayay@gmail.com), Тимофеев Ю.М., Поберовский А.В., Имхасин Х.

Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

Измерения нисходящего теплового излучения атмосферы в линиях поглощения озона наземной микроволновой (МКВ) аппаратурой доказали свою полезность в задачах определения элементов вертикальной структуры содержания озона. При интерпретации таких измерений требуется привлекать данные о вертикальной структуре температуры и содержания водяного пара из других источников (например, из данных радиозондирования) для повышения точности определения содержания озона. В данном докладе приведены результаты восстановления вертикальных профилей содержания озона на основе наземных измерений МКВ озонметра (СПбГУ) при использовании различных обратных операторов в методике множественной регрессии, а также оценки восстановления вертикальной структуры содержания озона при комбинации МКВ измерений в линиях и полосах поглощения O_3 , O_2 и H_2O .

Ground-based microwave method for measuring the ozone vertical profile

Yu.I. Bordovskaya (bordovskayay@gmail.com), Yu.M. Timofeev, A.V. Poberovski, H. Imhasin

Saint Petersburg State University, Saint Petersburg, Russia

Atmospheric downward thermal radiation measurements in the ozone absorption lines by ground-based microwave (MW) instruments have proved their usefulness in the problems of determining the elements of the ozone vertical structure. When interpreting such measurements, it is necessary to involve data on vertical structure of the temperature and water vapor from other sources (for example, from radiosonde data) in order to improve the determining of the ozone profile accuracy. This report presents the retrieving ozone vertical profiles based on ground-based Ozonometer measurements (St. Petersburg State University) and used various inverse operators in the multiple regression technique, as well as estimates of retrieving ozone vertical structure with a combination MW measurement in the O_3 , O_2 и H_2O absorption lines and bands.

Пятнадцать лет FTIR-измерений газового состава атмосферы в СПбГУ

Макарова М.В. (m.makarova@spbu.ru), Поберовский А.В., Поляков А.В., Имхасин Х.Х.,
Ионов Д.В., Косцов В.С., Фока С.Ч.

Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

Глобальные изменения климата являются одной из важнейших научных, социальных и экономических проблем современности. Чтобы оценить значимость таких изменений и понять связанные с ними физические и химические процессы, необходим долгосрочный мониторинг состава атмосферы. Инфракрасные Фурье-спектрометрические (FTIR) измерения прямого солнечного излучения представляют особый интерес для исследования климата, позволяя детально изучать изменения газового состава атмосферы и сопутствующие климатические процессы. Атмосферный FTIR-мониторинг позволяет определять общее содержание (ТС) более 20 газовых примесей атмосферы. Для некоторых газов информативность FTIR-измерений позволяет определять не только их ТС, но и также элементы профиля объемного отношения смеси (VMR). В настоящем исследовании представлены основные результаты:

- FTIR-мониторинга долгоживущих (CH₄, N₂O, CO₂ и OCS) и короткоживущих (CO, HCN, C₂H₆, H₂CO, CH₃OH, HCOOH, C₂H₂, NH₃ и NO₂) климатически активных газов атмосферы. Измерения осуществляются с 2009 года в Санкт-Петербургском государственном университете (СПбГУ) в содружестве с международной измерительной сетью Network for the Detection of Atmospheric Composition Change (NDACC). Стационарный Фурье-спектрометр (FTS) Bruker IFS 125HR (спектральное разрешение до 0.002 см⁻¹) установлен в Петергофском кампусе СПбГУ: 35 км к юго-западу от центра Санкт-Петербурга, 59,88° с.ш., 29,83° в.д., 20 м над уровнем моря. Для получения профилей ТС и/или VMR атмосферных газов FTIR-спектры обрабатываются пакетом программ SFIT4, который реализует алгоритмы статистической регуляризации и регуляризации Тихонова-Филлипса;

- мобильных измерительных кампаний EMME (Emission Monitoring Mobile Experiment), проводившихся СПбГУ (совместно с Karlsruhe Institute of Technology и Bremen University) в 2019-2020гг. Основная цель EMME – на основе мобильных FTIR-измерений с использованием FTS Bruker EM27/SUN осуществить оценку эмиссии CO₂, CH₄ и CO для Санкт-Петербурга – мегаполиса с населением ~5 млн.

Исследования выполнены при поддержке гранта СПбГУ № GZ_MDF_2023-1, ID pure 101662710. FTIR-измерения с использованием аппаратуры Bruker IFS 125HR проведены с использованием оборудования ресурсного центра "Геомодель" (Научный парк СПбГУ).

Fifteen years of FTIR measurements of the gaseous composition of the atmosphere at SPbU

M.V. Makarova (m.makarova@spbu.ru), A.V. Poberovskii, A.V. Polyakov, H.H. Imkhasin, D.V. Ionov, V.S. Kostsov, S.C. Foka

Saint Petersburg State University, Saint Petersburg, Russia

Global climate change is one of the most important scientific, societal and economic contemporary challenges. In order to assess the significance of such changes and to better understand the physical and chemical processes involved, continuous, consistent, long-term monitoring of the atmospheric composition is indispensable. Fourier Transform InfraRed (FTIR) measurements of direct solar radiation are of particular interest for climate research allowing

atmospheric gaseous composition and multiple climate processes to be monitored in detail. Atmospheric FTIR-monitoring makes it possible to retrieve the total column (TC) of more than 20 trace gas components of the atmosphere. For some species, the informativity of FTIR measurements allows us to determine not only their TC, but also elements of volume mixing ratio (VMR) profile.

The present study provides:

- an overview of atmospheric FTIR monitoring of long-lived (CH₄, N₂O, CO₂ and OCS) and short-lived (CO, HCN, C₂H₆, H₂CO, CH₃OH, HCOOH, C₂H₂, NH₃, and NO₂) trace gases carried out at St. Petersburg State University (SPbU) in the framework of the Network for the Detection of Atmospheric Composition Change (NDACC) from 2009. The stationary Fourier Transform Spectrometer (FTS) Bruker IFS 125HR (spectral resolution up to 0.002 cm⁻¹) is installed in the suburban Peterhof campus of SPbU which is located about ~35 km southwest from the center of St. Petersburg (59.88°N, 29.83°E, 20m asl). In order to retrieve TC and/or VMR profile of atmospheric gases, FTIR spectra are being processed by the SFIT4 retrieval code which implements Optimal Estimation and Tikhonov-Phillips regularization algorithms;

- main results of EMME (Emission Monitoring Mobile Experiment) mobile observational campaigns conducted by St Petersburg University (in collaboration with Karlsruhe Institute of Technology and Bremen University) in 2019-2020. The main goal of EMME is based on mobile FTIR measurements using FTS Bruker EM27/SUN to evaluate CO₂, CH₄ and CO emissions for St. Petersburg, a megacity with a population of ~5 million.

This work was supported by Saint-Petersburg State University research grant (pr. No GZ_MDF_2023-1, pure ID 101662710). FTIR-measurements by Bruker IFS 125HR were carried out using equipment of the GEOMODEL Resource Center (Research park of SPbU).

Новый метод построения регрессионного обратного оператора в дистанционных методах измерений общего содержания озона

Тимофеев Ю.М.¹, Неробелов Г.М.^{1,2}(akulishe95@mail.ru), Кобзарь Г.В.¹, Никулин А.Г.³,
Козлов Д.А.³ Черкашин И.С.³

¹Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

²Научно-исследовательский центр экологической безопасности РАН, Санкт-Петербург, Россия

³АО ГНЦ "Центр Келдыша", Москва, Россия

Озон ответственен за радиационный и термический режим стратосферы, УФ-освещенность поверхности Земли и экологическое состояние нижней тропосферы. Эти особенности озона обусловили создание методов и аппаратуры для измерений его содержания как во всей толще атмосферы (общее содержание озона – ОСО), так и в отдельных вертикальных слоях (например, в тропосфере). Существенную роль в глобальном и региональном мониторинге ОСО играют спутниковые методы. Важным фактором определяющим погрешности спутниковых измерений ОСО является используемая методика решения обратной задачи и качество априорной информации. В работе исследуются возможности использования наземных эталонных измерений ОСО на полярных станциях и спутниковых измерений спектров уходящего ИК излучения прибором ИКФС-2 для решения обратной задачи по определению ОСО методом множественной регрессии.

Наземные спектральные измерения на станции СПбГУ были выполнены на научном оборудовании ресурсного центра СПбГУ «Геомодель». Исследование выполнено в рамках работы лаборатории «Исследования Озонового слоя и верхней атмосферы» СПбГУ (соглашение с Минобрнауки РФ № 075–15-2021-583).

A new method for constructing a regression inverse operator in remote measurement methods of total ozone content

Timofeev Yu.M.¹, Nerobelov G.M.^{1,2}(akulishe95@mail.ru), Kobzar G.V.¹, Nikulin A.G.³, Kozlov D.A.³, Cherkashin I.S.³

¹*Saint Petersburg State University, Saint Petersburg, Russia*

²*Scientific Research Centre for Ecological Safety of the RAS, Saint Petersburg, Russia*

³*State Scientific Center of the Russian Federation "Keldysh Research Center", Moscow, Russia*

Ozone determines radiation and thermal regimes of the stratosphere, UV radiation coming to the Earth's surface and ecological conditions of the lower troposphere. Due to these features of the ozone in the Earth atmosphere there are methods and instruments to carry out the measurements of ozone content in a total atmospheric column (total ozone column or TOC) and in particular vertical layers (for example, in the troposphere). Satellite methods are of great importance for regional TOC monitoring. Methods of solving an inverse problem and quality of a priori information significantly influence errors of TOCs retrieved by satellite observations. In the current study opportunities of using ground-based standard measurements of TOCs at Polar stations and satellite observations of outgoing IR radiation spectra by IKFS-2 to solve the inverse problem of TOC retrieval are investigated.

Ground-based spectral measurements at the SPbU site were carried out using the scientific equipment of the resource center of St. Petersburg State University "Geomodel". The study was carried out as part of the work of the Ozone layer and upper atmosphere research laboratory of St. Petersburg State University (agreement with the Ministry of Education and Science of the Russian Federation No. 075-15-2021-583).

Результаты квази-непрерывных наблюдений атмосферной концентрации метана на станции Воейково за период с 1996 по 2021 гг.

Ивахов В.М. (ivakhoov@mail.ru), Парамонова Н.Н., Привалов В.И., Зинченко А.В.

Главная геофизическая обсерватория им. А.И. Воейкова, Санкт-Петербург, Россия

Наблюдения концентрации метана в приземном слое атмосферы на полевой экспериментальной базе Главной геофизической обсерватории «Воейково», расположенной в 13 км к востоку от административной границы Санкт-Петербурга в одноименном поселке, были организованы в середине 1990-х годов. Измерения выполнялись методом газовой хроматографии с пламенно-ионизационным детектором. Каждое измерение CH_4 проводилось раз в 20 минут и сопровождалось измерением рабочей калибровочной смеси, привязанной к шкале Всемирной метеорологической организации (ВМО). Относительная расширенная неопределённость измерений не превышала 1,2%. Результаты межлабораторных сравнений ВМО в 2014-2015 гг. показали, что погрешность измерений ГГО находится в пределах 2 млрд⁻¹ (0,1%).

В работе представлены результаты физико-статистического анализа временной изменчивости атмосферной концентрации метана различных масштабов. При расчете среднегодовых и среднемесячных значений использовались суточные минимумы. За рассматриваемый период среднегодовая концентрация CH_4 увеличилась с 1833 до 2006 млрд⁻¹, средняя величина ежегодного прироста составила 7,8 млрд⁻¹, что хорошо согласуется с данными сети ВМО.

Сезонные вариации оценивались по среднемесячным значениям и для 11 лет, в которых не было длительных пропусков в наблюдениях. Максимум сезонного хода приходился на зимние месяцы, когда фотохимический сток метана минимален, а

минимум – на летние месяцы, когда разрушение метана в атмосфере наиболее интенсивно. Среднее значение амплитуды сезонного колебания составило ~ 60 млрд⁻¹.

Суточный ход обусловлен двумя основными факторами – наличием источников метана в окрестностях станции и метеорологическими условиями. Источниками CH₄ в районе станции являются увлажненные территории, болота и другие природные экосистемы. Наряду с естественными источниками существенный вклад в эмиссию метана в атмосферу создают антропогенные факторы, такие как свалки, сельскохозяйственные угодья, утечки природного газа и др. Наиболее ярко суточный ход CH₄ проявлялся при малых скоростях ветра. Максимум суточной вариации приходился на утренние часы, в середине дня наступал минимум, который постепенно сменялся увеличением, переходящим в утренний максимум. Амплитуда суточного хода варьировалась в широком диапазоне и достигала значения в несколько сотен млрд⁻¹. При малых скоростях ветра и переносе со стороны Санкт-Петербурга, преимущественно наблюдались высокие значения концентрации CH₄ вплоть до нескольких млн⁻¹. При восточном переносе, со стороны Ладожского озера, фиксировались фоновые концентрации. Для периода с 2010 по 2021 гг. характерно увеличение числа случаев с высокими концентрациями CH₄ при малых скоростях ветра, что, наиболее вероятно, связано с ростом антропогенной нагрузки на территории Ленинградской области между городом и станцией, а также с увеличением эмиссии CH₄ с территории Санкт-Петербурга.

Results of quasi-continuous observations of atmospheric methane concentration at the Voeikovo station for the period from 1996 to 2021

V.M. Ivakhov (ivakhooo@mail.ru), N.N. Paramonova, V.I. Privalov, A.V. Zinchenko
Voeikov Main Geophysical Observatory, Saint Petersburg, Russia

Observations of methane concentration in the surface atmospheric layer at the field experimental base of the Main Geophysical Observatory (MGO) "Voeikovo", located 13 km east of the administrative border of St. Petersburg in the settlement of the same name, were organized in the mid-1990s. The measurements were performed by gas chromatography with a flame ionization detector. Each measurement of CH₄ was carried out every 20 minutes and accompanied by the measurement of the working calibration mixture bound to the scale of the World Meteorological Organization (WMO). The relative expanded uncertainty of measurements did not exceed 1,2%. The results of the WMO inter-laboratory comparisons in 2014-2015 showed that the MGO measurement uncertainty was within 2 ppb (0,1%).

The paper presents the results of physical and statistical analysis of the temporal variability of atmospheric methane concentration of different scales. Daily minima were used to calculate the mean annual and mean monthly values. During the period under consideration, the mean annual CH₄ concentration increased from 1833 to 2006 ppb, the mean annual increase was 7,8 ppb, which agrees well with the data of the WMO network.

Seasonal variations were estimated using monthly averages and for 11 years, in which there were no long gaps in observations. The maximum of the seasonal variation occurred in the winter months, when the photochemical runoff of methane was minimal, and the minimum in the summer months, when the destruction of methane in the atmosphere was most intense. The mean value of the amplitude of the seasonal variation was ~ 60 ppb.

The diurnal variation is caused by two main factors - the presence of methane sources in the vicinity of the station and meteorological conditions. The sources of CH₄ in the station area are wet territories, bogs and other natural ecosystems. Along with natural sources, anthropogenic factors, such as landfills, agricultural land, natural gas leaks, etc., make a

significant contribution to methane emission into the atmosphere. The diurnal variation of CH₄ was most pronounced at low wind speeds. The maximum of the diurnal variation occurred in the morning hours, in the middle of the day there was a minimum, which was gradually replaced by an increase, passing to the morning maximum. The amplitude of the diurnal variations varied over a wide range and reached several hundred ppb. At low wind speeds and transport from the direction of St. Petersburg, high values of CH₄ concentrations up to several ppm were predominantly observed. During the eastern transport, from the side of Lake Ladoga, background concentrations were recorded. For the period from 2010 to 2021 an increase in the number of cases with high CH₄ concentrations at low wind speeds is characteristic, which is most probably related to the growth of anthropogenic load in the Leningrad Region between the city and the station, as well as to the increase in CH₄ emission from the territory of St. Petersburg.

Оценка интегральной эмиссии окислов азота (NO_x) с территории Санкт-Петербурга на основе мобильных DOAS-измерений и дисперсионного моделирования

Ионов Д.В.¹ (d.ionov@spbu.ru), Макарова М.В.¹, Косцов В.С.¹, Фока С.Ч.¹, Макаров Б.К.²

¹ Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

² НИТИ им. А.П. Александрова, Сосновый Бор, Россия

В период проведения международной измерительной кампании EMME-2019 (Emission Monitoring Mobile Experiment [<https://doi.org/10.5194/amt-14-1047-2021>]), нацеленной на экспериментальное определение антропогенных эмиссий парниковых газов с территории Санкт-Петербурга, была выполнена также серия мобильных DOAS (Differential Optical Absorption Spectroscopy)-измерений тропосферного содержания (ТС) диоксида азота (NO₂) с использованием портативной спектральной аппаратуры на основе компактного USB-спектрометра OceanOptics HR4000. Эти наблюдения проводились на замкнутой кольцевой автотрассе (КАД), огибающей большую часть города, и служили средством объективного контроля местоположения шлейфа антропогенного воздушного загрязнения и его эволюции в период полевой кампании.

В настоящей работе данные мобильных DOAS-измерений, выполненных в течение 9 дней марта-апреля 2019 года, использованы для определения интегральной антропогенной эмиссии NO_x с территории мегаполиса города Санкт-Петербург. NO_x представляет собой сумму взаимно превращающихся друг в друга окислов азота (NO и NO₂), первоначально поступающих в городскую атмосферу в форме монооксида азота (NO). Дистанционные спектроскопические измерения, осуществляемые в видимой области спектра (~400-500 нм), дают информацию о содержании NO₂ на трассе распространения солнечного излучения. Относительно стабильное соотношение между NO₂ и NO в городском воздухе позволяет судить об уровне эмиссии NO_x на основе данных измерений NO₂. Суммарный объём выброса NO_x оценивался путём решения задачи по сопряжению результатов полевых измерений с данными численного моделирования пространственного распределения NO₂ в атмосфере.

Моделирование пространственно-временной эволюции шлейфа городского загрязнения выполнялось на основе модели HYSPLIT [<https://www.ready.noaa.gov/HYSPLIT.php>]. Расчеты осуществлялись в оффлайн версии модели, сконфигурированной для территории Санкт-Петербурга и его окрестностей. С помощью дисперсионного блока модели проводился расчет 3-мерного поля антропогенного воздушного загрязнения в пространственном домене с координатами 54.8°-61.6° с.ш., 23.7°-37.8° в.д.. Размер ячейки домена составляет 0.05°×0.05° широты и

долготы. Вертикальная сетка модели задана 10 уровнями с высотой верхней границы 1, 25, 50, 100, 150, 250, 350, 500, 1000 и 1500 метров, соответственно. В качестве источника метеорологической информации (вертикальные профили горизонтальной и вертикальной компонент ветра, профили температуры и давления, и пр.) использовались данные NCEP GDAS, представленные на глобальной пространственной сетке $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ широты и долготы, с шагом по времени 3 часа.

В качестве априорной информации о пространственном распределении источников городской эмиссии NO_x были взяты данные глобальной инвентаризации эмиссий ODIAC [<https://odiac.org>]. Данные ODIAC ранее уже использовались в расчетах HYSPLIT для моделирования городского шлейфа эмиссии CO_2 с территории Санкт-Петербурга [<https://doi.org/10.5194/acp-21-10939-2021>]. ODIAC содержит глобальную информацию о среднемесячных антропогенных выбросах CO_2 . Поскольку антропогенная эмиссия NO_x , как и эмиссия CO_2 , в существенной мере обусловлена сжиганием топлива (транспорт, теплоэнергетика), пространственные распределения источников этих газовых примесей предполагаются схожими. Из глобальных данных ODIAC была выделена область пространства, включающая в себя Санкт-Петербург и его ближайшие пригороды ($59.6\text{--}60.3^\circ$ с.ш., $29.1\text{--}31.3^\circ$ в.д.). Значения интенсивностей эмиссии в ячейках, характеризующие в оригинальных данных ODIAC эмиссию CO_2 , масштабировались таким образом, чтобы суммарная эмиссия была равной данным официальной городской инвентаризации валовой антропогенной эмиссии NO_x за 2019 год (63 тыс. тонн).

На основе сопряжения результатов моделирования HYSPLIT с данными мобильных измерений DOAS, и с учётом простых предположений об известных суточном, недельном и годовом циклах городского антропогенного загрязнения, получена экспериментальная оценка суммарного выброса NO_x в атмосферу в размере 80 ± 30 килотонн в 2019 году.

Исследования проведены с использованием оборудования ресурсного центра Научного парка СПбГУ "Геомодель" за счёт гранта Российского научного фонда (проект № 23-27-00019).

Assessment of integral nitrogen oxides (NO_x) emission from the territory of St. Petersburg based on mobile DOAS measurements and dispersion modeling

D.V. Ionov¹ (d.ionov@spbu.ru), M.V. Makarova¹, V.S. Kostsov¹, S.C. Foka¹, B.K. Makarov²

¹ Saint Petersburg State University, Saint Petersburg, Russia

² Federal state unitary enterprise "Alexandrov Research Institute of Technology", Sosnoviy Bor, Russia

During the international measurement campaign EMME-2019 (Emission Monitoring Mobile Experiment [<https://doi.org/10.5194/amt-14-1047-2021>]) aimed at experimental determination of anthropogenic greenhouse gas emissions from St. Petersburg, a series of mobile DOAS (Differential Optical Absorption Spectroscopy) measurements of tropospheric nitrogen dioxide (NO_2) content (TC) was performed using portable spectral equipment based on the OceanOptics HR4000 compact USB spectrometer. Conducted on closed circular routes that enclose the main emission sources, these observations served as a means of objective monitoring of the location of the anthropogenic air pollution plume and its evolution during the field campaign.

In the present study, the data of mobile DOAS measurements performed during 9 days of March-April 2019 are used to determine the integral anthropogenic NO_x emission from the territory of the megalopolis of St. Petersburg. NO_x is the sum of mutually converging nitrogen oxides (NO and NO_2) initially entering the urban atmosphere in the form of nitrogen monoxide (NO). Remote spectroscopic measurements made in the visible region of the spectrum ($\sim 400\text{--}500$ nm) provide information on the content of NO_2 along the path of solar radiation. The relatively stable ratio between NO_2 and NO in urban air allows to identify the level of NO_x

emission based on NO₂ measurements. The total NO_x emission was estimated by solving the problem of coupling the results of field measurements with data from numerical modeling of the spatial distribution of NO₂ in the atmosphere.

Modeling of the spatial and temporal evolution of the urban pollution plume was performed on the basis of the HYSPLIT model [<https://www.ready.noaa.gov/HYSPLIT.php>]. Calculations were carried out in the offline version of the model configured for the territory of St. Petersburg and its suburbs. By means of the dispersion block of the model the calculation of the 3-dimensional field of anthropogenic air pollution in the spatial domain with the coordinates 54.8°-61.6° N, 23.7°-37.8° E was conducted. Domain cell size is 0.05°×0.05° latitude and longitude. The vertical grid of the model is defined by 10 levels with the height of the upper boundary of 1, 25, 50, 100, 150, 250, 350, 500, 1000, and 1500 meters, respectively. As a source of meteorological information (vertical and horizontal wind component profiles, temperature and pressure profiles, etc.) we used NCEP GDAS data presented on a global spatial grid of 0.5°×0.5° latitude and longitude, with a time step of 3 hours.

A priori information on the spatial distribution of urban NO_x emission sources was constructed from transformed ODIAC Global Emission Inventory data [<https://odiac.org>]. ODIAC data have been previously used in HYSPLIT calculations to model the urban CO₂ emission plume from the territory of St. Petersburg [<https://doi.org/10.5194/acp-21-10939-2021>]. ODIAC contains global information on the average monthly anthropogenic CO₂ emissions. Since anthropogenic NO_x emissions, as well as CO₂ emissions, are to a large extent determined by fuel combustion (transport, thermal power engineering), the spatial distribution of the sources of these gaseous pollutants is assumed to be similar. A domain including St. Petersburg and its nearest suburbs (59.6-60.3°N, 29.1-31.3°E) was extracted from the global ODIAC data. The values of emission intensities in the cells characterizing CO₂ emissions in the original ODIAC data were scaled so that the total emission was equal to the data of the official city inventory of gross anthropogenic NO_x emissions for 2019 (63 kilotons).

Based on the coupling of HYSPLIT simulation results with DOAS mobile measurement data, and taking into account simple assumptions about known daily, weekly, and annual cycles of urban anthropogenic pollution, an experimental estimate of total NO_x emissions of 80 ± 30 kilotons in 2019 is obtained.

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 funded by a grant from the Russian Science Foundation (project No. 23-27-00019).

Оценка интегральной эмиссии монооксида углерода (СО) с территории Санкт-Петербурга по данным наземных FTIR-измерений и результатам дисперсионного моделирования

Ионов Д.В.¹ (d.ionov@spbu.ru), Макарова М.В.¹, Косцов В.С.¹,
Фока С.С.¹, Макаров Б.К.²

¹ Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

² НИТИ им. А.П. Александрова, Сосновый Бор, Россия

В периоды проведения международной измерительной кампании ЕММЕ-2019 и - 2020 (Emission Monitoring Mobile Experiment [<https://doi.org/10.5194/amt-14-1047-2021>]), нацеленной на экспериментальное определение антропогенных эмиссий парниковых газов с территории Санкт-Петербурга, выполнялись также наземные спектроскопические измерения общего содержания (ОС) монооксида углерода (СО) в вертикальном столбе атмосферы с использованием портативного инфракрасного (ИК) Фурье-спектрометра (FTIR) Bruker EM27/SUN. Спектрометр EM27/SUN имеет систему слежения за солнцем и

регистрирует прямое инфракрасное солнечное излучение. Для выполнения полевых измерений приборы доставлялись автомобилями к заранее выбранным точкам наблюдений, располагаемых внутри и вне городского шлейфа антропогенного воздушного загрязнения – т.е. с подветренной и с наветренной внешних сторон границ мегаполиса. Обе измерительные кампании – 2019 и 2020 года – проводились большей частью в марте и апреле. В отличие от кампании 2019 года, когда в эксперименте были задействованы два мобильных FTIR-спектрометра EM27/SUN, в 2020 году все измерения – как с подветренной, так и с наветренной сторон мегаполиса – осуществлялись одним и тем же спектрометром.

В настоящей работе данные полевых FTIR-измерений, выполненных в течение 11 дней марта-апреля 2019 года и 6 дней марта-мая 2020 года, использованы для определения интегральной антропогенной эмиссии CO с территории мегаполиса города Санкт-Петербург. Антропогенный вклад в общее загрязнение воздушного городского бассейна монооксидом углерода оценивался по величине экспериментально наблюдаемой разности между OC CO в подветренной и наветренной точках наблюдений (Δ OC). Суммарный объём выброса CO оценивался путём решения задачи по сопряжению результатов полевых измерений Δ OC с данными численного моделирования пространственного распределения CO в атмосфере.

Моделирование пространственно-временной эволюции шлейфа городского загрязнения выполнялось на основе модели HYSPLIT [<https://www.ready.noaa.gov/HYSPLIT.php>]. Расчеты осуществлялись в оффлайн версии модели, сконфигурированной для территории Санкт-Петербурга и его окрестностей. С помощью дисперсионного блока модели проводился расчет 3-мерного поля антропогенного воздушного загрязнения. Размер ячейки пространственного домена составляет $0.05^\circ \times 0.05^\circ$ широты и долготы. Вертикальная сетка модели задана 10 уровнями от 1 до 1500 метров.

В качестве априорной информации о пространственном распределении источников городской эмиссии CO были взяты данные глобальной инвентаризации эмиссий ODIAC [<https://odiac.org>]. Данные ODIAC ранее уже использовались в расчетах HYSPLIT для моделирования городского шлейфа эмиссии CO₂ с территории Санкт-Петербурга [<https://doi.org/10.5194/acp-21-10939-2021>]. ODIAC содержит глобальную информацию о среднемесячных антропогенных выбросах CO₂. Поскольку антропогенная эмиссия CO, как и эмиссия CO₂, в существенной мере обусловлена сжиганием топлива (транспорт, теплоэнергетика), пространственные распределения источников этих газовых примесей предполагаются схожими. Значения интенсивностей эмиссии в ячейках, характеризующие в оригинальных данных ODIAC эмиссию CO₂, масштабировались таким образом, чтобы суммарная эмиссия была равной данным официальной городской инвентаризации валовой антропогенной эмиссии CO за 2019 год (400 тыс. тонн). При этом, учитывая опыт интерпретации дополнительных данных мобильных DOAS-измерений тропосферного содержания NO₂ в 2019 году, массив источников эмиссии CO был дополнен точечными выбросами 5 городских ТЭЦ с суммарной интенсивностью 25 тыс. тонн в год (интегральная эмиссия CO стационарными источниками Санкт-Петербурга в 2019 году).

На основе сопряжения результатов моделирования HYSPLIT с данными полевых FTIR-измерений весной 2019 и 2020 гг. получена экспериментальная оценка суммарного выброса CO в атмосферу в размере 220 ± 40 килотонн в год.

Исследования проведены с использованием оборудования ресурсного центра Научного парка СПбГУ "Геомодель" за счёт гранта Российского научного фонда (проект № 23-27-00019).

Assessment of integral carbon monoxide (CO) emission from the territory of St. Petersburg based on ground-based FTIR measurements and dispersion modeling

D.V. Ionov¹ (d.ionov@spbu.ru), M.V. Makarova¹, V.S. Kostsov¹, S.C. Foka¹, B.K. Makarov²

¹ Saint Petersburg State University, Saint Petersburg, Russia

² Federal state unitary enterprise "Alexandrov Research Institute of Technology", Sosnoviy Bor, Russia

During the periods of the international measurement campaign EMME-2019 and -2020 (Emission Monitoring Mobile Experiment [<https://doi.org/10.5194/amt-14-1047-2021>]) aimed at experimental determination of anthropogenic greenhouse gas emissions from the territory of St. Petersburg, ground-based spectroscopic measurements of total carbon monoxide (CO) in the vertical atmosphere column (VC) were also performed using a portable Bruker EM27/SUN Fourier-transform infrared (FTIR) spectrometer. The EM27/SUN spectrometer has a sun-tracking system and records direct infrared solar radiation. To perform field measurements, the instruments were delivered by vehicles to pre-selected observation points located inside and outside the urban plume of anthropogenic air pollution – i.e. on the downwind and upwind sides of the metropolitan boundaries. Both the 2019 and 2020 measurement campaigns were conducted mostly in March and April. In contrast to the 2019 campaign, when two mobile EM27/SUN FTIR spectrometers were used in the experiment, in 2020 all measurements – from both downwind and upwind sides of the metropolitan area – were taken with the same spectrometer.

In the present work, the data of field FTIR measurements performed during 11 days of March-April 2019 and 6 days of March-May 2020 were used to determine the integral anthropogenic CO emission from the territory of the megalopolis of St. Petersburg. The anthropogenic contribution to the total urban air pollution by carbon monoxide was estimated by the magnitude of the experimentally observed difference between the VC of CO at downwind and upwind observation points (ΔVC). The total volume of CO emission was estimated by solving the problem of coupling the results of field measurements of ΔVC with the data of numerical modeling of the spatial distribution of CO in the atmosphere.

Modeling of the spatial and temporal evolution of the urban pollution plume was performed with the use of the HYSPLIT model [<https://www.ready.noaa.gov/HYSPLIT.php>]. Calculations were carried out in the offline version of the model configured for the territory of St. Petersburg and its suburbs. The dispersion block of the model was used to calculate the 3-dimensional field of anthropogenic air pollution. The cell size of the spatial domain is $0.05^\circ \times 0.05^\circ$ of latitude and longitude. The vertical grid of the model is set by 10 levels with the height of the upper boundary from 1 to 1500 meters.

A priori information on the spatial distribution of urban CO emission sources was constructed from transformed ODIAC Global Emission Inventory data [<https://odiac.org>]. ODIAC data have been previously used in HYSPLIT calculations to model the urban CO₂ emission plume from the territory of St. Petersburg [<https://doi.org/10.5194/acp-21-10939-2021>]. ODIAC contains global information on the average monthly anthropogenic CO₂ emissions. Since anthropogenic CO emissions, as well as CO₂ emissions, are to a large extent determined by fuel combustion (transport, thermal power engineering), the spatial distribution of the sources of these gaseous pollutants is assumed to be similar. The values of emission intensities in the cells characterizing CO₂ emissions in the original ODIAC data were scaled so that the total emission was equal to the official city inventory of gross anthropogenic CO emissions for 2019 (400 kilotons). Besides, given the experience of interpreting additional data from mobile DOAS measurements of tropospheric NO₂ in 2019, the array of sources of CO emissions is

supplemented by point emissions of 5 urban thermal power plants with a total intensity of 25 kilotons per year (integral CO emission by stationary sources of St. Petersburg in 2019).

Based on the coupling of HYSPLIT simulation results with field FTIR measurements in spring 2019 and 2020, an experimental estimate of the total atmospheric CO emission of 220 ± 40 kilotons per year was obtained.

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 funded by a grant from the Russian Science Foundation (project No. 23-27-00019).

Определение контраста суша-море в значениях водозапаса облаков по многоугловым наземным микроволновым измерениям в области береговой линии

Косцов В.С. (v.kostsov@spbu.ru), Ионов Д.В.

Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

Комбинированные многоугловые наземные измерения собственного микроволнового (МКВ) излучения современными радиометрами дают возможность изучать горизонтальные неоднородности поля влажности в тропосфере и пространственного распределения водозапаса облаков (ВО). Однако практическая реализация такого эксперимента сложна и требует тщательного анализа информативности измерений, оценки погрешностей алгоритма обработки данных и разработки процедур контроля качества. В данной работе анализируется применение разработанного нами алгоритма восстановления ВО, основанного на обращении уравнения переноса излучения, к задаче обнаружения горизонтальных неоднородностей ВО с помощью наземных микроволновых наблюдений в окрестности береговой линии. Исследование основано на данных, полученных с помощью МКВ радиометра RPG-NATPRO, расположенного в пригороде Санкт-Петербурга, Россия, на расстоянии 2,5 км от береговой линии Невской губы (Финский залив) и работающего в режиме углового сканирования в вертикальной плоскости. Анализируется возможность обнаружения горизонтальной неоднородности пространственного распределения водозапаса облаков, а именно контраста ВО суша-море, для различных геометрий измерений (углов места) и значений высоты нижней границы облаков. В результате обработки МКВ измерений на наблюдательной станции Санкт-Петербургского государственного университета получены среднемесячные значения разности ВО суша-море для летних месяцев за период 2013-2021 гг. Для 24 из 25 месяцев качественных наблюдений среднемесячная разность ВО суша-море положительна (большие значения над сушей и меньшие над водой) и может достигать $0,0100,013 \text{ кг м}^2$.

Исследования проведены с использованием оборудования ресурсного центра "Геомодель" Научного парка СПбГУ.

Derivation of the land-sea contrast of cloud liquid water path from multi-angle groundbased microwave measurements in a coastline area

V.S. Kostsov (v.kostsov@spbu.ru), D.V. Ionov

Saint Petersburg State University, Saint Petersburg, Russia

Combined multi-angle ground-based measurements of self-emitted microwave (MW) radiation by modern microwave radiometers provide an opportunity to study horizontal inhomogeneities of the humidity field in the troposphere and of the cloud liquid water path (LWP) spatial distribution. However, practical applications are difficult and require thorough

analysis of the information content of measurements, assessment of errors of data processing algorithm and the development of the quality control procedures. In this study, we analyse the application of LWP retrieval algorithm based on the inversion of the radiative transfer equation to the problem of detection of the LWP horizontal inhomogeneities by means of ground-based microwave observations in the vicinity of a coastline. The study is based on data acquired by the MW radiometer RPGHATPRO which is located in the suburbs of St.Petersburg, Russia, at 2.5 km distance from the coastline of the Neva Bay (the Gulf of Finland) and is operating in angular scanning mode in the vertical plane. The possibility to detect LWP horizontal inhomogeneity, namely the LWP land-sea contrast, for different measurement geometries (elevation angles) and values of cloud base height is analysed. As a result of processing the MW measurements at the observational site of St.Petersburg State University, the monthly-averaged values of the LWP land-sea difference have been obtained for summer months within the period 2013-2021. For 24 out of 25 months of high quality observations, the LWP land-sea monthly difference is positive (larger values over land and smaller values over water) and can reach 0.0100.013 kg m².

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.

Наземные FTIR-измерения тропосферного содержания NO₂

Макарова М.В.^{1*} (m.makarova@spbu.ru), Ионов Д.В.¹, Имхасин Х.Х.¹, Поберовский А.В.¹, Поляков А.В.¹, Косцов В.С.¹, Макаров Б.К.^{1,2}, Фока С.Ч.¹

¹ Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

² НИТИ им. А.П. Александрова, Сосновый Бор, Россия

На основе анализа FTIR-спектров высокого спектрального разрешения, зарегистрированных на станции атмосферного мониторинга СПбГУ в период 2009-2022 гг., исследованы различные методики определения тропосферного содержания NO₂ по наземным измерениям прямого солнечного излучения в среднем ИК-диапазоне. Среди протестированных трех вариантов методик наилучшее согласие с одновременными независимыми DOAS-измерениями тропосферного содержания NO₂ на той же станции мониторинга продемонстрировала методика, основанная на использовании спектрального интервала 2914.30-2914.85 см⁻¹ в сочетании с регуляризацией Тихонова-Филлипса. По результатам FTIR и DOAS измерений получены линейные оценки скорости изменения тропосферного содержания NO₂ в районе Санкт-Петербурга за период 2009-2022 гг., а также оценки сезонных вариаций.

Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда (проект № 23-27-00019). Фурье-спектрометрические измерения проведены с использованием оборудования ресурсного центра "Геомодель" (Научный парк СПбГУ).

Ground-based FTIR measurements of NO₂ tropospheric column

M.V. Makarova¹ (m.makarova@spbu.ru), D.V. Ionov¹, H.H. Imkhasin¹, A.V. Poberovskii¹, A.V. Polyakov¹, V.S. Kostsov¹, B.K. Makarov^{1,2}, S.C. Foka¹

¹ Saint Petersburg State University, Saint Petersburg, Russia

² Federal state unitary enterprise "Alexandrov Research Institute of Technology", Sosnoviy Bor, Russia

Based on the analysis of high-resolution FTIR spectra recorded at the atmospheric monitoring station of St. Petersburg State University during 2009-2022, various retrieval strategies for deriving the NO₂ tropospheric column from ground-based measurements of

direct solar radiation in the mid-IR range have been investigated. Among the tested three variants of the retrieval strategies, the best agreement with simultaneous independent DOAS measurements of NO₂ tropospheric column at the same monitoring station was demonstrated by a strategy based on the use of the spectral interval 2914.30-2914.85 cm⁻¹ in combination with Tikhonov-Phillips regularization. Based on the results of FTIR and DOAS measurements, linear trend of NO₂ tropospheric column in the St. Petersburg region for 2009-2022, as well as characteristics of seasonal variations, were obtained.

The study has been funded by the Russian Science Foundation (project No. 23-27-00019). FTIR-measurements were carried out using equipment of the GEOMODEL Resource Center (Research park of SPbU).

Проект карбонового полигона «Ладoga»

Макарова М.В.^{1*} (m.makarova@spbu.ru), Абакумов Е.В.¹, Шевченко Е.В.¹, Парамонова Н.Н.², Пахомова Н.В.¹, Львова Н.А.¹, Ветрова М.А.¹, Гузов Ю.Н.¹, Ивахов В.М.², Ионов Д.В.¹, Лобанова П.В.¹, Микушев С.В.¹, Михайлов Е.Ф.¹, Павловский А.А.¹, Титов В.О.¹, Фока С.С.¹, Хорошавин А.В.¹

¹ Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

² ФГБУ «Главная геофизическая обсерватория им. А. И. Воейкова», Санкт-Петербург, Россия

Изменение климата — важная международная проблема XXI века. Территория Российской Федерации находится в области значительных наблюдаемых и прогнозируемых изменений климата. Для достижения Россией углеродной нейтральности к 2060 году, необходима национальная система мониторинга эмиссии и поглощения парниковых газов. С этой целью Министерство науки и высшего образования запустило программу создания сети карбоновых полигонов. Санкт-Петербургский государственный университет (оператор) совместно с Главной геофизической обсерваторией им. А.И. Воейкова, Российским государственным педагогическим университетом им. А. И. Герцена, Агрофизическим научно-исследовательским институтом, Институтом океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Балтийским федеральным университетом имени Иммануила Канта, Фондом «Нансен-центр» (участники) разработали проект карбонового полигона «Ладoga», нацеленный на оценку потоков парниковых газов в атмосферу для территории Ленинградской области и исследование потенциала поглощения парниковых газов лесными и водными экосистемами Северо-Запада России. Развитие проекта предусматривает создание карбоновой фермы на территории Ленинградской области [1].

Работа выполнена при поддержке гранта СПбГУ № GZ_MDF_2023-1, ID pure 101662710.

1. Makarova et.al. «From carbon polygon to carbon farm: The potential and ways of developing the sequestration carbon industry in the Leningrad Region and St. Petersburg», Vestnik SPbSU. Earth Sciences, V.68(1), 2023.

Project of Ladoga Carbon Polygon

M. V. Makarova^{1*} (m.makarova@spbu.ru), E. V. Abakumov¹, E. V. Shevchenko¹, N. N. Paramonova², N. V. Pakhomova¹, N. A. Lvova¹, M. A. Vetrova¹, S. C. Foka¹, Iu. N. Guzov¹, V. M. Ivakhov², D. V. Ionov¹, A. V. Khoroshavin¹, P. V. Lobanova¹, S. V. Mikushev¹, E. F. Mikhailov¹, A. A. Pavlovsky¹, V. O. Titov¹

¹ Saint Petersburg State University, Saint Petersburg, Russia

² Voeikov Main Geophysical Observatory, Saint Petersburg, Russia

Climate change is one of the most important global problems of the 21st century. The territory of Russia is located in an area of significant observed and forecasted climate change.

Achieving Russia's carbon neutrality by 2060 requires the development of a national system for monitoring greenhouse gas emissions and uptake. To achieve this goal, the Ministry of Science and Higher Education launched a pilot programme to create a national network of carbon polygons. St. Petersburg State University (operator) together with the Voeikov Main Geophysical Observatory, Herzen State Pedagogical University, Agrophysical Research Institute, Shirshov Institute of Oceanology RASs, Immanuel Kant Baltic Federal University, and the Nansen Center Foundation (participants) developed the Project of Ladoga Carbon Polygon aimed at assessing greenhouse gas fluxes into the atmosphere for the territory of the Leningrad Region and studying the potential for greenhouse gas absorption by forest and aquatic ecosystems of the North West of Russia. The evolution of the project assumes the creation of a carbon farm (nature-based solutions) on the territory of the Leningrad Region [1].

This work was supported by Saint-Petersburg State University research grant (pr. No GZ_MDF_2023-1, pure ID 101662710).

1. Makarova et.al. «From carbon polygon to carbon farm: The potential and ways of developing the sequestration carbon industry in the Leningrad Region and St. Petersburg», Vestnik SPbSU. Earth Sciences, V.68(1), 2023.

Численное решение задачи рассеяния света для атмосферных ледяных агрегатных кристаллов типа «bullet-rosette» в приближении геометрической и физической оптики

Д.Н. Тимофеев (tdn@iao.ru), В.А. Шишко,
А.В. Коношонкин, Н.В. Кустова

Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, Томск, Россия

Частицы атмосферного льда, характерные в основном для перистых облаков, являются важным компонентом атмосферных исследований, таких как дистанционное зондирование и перенос излучения. Они наблюдаются на высотах 7-11 км, имеют гексагональную форму и размеры порядка 10-1000 мкм. Плотность таких частиц в перистых облаках мала по сравнению с другими типами облаков, однако, из-за специфической геометрии, они обладают труднопредсказуемыми рассеивающими свойствами. Перистые облака активно изучаются в рамках международных проектов с использованием авиационных измерений, дистанционного зондирования с земли и из космоса и др. По изучению рассеивающих свойств облаков проделана огромная работа, но в то же время многие особенности задачи рассеяния света на ледяных частицах до сих пор мало изучены.

Частицы перистых облаков по микрофизической структуре можно разделить на два типа: одиночные (гексагональные столбики, пластины, пули и т. д.) и агрегаты, состоящие из нескольких частиц. По данным полевых измерений, агрегаты атмосферного льда составляют значительную часть частиц в перистых облаках [1]. Однако надлежащая информация об их рассеивающих свойствах отсутствует в существующих базах данных. В общем случае кристаллы в облаках ориентированы произвольно, и ожидается, что рассеяние света на агрегатах, состоящих из одинаковых кристаллов, происходит подобно рассеянию одиночного кристалла такого же, как в агрегате. В таком случае можно рассчитать матрицу рассеяния света для агрегатов, используя зависимость элементов матрицы от количества частиц в агрегатах. Одной из типичных агрегатных частиц в перистых облаках является «bullet-rosette», которая состоит из одиночных частиц типа «bullet» (пуля).

В данной работе были численно рассчитаны элементы матрицы рассеяния света для атмосферных ледяных агрегатов типа «bullet-rosette», характерных для перистых облаков. Были использованы модели агрегатов с количеством частиц от 2 до 6.

Расположение частиц в каждом агрегате является ортогональным. Матрица рассеяния света рассчитывались для случая произвольной пространственной ориентации в приближении геометрической и физической оптики [2]. Установлено, что оптические свойства агрегата типа «bullet-rosette» можно оценить по оптическим свойствам одиночной частицы типа «bullet».

1. Yang, P., Stegmann, P., Tang, G., Hioki, S., Ding, J. "Improving scattering, absorption, polarization properties of snow, graupel, and ice aggregate particles from solar to microwave wavelengths in support of the CRTM," JCSDA quarterly. 59, 8-14 (2018).

2. Borovoi, A., Konoshonkin, A., Kustova, N. "The physical-optics approximation and its application to light backscattering by hexagonal ice crystals," J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf. 146, 181–189 (2014).

Numerical solution of the light scattering problem for atmospheric ice aggregate crystals of the "bullet-rosette" type in the geometrical and the physical optics approximations

D.N. Timofeev (tdn@iao.ru), V.A. Shishko, A.V. Konoshonkin, N.V. Kustova

V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics SB RAS, Tomsk, Russia

Atmospheric ice particles, typical for cirrus clouds in general, are an important component of atmospheric research such as remote sensing and radiative transfer. They are observed at altitudes of 7-11 km, have a hexagonal shape and dimensions of 10-1000 microns. The density of such particles in cirrus clouds is low compared to other types of clouds, however, due to the specific geometry, they have scattering properties that are difficult to predict. Cirrus clouds are actively studied within the framework of international projects using aircraft, remote sensing from the ground and space, etc. A lot of work has been done to study the scattering properties of clouds, but at the same time, many features of the problem of light scattering by ice particles are still poorly understood.

According to their microphysical structure, particles of cirrus clouds can be divided into two types: single (hexagonal columns, plates, bullets, etc.) and aggregates consisting of several single particles. According to in-situ measurements, atmospheric ice aggregates take a significant part of the particles in cirrus clouds [1]. However, proper information about their scattering properties is not available in existing databases. In general, the crystals in cirrus clouds are arbitrarily oriented, and it is expected that the scattering of light by aggregates consisting of identical crystals will be similar to the scattering of a single crystal of the same type as in the aggregate. In this case, the light scattering matrix for aggregates can be calculated using the dependence of the matrix elements on the number of particles in the aggregates. One of the typical aggregate particles in cirrus clouds is the "bullet-rosette", which consists of single particles of the "bullet" type.

In this work, the elements of the light scattering matrix for atmospheric ice aggregates of the "bullet-rosette" type, typical for cirrus clouds, were numerically calculated. Models of the aggregates with the number of particles from 2 to 6 were used. The arrangement of particles in each aggregate is orthogonal. The light scattering matrix was calculated for the case of an arbitrary spatial orientation in the geometric and physical optics approximations [2]. It has been found that the optical properties of a bullet-rosette type aggregate can be estimated from the optical properties of a single bullet-type particle.

1. Yang, P., Stegmann, P., Tang, G., Hioki, S., Ding, J. "Improving scattering, absorption, polarization properties of snow, graupel, and ice aggregate particles from solar to microwave wavelengths in support of the CRTM," JCSDA quarterly. 59, 8-14 (2018).

2. Borovoi, A., Konoshonkin, A., Kustova, N. "The physical-optics approximation and its application to light backscattering by hexagonal ice crystals," J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf. 146, 181–189 (2014).

Исследование средней атмосферы рэлеевским лидаром в Якутии

Титов С.В. (stitov@ikfia.ysn.ru), Николашкин С.В.

Институт космических исследований и аэронауки им. Ю.Г.Шафера СО РАН, Якутск, Россия

В ходе зондирований в 2012 году наблюдалось нетипичное наполнение стратосферного аэрозоля на различных высотных уровнях, мы это связываем с протонными вспышками на солнце 23 января и 7 марта 2012 года, также в 2013 году был зафиксирован аэрозольный слой от Челябинского метеорита. Рассмотрены особенности формирования и распада ВСП около Якутска и их зависимость от фаз квази-двухлетних колебаний (КДК) экваториального среднего зонального ветра, и индекса Nino3.4 SST. А также влияние ВСП на интенсивность мюонной компоненты вторичных космических лучей. Описан случай прохождения ВГВ зарегистрированный лидаром и камерой всего неба.

Работа выполнена в рамках государственного задания (номер госрегистрации № 122011700172-2).

Rayleigh lidar investigation of middle atmosphere in Yakutia

S.V. Titov (stitov@ikfia.ysn.ru), S.V. Nikolashkin

Yu.G. Shafer Institute of Cosmophysical Research and Aeronomy, yakutsk, Russia

During soundings in 2012, an atypical filling of stratospheric aerosol was observed at various altitude levels, we attribute this to proton flares on the sun on January 23 and March 7, 2012, and in 2013 an aerosol layer from the Chelyabinsk meteorite was recorded. The features of the formation and decay of SSWs near Yakutsk and their dependence on the phases of the quasi-biennial oscillations (QBOs) of the equatorial mean zonal wind and the Nino3.4 SST index are considered. As well as the effect of SSW on the intensity of the muon component of secondary cosmic rays. The case of internal gravity waves passage recorded by lidar and all-sky camera is described.

This work was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation and Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (registration number 122011700172-2).

Анализ временной изменчивости концентраций CO₂, CH₄ и CO на станции атмосферного мониторинга СПбГУ (Петергоф)

Фока С.С. (s.foka@spbu.ru), Макарова М.В., Поберовский А.В., Ионов Д.В., Абакумов Е.В.

Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

Станция СПбГУ расположена на границе территорий Ленинградской области и Санкт-Петербурга, основной период времени она находится под влиянием чистых воздушных масс, поступающих с Балтийского моря.

Стационарные локальные измерения CO₂, CH₄ и CO в атмосферном воздухе осуществляются аппаратурой Los Gatos Research GGA 24r-EP и Los Gatos Research CO 23r, работа которой основана на методе затухания излучения в резонаторе (OA-ICOS off-axis integrated cavity output spectroscopy).

По данным измерений на станции атмосферного мониторинга СПбГУ за период 2013-2019 гг. были получены характеристики временной изменчивости концентраций CO₂, CH₄ и CO в атмосфере: суточные изменения, годовой ход и долговременные тренды. Для анализа данных наблюдений использовалась программа CCGCRV (*Thoning et al., 1989*), где учитывается тренд и сезонные осцилляции. Значения амплитуды годового хода,

полученные по дневным медианным и минимальным значениям, для CO₂ составили 27-33 млн⁻¹, для CH₄ – 36-79 млрд⁻¹, CO – 63-110 млрд⁻¹. Линейные тренды по дневным медианным значениям CO₂, CH₄ и CO составили: 2.41 ± 0.03 млрд⁻¹/год, 9.7 ± 0.2 млрд⁻¹/год, -4.4 ± 0.1 млрд⁻¹/год соответственно, тренды по дневным минимальным значениям CO₂, CH₄ и CO составили: 2.35 ± 0.03 млн⁻¹/год, 8.9 ± 0.1 млрд⁻¹/год, -0.9 ± 0.1 млрд⁻¹/год соответственно. Анализ эмиссионного соотношения CO/CO₂ позволил уточнить основные типы антропогенных источников, влияющих на измерения в районе станции мониторинга СПбГУ.

Исследования выполнены на оборудовании РЦ СПбГУ «Геомодель» и при финансовой поддержке гранта СПбГУ № GZ_MDF_2023-1, ID pure 101662710

Thoning K.W., Tans P.P., Komhyr W.D. Atmospheric carbon dioxide at Mauna Loa Observatory. 2. Analysis of the NOAA GMCC Data, 1974-1985 // Journal of Geophysical Research. 1989. V.94. Issue D6. P. 8549–8565.

Analysis of temporal variability of the CO₂, CH₄, CO mixing ratios at the monitoring station of St.Petersburg (Peterhof)

S.Ch. Foka (s.foka@spbu.ru), M.V. Makarova, A.V. Poberovsky, D.V. Ionov, E.V. Abakumov
Saint Petersburg State University, Saint Petersburg, Russia

The St. Petersburg State University station is located on the border of the territories of the Leningrad Region and St. Petersburg and for the main period of time it is under the influence of clean air masses coming from the Baltic Sea.

Stationary local measurements of CO₂, CH₄, and CO in the atmospheric air are carried out by the Los Gatos Research GGA 24r-EP and Los Gatos Research CO 23r equipment, which is based on the OA-ICOS off-axis integrated cavity output spectroscopy method.

Using measurements at the atmospheric monitoring station of St. Petersburg State University for the period 2013-2019 characteristics of the temporal variability of CO₂, CH₄, and CO concentrations such as diurnal changes, annual variation and linear trends in the atmosphere were obtained. To analyze the observational data, the CCGCRV program (Thoning et al., 1989) was used, which takes into account the trend and seasonal oscillations. The amplitude values of the annual variation, obtained from daily median and daily minimum values, were 27–33 ppm for CO₂, 36–79 ppb for CH₄, and 63–110 ppb for CO. Linear trends in daily median values of CO₂, CH₄, and CO were: 2.41 ± 0.03 ppm/yr, 9.7 ± 0.2 ppb/yr, -4.4 ± 0.1 ppb/yr, respectively; trends in daily minimum values of CO₂, CH₄, and CO were: 2.35 ± 0.03 ppm/yr, 8.9 ± 0.1 ppb/yr, -0.9 ± 0.1 ppb/yr, respectively. An analysis of the CO/CO₂ emission ratio made it possible to clarify the main types of anthropogenic sources that affect measurements in the area of the St. Petersburg State University monitoring station.

The studies were carried out on the equipment of the Research Center of St. Petersburg State University "Geomodel" and were supported by Saint-Petersburg State University research grant (pr. No GZ_MDF_2023-1, pure ID 101662710).

Thoning K.W., Tans P.P., Komhyr W.D. Atmospheric carbon dioxide at Mauna Loa Observatory. 2. Analysis of the NOAA GMCC Data, 1974-1985 // Journal of Geophysical Research. 1989. V.94. Issue D6. P. 8549–8565.

Анализ вариаций средней концентрации СО в атмосфере Санкт-Петербурга

Фока С.С. (s.foka@spbu.ru), Макарова М.В., Ионов Д.В.

Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

В 2019 году наземные дистанционные измерения средней концентрации СО в столбе атмосферы (X_{CO}) проводились на станции атмосферного мониторинга СПбГУ в пригороде Санкт-Петербурга, Старый Петергоф (59.88 с.ш. 29.83 в.д., 30 м над уровнем

моря) с помощью портативного Фурье-спектрометра Bruker EM27/SUN, оснащенного солнечной следящей системой CAMTracker.

Всего, в 2019 году измерения осуществлялись в течение 67 дней (безоблачные условия).

Получено, что годовой ход X_{CO} для 2019 года, в целом, хорошо согласуется с годовым ходом для Санкт-Петербурга (1999-2009), для Москвы и Звенигорода (2000-2018): высокое содержание наблюдается с января по апрель, максимум в январе (104 млрд⁻¹), минимум в июне (73 млрд⁻¹), что объясняется вариациями радикала гидроксила OH в атмосфере. Амплитуда годового хода X_{CO} равна 15.5 млрд⁻¹, что близко амплитудам, полученным по результатам измерений международных сетей NDACC и TCCON за 2015-2017 гг., 12.5-14 млрд⁻¹.

Анализ результатов измерений X_{CO} за 2019г. показал, что 6 августа 2019 года наблюдался аномальный рост X_{CO} , когда максимум CO достиг 112 млрд⁻¹. На основании совместного анализа результатов спектроскопических измерений и расчетов модели HYSPLIT и с привлечением информации об антропогенных источниках базы данных EDGAR, было получено, что наиболее вероятной причиной сильного увеличения средней концентрации CO 6-го августа 2019 г. стали воздушные массы, содержащие выбросы мощных антропогенных источников, находящихся в районе Лаппееранты (Финляндия). Нами была проведена оценка интегральной эмиссии этих источников загрязнения атмосферы, которая составила в среднем 380±80 кг/час.

Исследования выполнены на оборудовании РЦ СПбГУ «Геомодель» и при финансовой поддержке в рамках гранта РФФИ №23-27-00019.

Analysis of X_{CO} variations at the monitoring station of St.Petersburg

Foka S.Ch. (s.foka@spbu.ru), Makarova M.V., Ionov D.V.
Saint Petersburg State University, Saint Petersburg, Russia

Ground-based remote measurements of X_{CO} were carried out in 2019 at the St. Petersburg atmospheric monitoring station in the suburbs of St. Petersburg, Old Peterhof (59.88 N 29.83 E, 30 m above sea level) using a portable Fourier spectrometer Bruker EM27/SUN equipped with CAMTracker solar tracking system.

In total, in 2019, measurements were carried out for 67 days (cloudless conditions).

It was found that the annual variation of X_{CO} for St. Petersburg in 2019, in general, is in good agreement with the annual variation for St. Petersburg (1999-2009), for Moscow and Zvenigorod (2000-2018): a high content is observed from January to April, the maximum in January (104 ppb), the minimum in June (73 ppb), which is explained by the OH hydroxyl radical variations in the atmosphere. The amplitude of the X_{CO} annual variation is 15.5 ppb, which is close to the amplitudes obtained from the measurements of the international networks NDACC and TCCON for 2015–2017, 12.5–14 ppb.

Analysis of the results of X_{CO} measurements for 2019 showed that on August 6, 2019, there was an anomalous increase in X_{CO} , when the maximum of CO reached 112 ppb. Based on a joint analysis of the results of spectroscopic measurements and calculations of the HYSPLIT model and using information about anthropogenic sources from the EDGAR database, it was found that the most likely cause of a strong increase in the average concentration of CO on August 6, 2019 was air masses containing emissions of powerful anthropogenic sources located in the region of Lappeenanta (Finland). We have estimated the integral emission of these sources of atmospheric pollution, which averaged 380±80 kg/h.

The studies were carried out on the equipment of the Research Center of St. Petersburg State University "Geomodel" and were supported by the RSF grant No. 23-27-00019.

Решение задачи рассеяния излучения на атмосферных ледяных кристаллах и частицах пыли в применении к совместному зондированию атмосферы лидаром и радаром

Шишко В.А. (sva@iao.ru), Тимофеев Д.Н., Сальников К.С., Ткачев И.В., Коношонкин А.В.,
Кустова Н.В.

Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, Томск, Россия

До сих пор микрофизические характеристики (например, размер и форма) и плотность распределения кристаллических частиц перистых облаков, а также пылевых частиц недостаточно изучены по причине большой изменчивости во времени и пространстве, а также из-за трудностей полевых измерений. Эти характеристики являются крайне необходимыми для включения в современные модели климата. В настоящее время перистые облака широко исследуются с помощью различных наземных, бортовых и космических приборов. Среди таких приборов наиболее перспективными, пожалуй, являются лидары и радары, обеспечивающие активное дистанционное зондирование облаков. Если ранее использовались наземные приборы, то в настоящее время облака изучаются космическими приборами, например, лидаром на борту спутника CALIPSO и радаром на борту спутника CloudSat. Также в ближайшее время лидар и радар будут совместно работать на спутнике EarthCARE.

Совместное зондирование лидаром и радаром одного и того же объема облака является многообещающим методом восстановления как удельного числа частиц в облаке, так и микрофизических параметров кристаллов, поскольку распределения частиц и их микрофизические характеристики при таких измерениях остаются одинаковыми.

В данной работе была решена задача рассеяния излучения на атмосферных ледяных кристаллах и частицах пыли, для 35 ГГц радара (длина волны 8565 мкм) и лидара (длина волны 0,532 мкм), с показателями преломления льда $1,7861+0,001i$ и $0,532+0i$; пыли – $1,957+0i$ и $1,48+0,002i$ соответственно. Моделировались случайные формы частиц. Ориентация частиц принималась хаотически ориентированной, максимальный размер частиц варьировался в диапазоне от 10 до 10000 мкм.

При расчете матриц обратного рассеяния света использовался метод физической оптики в случае лидара, а для длин волн радара – расчеты матриц обратного рассеяния микроволнового излучения выполнялись в приближении дискретных диполей, разработанном М. Юркиным. Использование такого подхода позволило корректно рассчитать отношение сигналов радара и лидара в направлении рассеяния назад, называемое радар-лидарное отношение. Показано, что данное отношение может быть использовано для оценивания размеров, как ледяных кристаллов перистой облачности, так и пылевых частиц.

Backscattering by atmospheric ice crystals and dust particles for as applied to simultaneous remote sensing of the atmosphere by lidar and radar

V.A. Shishko (sva@iao.ru), D.N. Timofeev., K.S. Salnikov, I.V. Tkachev, A.V. Konoshonkin, N.V. Kustova

V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics RAS, Tomsk, Russia

Nowadays the microphysical characteristics (e.g. size and shape) and density of crystals in cirrus clouds and dust assault are insufficiently studied. The main difficulties of research are

variability of clouds in time and space and condition of in-situ measurements. However exactly these parameters are essential for modern climate models. Cirrus clouds are widely studied using various ground-based, airborne, and spaceborne instruments. Among such devices, the most applicable are lidars and radars that provide active remote sensing of atmosphere. While ground-based instruments were previously used, clouds are currently being studied by spaceborne instruments, such as the lidar of CALIPSO satellite and the radar of CloudSat satellite. Also in the near future, lidar and radar will work together on the EarthCARE satellite.

Simultaneous remote sensing by lidar and radar of the same cloud is a promising method for retrieving both the specific number of particles in a cloud and the microphysical parameters of crystals, since the particle distribution and their microphysical properties remain the same in such measurements.

In this work the light backscattering problem for atmospheric ice crystals and dust particles was solved for 35 GHz radar (wavelength 8565 μm) and lidar (wavelength 0.532 μm), with refractive indices for ice $1.7861+0.001i$ and $0.532+0i$; for dust $-1.957+0i$ and $1.48+0.002i$, respectively. Arbitrary particle shapes were modeled. The spatial orientation of the particles was assumed to be random, the particle size varied in the range from 10 to 10 000 μm .

The physical optics approximation method was used for calculation of the light backscattering matrices in the case of a lidar, and the discrete dipole approximation developed by M. Yurkin was used in the case of radar. This approach made it possible to correctly calculate the ratio of the radar and lidar signals in the backscattering direction, called the radar-lidar ratio. It is shown that the radar-lidar ratio can be used for estimation of the size of both ice crystals of cirrus clouds and dust particles.

СЕКЦИЯ 3. ТЕОРИЯ ПЕРЕНОСА ИЗЛУЧЕНИЯ

Председатель: д.т.н. Будак В.П. (НИУ МЭИ, Москва, Россия)

SESSION 3. RADIATION TRANSFER THEORY

Chairman: Dr. V.P. Budak (MPEI, Moscow, Russia)

Устные доклады

О влиянии анизотропии кристаллических облаков и подстилающей поверхности на поля яркости отраженной солнечной радиации

Журавлева Т.Б. (ztb@iao.ru), Насртдинов И.М. (wizard@iao.ru)

Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, Томск, Россия

В работе представлены алгоритмы метода Монте-Карло, предназначенные для моделирования полей яркости солнечного излучения с учетом анизотропии среды, и некоторые результаты расчетов.

Несмотря на сравнительно невысокое содержание в атмосфере Земли частиц с преимущественно горизонтальной ориентацией, существует класс задач, при решении которых необходимо учитывать влияние пространственной ориентации ледяных кристаллов на формирование спектрально-угловых характеристик поля яркости отраженной радиации. В настоящем исследовании рассматривается оригинальный алгоритм расчета радиационных характеристик, развитый для модели оптически анизотропного кристаллического облака, характеристики которого зависят только от зенитного угла распространяющегося излучения. В новую версию алгоритма – помимо учета отражения от подстилающей поверхности (ПП) - добавлен учет рассеяния и поглощения излучения в над- и подоблачной молекулярно-аэрозольной атмосфере.

Вычисление интенсивности солнечной радиации выполняется с использованием метода локальной оценки, особенность которого состоит в том, что (i) моделирование длины свободного пробега выполняется с учетом того, что коэффициент ослабления зависит от направления распространяющегося излучения и (ii) направление движения фотона после рассеяния рассчитывается с учетом зависимости индикатрисы рассеяния излучения от зенитного угла падающего излучения. В расчетах используются локальные оптические характеристики среды, рассчитанные для горизонтально ориентированных гексагональных пластинок и столбиков Парри методом геометрической оптики. Представлены результаты моделирования интенсивности отраженной радиации на длине волны 0.55 мкм в зависимости от формы частиц, оптической толщины облаков и альбедо ПП. Для демонстрации влияния пространственной ориентации ледяных кристаллов на формирование полей яркости приведены результаты соответствующих расчетов для хаотически ориентированных частиц в форме столбиков сопоставимого размера.

Возможности современных радиометров, предназначенных для проведения многоугловых измерений отраженной солнечной радиации в широком спектральном диапазоне, используются для получения информации об отражательных свойствах поверхности Земли. Свойственная для ряда типов ПП анизотропия (снег, пустыня, водная поверхность) вносит коррективы в алгоритмы восстановления на основе данных дистанционного зондирования как характеристик атмосферы, так и широкополосного альбедо ПП, являющегося одним из ключевых параметров климатической системы.

Решение этих задач предполагает проведение численного моделирования спектрально-угловых характеристик полей яркости отраженного и пропущенного солнечного излучения, а также альбедо на верхней (ВГА) и пропускания на нижней (НГА) границах атмосферы.

В нашей работе представлены алгоритмы метода Монте Карло для моделирования этих характеристик на границах безоблачной молекулярно-аэрозольной атмосферы с учетом анизотропии ПП и молекулярного поглощения. Для описания коэффициентов двунаправленного отражения ПП (Bidirectional Reflectance Factor, BRDF) использована полуэмпирическая модель Рахмана-Пинти-Верстрате (Rahman-Pinty-Verstrate, RPV), которая описывает BRDF произвольной поверхности в зависимости от геометрической схемы наблюдения и освещения и определяется небольшим набором параметров.

Расчеты выполнены для 4-ех спектральных каналов (0.49, 0.56, 0.67 и 0.865 мкм) с использованием метеорологических профилей модели стандартной атмосферы США и двух типов атмосферного аэрозоля - пылевого и континентального. Обсуждаются отличия интенсивности отраженного излучения на ВГА и НГА, обусловленные влиянием анизотропии относительно ламбертовской поверхности, при вариациях аэрозольной оптической толщины и условий освещенности.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИОА СО РАН (г.Томск).

On the influence of the anisotropy of ice clouds and the underlying surface on the brightness fields of reflected solar radiation

T.B. Zhuravleva(ztb@iao.ru), I.M. Nasrtdinov (wizard@iao.ru)
V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics SB RAS, Tomsk, Russia

The paper presents the algorithms of the Monte Carlo method developed to simulate the brightness fields of solar radiation, taking into account the anisotropy of the medium, and some calculation results.

Despite the relatively low content of particles with a predominantly horizontal orientation in the Earth's atmosphere, there is a class of problems in the solution of which it is necessary to take into account the influence of the spatial orientation of ice crystals on the formation of the spectral-angular characteristics of the reflected radiation brightness field. In this study, we consider an original algorithm for calculating the radiation characteristics developed for the model of an optically anisotropic ice cloud, the characteristics of which depend only on the zenith angle of the propagating radiation. In the new version of the algorithm, in addition to taking into account the reflection from the underlying surface (US), the scattering and absorption of radiation in the over- and under-cloud molecular-aerosol atmosphere has been added.

The solar radiation intensity calculation is performed using the method of local estimation, the peculiarity of which is that (i) the simulation of the mean free path is performed taking into account the fact that the extinction coefficient depends on the direction of the propagating radiation and (ii) the direction of the photon after scattering is calculated taking into account dependence of the phase scattering function on the zenith angle of the incident radiation. The calculations use the local optical characteristics of the medium calculated for horizontally oriented hexagonal plates and Parry columns by the method of geometric optics. The reflected intensity simulation results at a wavelength of 0.55 μm depending on the shape of particles, the optical thickness of clouds, and the albedo of US are presented. To demonstrate the influence of the spatial orientation of ice crystals on the formation of

brightness fields, the results of the corresponding calculations for randomly oriented particles of similar size are presented.

The capabilities of modern radiometers designed for multi-angle measurements of reflected solar radiation in a wide spectral range are used to obtain information about the reflective properties of the Earth's surface. The anisotropy inherent in a number of US types (snow, desert, water surface) makes adjustments to the algorithms for retrieval both atmospheric characteristics and the broadband albedo, which is one of the key parameters of the climate system, based on remote sensing data. Solving these problems involves numerical simulation of the spectral - angular characteristics of the brightness fields of the reflected and transmitted solar radiation, as well as the albedo and transmission at the top (TOA) and bottom (BOA) boundaries of the atmosphere.

In our work, Monte Carlo algorithms are presented for modeling these characteristics at the boundaries of a cloudless molecular-aerosol atmosphere, taking into account the US anisotropy and molecular absorption. The Rahman-Pinty-Verstrate (RPV) semi-empirical model is used to describe the bidirectional reflection factor of the US (Bidirectional Reflectance Factor, BRDF), which describes the BRDF of an arbitrary surface depending on the geometric scheme of observation and illumination and is determined by a small set of parameters.

The calculations were performed for 4 spectral channels (0.49, 0.56, 0.67, and 0.865 μm) using the meteorological profiles of the US standard atmosphere model and two types of atmospheric aerosol - dust and continental. Differences in the intensity of reflected radiation on the TOA and BOA, which are due to the influence of anisotropy with respect to the Lambertian surface, are discussed under variations in the aerosol optical thickness and illumination conditions.

This work was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (budget funds for IAO SB RAS).

Распознавание облаков на гиперспектральных спутниковых изображениях с использованием объяснимой модели машинного обучения

Минкин А.С. (amink@mail.ru), Николаева О.В.

Институт прикладной математики им. М.В.Келдыша, Москва, Россия

Модели на основе нейронных сетей и машинного обучения широко применяются для анализа гиперспектральных изображений, в частности, для распознавания облаков. Тестирование показывает, что эти модели обладают высокой точностью классификации. Тем не менее, в большинстве случаев такие модели достаточно сложны и представляют собой "черный ящик", что не позволяет провести анализ причин принятия решений и результатов классификации, затрудняя анализ значимости признаков.

В данной работе предложена гибридная модель на основе интерпретируемого алгоритма дерева решений, обученного на предварительно выбранных производных признаках исходного гиперспектрального изображения, для распознавания сплошной облачности (модель 1) в сочетании со сверточной нейронной сетью для распознавания частичной облачности (модель 2). Модель 2 использует результат работы модели 1 совместно с выбранным подмножеством каналов гиперспектрального изображения.

В работе проанализирована значимость производных признаков, используемых для обучения классификатора в модели 1, а также обоснован выбор подмножества каналов в модели 2. Гибридный способ построения общего классификатора позволяет эффективно распознавать как сплошную, так и частичную облачность, что характерно для более сложных алгоритмов, в сочетании с сохранением свойства объяснимости для простых моделей машинного обучения.

Cloud recognition for hyperspectral satellite images using an explainable machine learning model

A.S. Minkin(amink@mail.ru), O.V. Nikolaeva
Keldysh Institute of Applied Mathematics, Moscow, Russia

Neural networks and machine learning models are widely used for hyperspectral image analysis and cloud recognition. Testing shows such models demonstrate high accuracy but in most cases they are quite complex and represent «black boxes», which does not allow for a decision-making analysis and results of classification, making it difficult to analyse the significance of features.

Hybrid model based on interpretable decision tree algorithm (model 1) and convolutional neural network (model 2) is considered in this work. The first model was trained on pre-selected derived features of the original hyperspectral image for the recognition of overcast. The second model was trained on a subset of hyperspectral bands along with the result of model 1 calculation for the recognition of broken clouds.

Derived features importance used for the training of model 1 based classifier was analysed in this work. Bands subset selection for model 2 was justified. The hybrid method of constructing a general classifier allows you to effectively recognize both overcast and broken clouds, which is typical for more complex algorithms, along with maintaining the explainability property as for the simple machine learning models.

Использование динамических спектральных индексов в анализе многоспектральных данных

Николаева О.В. (nika@kiam.ru)
Институт прикладной математики им. М.В.Келдыша, Москва, Россия

Рассмотрены задачи разделения облаков и ярких сухих освещенных поверхностей, а также облачных теней и водоемов – часть задачи построения облачно-теневого маски. Предложен метод разделения таких объектов на многоспектральных снимках. Метод опирается на использование динамических пороговых значений спектральных индексов, получаемых из анализа построенных для данного снимка гистограмм этих индексов. Тестирование метода выполнено на снимках прибора HYPERION.

Рассматриваются индексы NDSI (Normalized Difference Snow Index) и NDWI (Normalized Difference Water Index). Показано, что значения индекса NDSI для облачных пикселей сильно отстоят от значений этого индекса для пикселей освещенной сухой поверхности; пороговое значение индекса NDSI должно отделять левый пик гистограммы. Также показано, что значения индекса NDWI для пикселей водной поверхности сильно отстоят от значений этого индекса от пикселей облачных теней; пороговое значение индекса NDWI должно отделять правый пик гистограммы.

Показано, что использование найденных предложенным методом пороговых значений позволяет провести разделение объектов, а использование для одного снимка пороговых значений другого снимка приводит к ошибкам классификации.

Dynamic spectral indexes using for analyzing multispectral data

O.V. Nikolaeva (nika@kiam.ru)

The problems of separating clouds and bright dry illuminated surfaces, as well as cloud shadows and reservoirs are considered. These problems are an important part of the cloud-shadow mask building problem. The method of separating such objects in multispectral images are developed. The method relies on the use of dynamic threshold values of spectral indices obtained from the analysis of histograms of these indices for a given image. The method was tested via HYPERION images.

The indexes NDSI (Normalized Difference Snow Index) and NDWI (Normalized Difference Water Index) are under consideration. It is shown that the NDSI index values for cloud pixels are strongly distant from the values of this index for pixels of the illuminated dry surface; the NDSI index threshold must separate the left histogram peak. It is also shown that the NDWI index values for water surface pixels are strongly distant from the values of this index from cloud shadow pixels; the NDWI threshold should separate the right histogram peak.

It is shown that using the thresholds found by the proposed method allows separating objects, and using thresholds obtained for one image in another image analysis leads to classification errors.

Особенности моделирования радиационных потоков в атмосфере Венеры

Фомин Б.А.¹ (b.fomin@mail.ru), Разумовский М.В.²

¹*Институт глобального климата и экологии имени академика Ю. А. Израэля, Москва, Россия*

²*Научное объединение LLC Equium KZ*

Молекулярная спектроскопия и методы моделирования радиационных потоков для атмосферы Земли достигли высокого уровня развития. Однако атмосфера Венеры обладает рядом особенностей, требующих учёта в Line-by-Line (LbL) моделях. В докладе представлена эффективная LbL модель, использующая наряду со спектроскопической базой HITRAN 2016 также базу HITEMP для расчётов радиации в высокотемпературных нижних слоях атмосферы Венеры. Также, так как для газового состава Венеры ещё не достаточно разработаны модели «континуума» и далёких крыльев линий, вместо «земного» обрыва линий на расстояниях 25 см^{-1} от центра, для применения в венерианских условиях может использоваться произвольный обрыв линий вплоть до расстояний в 250 см^{-1} . При этом, для решения проблемы увеличения времени расчёта из-за большого числа учитываемых линий и протяжённости их контуров предложены оригинальные «быстрые» алгоритмы и “lookup” таблицы. В докладе обсуждается связь неопределённости спектроскопических данных и точности моделирования радиационного баланса в атмосфере Венеры. Представлена база LbL расчётов (с учётом рассеяния облаками и молекулами) для валидации радиационных блоков моделей общей циркуляции атмосферы Венеры.

Peculiarities of Modeling Radiation Fluxes in the Venus Atmosphere

B.A. Fomin¹ (b.fomin@mail.ru), M.V. Razumovskiy²

¹*Yu.A. Izrael Institute of Global Climate and Ecology, Moscow, Russia*

²*Scientific community LLC Equium KZ*

Molecular spectroscopy and radiation flux modeling methods have advanced significantly for Earth's atmosphere, but the unique characteristics of Venus's atmosphere necessitate adaptations in Line-by-Line (LbL) models. We introduce an efficient LbL model that

employs the HITRAN 2016 and HITEMP spectroscopic databases to calculate radiation fluxes in Venus's high-temperature lower atmosphere. Given the underdeveloped nature of "continuum" and far wing line models for Venus's gaseous composition, we propose extending the line cutoff distance from 25 cm^{-1} to 250 cm^{-1} for Venusian applications. To address the increased computational time resulting from the larger number of considered lines and extended contours, we introduce original "fast" algorithms and "lookup" tables. Furthermore, we explore the relationship between spectroscopic data uncertainty and the modeling accuracy of Venus's atmospheric radiation balance. Our study presents a database of LbL calculations, accounting for cloud and molecular scattering, for validating radiative transfer schemes in Venus atmosphere within general circulation models.

Влияние информации по линиям поглощения в спектроскопических базах данных на моделирование атмосферного переноса солнечного излучения и определение содержания метана в ближнем ИК диапазоне

Чеснокова Т. Ю.¹ (ches@iao.ru), Ченцов А.В.¹ (cav@iao.ru), Грибанов К.Г.² (kgribanov@remotesensing.ru), Задворных И.В.² (ilyazadvornyh@gmail.com), Захаров В.И.² (v.zakharov@remotesensing.ru)

¹ *Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, Томск, Россия*

² *Уральский федеральный университет, Екатеринбург, Россия*

Для мониторинга содержания метана в атмосфере используются измерения атмосферных солнечных спектров в спектральном диапазоне $5800\text{-}6200 \text{ cm}^{-1}$, например, спутниковые измерения GOSAT, наземные измерения международной сети TCCON. Различия в параметрах линий поглощения CH_4 в спектроскопических базах данных могут приводить к погрешностям определения содержания метана из измеренных солнечных спектров более 2% [1]. Также на точность определения содержания метана оказывает влияние неточное знание параметров линий мешающих газов в измеряемом диапазоне, в частности, H_2O . Спектроскопические базы (БД) параметров линий поглощения регулярно обновляются, поэтому необходимо проводить их валидацию. Недавно появились новые версии широко используемых БД HITRAN2020[2] и GEISA2020[3]. Эффективным способом оценки качества спектроскопической информации по линиям поглощения является сравнение большого набора модельных и измеренных с высоким спектральным разрешением атмосферных спектров. Это позволяет выявить систематические погрешности в параметрах линий, таких как интенсивность, положение центра линий, коэффициенты уширения давлением.

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 с высоким спектральным разрешением в различных атмосферных условиях. Определено содержание метана в столбе атмосферы с использованием различных версий спектроскопических БД HITRAN (2008, 2012, 2016, 2020), GEISA(2015, 2020) и ATM(2016, 2020)[4]. Для каждой спектроскопической БД было рассчитано усредненное по 100 спектрам значение RMS (отклонение рассчитанных спектров от измеренных). Было обнаружено, что в диапазоне $6000\text{-}6100 \text{ cm}^{-1}$ использование параметров линий CH_4 из новой версии HITRAN2020 по сравнению с предыдущей HITRAN2016 приводит к лучшему согласию с атмосферными измерениями, $\text{RMS}=0,52$ и $0,54$, соответственно. Однако, моделирование с параметрами линий CH_4 из HITRAN2008 по-прежнему дает наименьшее $\text{RMS}=0,49$ среди всех рассмотренных БД.

Также сделаны оценки влияния различия в параметрах линий поглощения H_2O на моделирование атмосферных спектров в диапазоне $5900\text{--}6100\text{ см}^{-1}$. Кроме вышеперечисленных спектроскопических БД применялись высокоточные измерения параметров линий H_2O в ИОА СО РАН [5]. Было показано, что наилучшее согласие с атмосферными измерениями дает использование экспериментальных параметров линий H_2O [5], особенно в случае большого содержания водяного пара в атмосфере.

Исследования Чесноковой Т. Ю., Ченцова А.В. выполнены при финансовой поддержке в рамках государственного задания ИОА СО РАН. Работы Грибанова К.Г., Задворных И.В., Захарова В.И. поддержаны Министерством высшего образования и науки РФ (проект №FEUZ-2023-0023).

1. T.Yu. Chesnokova, M.V. Makarova, A.V. Chentsov, V.S. Kostsov, A.V. Poberovskii, V.I. Zakharov, N.V. Rokotyan Estimation of the impact of differences in the CH_4 absorption line parameters on the accuracy of methane atmospheric total column retrievals from ground-based FTIR spectra// JQSRT. 2020. V.254. 107187
2. HITRAN online URL <https://hitran.org/>
3. GEISA URL <http://www.pole-ether.fr>
4. Compilations from Geoffrey Toon (JPL) <http://mark4sun.jpl.nasa.gov/toon/linelist/linelist.html>
5. Deichuli V.M., Petrova T.M., Solodov A.M., Solodov A.A., Chesnokova T.Yu. and Trifonova-Yakovleva A.M. H_2O Absorption Line Parameters in the $5900\text{--}6100\text{ см}^{-1}$ Spectral Region // Atmospheric and Oceanic Optics. 2021. V. 34. N. 3. P. 184–189

Impact of absorption line parameters information in spectroscopic databases on simulation of the atmospheric transfer of solar radiation and methane content retrieval in the near infrared region

T.Yu. Chesnokova¹ (ches@iao.ru), A.V. Chentsov¹ (cav@iao.ru), K.G. Griбанov² (kgriбанov@remotesensing.ru), I.V. Zadvornyh² (ilyazadvornyh@gmail.com), V.I. Zakharov² (v.zakharov@remotesensing.ru)

¹V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Tomsk, Russia,
²Ural Federal University, Yekaterinburg, Russia

The measurements of the atmospheric solar spectra are used for monitoring of methane content in the atmosphere, for example, the GOSAT satellite measurement, the TCCON international net of ground-based Fourier spectrometers. The discrepancies in the CH_4 absorption line parameters in spectroscopic databases can cause errors more than 2% in results of methane content retrieval from the measured solar absorption spectra [1]. Moreover, inaccurate information on absorption line parameters of interfering gases, in particular H_2O , in the spectral region of the measurements, influences on the CH_4 content determination. The spectroscopic databases are regularly updated, and it is necessary to validate theirs. Recently, the HITRAN2020 [2] and GEISA2020 [3] new issues of widely used spectroscopic databases were appeared. The effective approach of estimation of the spectroscopic line parameter's information is a comparison of large set of modeled and measured atmospheric spectra with a high resolution. It allows eliciting the systematic errors in the absorption line parameters, such as intensity, line position, and broadening coefficients.

The atmospheric solar spectra are simulated in the CH_4 absorption bands of near infrared spectral region and compared with the atmospheric spectra measured by a Bruker IFS 125M Fourier spectrometer with high spectral resolution in the Kourovka observatory. The CH_4 content in atmospheric column is retrieved with use of different versions of the spectroscopic databases: HITRAN (2008, 2012, 2016, 2020), GEISA (2015, 2020) and ATM (2016, 2020) [4]. The RMS value (root-mean-square deviation of modeled spectra from measured spectra), averaged by 100 spectra, was calculated for each spectroscopic database. It was revealed that the use of CH_4 line parameters from new version HITRAN2020 agrees better with the atmospheric measurements in comparison with previous version HITRAN2016, $\text{RMS}=0.52$ и 0.54 ,

correspondingly. However, the simulation with CH₄ line parameters from the HITRAN2008 still gives minimal RMS=0.49 among all considered spectroscopic databases.

The impact of difference in the H₂O absorption line parameters on the simulation of atmospheric spectra is estimated in the 5900-6100 cm⁻¹ region. In addition to the above-named spectroscopic databases, the H₂O absorption line parameters data, measured with a high accuracy in the IAO SB RAS [5], are applied in the simulation. It was shown that the use of experimental parameters of H₂O lines [5] gives the best agreement with the atmospheric measurements, especially in the case of high content of water vapor in the atmosphere.

The investigations of T.Yu. Chesnokova and A.V. Chentsov were supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences). The work of K.G. Gribanov, I.V. Zadvornyh, V.I. Zakharov was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (project (проект №FEUZ-2023-0023)).

1. T.Yu. Chesnokova, M.V. Makarova, A.V. Chentsov, V.S. Kostsov, A.V. Poberovskii, V.I. Zakharov, N.V. Rokotyan Estimation of the impact of differences in the CH₄ absorption line parameters on the accuracy of methane atmospheric total column retrievals from ground-based FTIR spectra// JQSRT. 2020. V.254. 107187
2. HITRAN online URL <https://hitran.org/>
3. GEISA URL <http://www.pole-ether.fr>
4. Compilations from Geoffrey Toon (JPL) <http://mark4sun.jpl.nasa.gov/toon/linelist/linelist.html>
5. Deichuli V.M., Petrova T.M., Solodov A.M., Solodov A.A., Chesnokova T.Yu. and Trifonova-Yakovleva A.M. H₂O Absorption Line Parameters in the 5900–6100 cm⁻¹ Spectral Region // Atmospheric and Oceanic Optics. 2021. V. 34. N. 3. P. 184–189

Метод вокселизации при моделировании переноса излучения в неравновесной среде

Железнов И.И. (zheleznov96y@gmail.com), Будаков В.П.
ФГБУ ВО НИУ «МЭИ», Москва, Россия

Постоянное развитие вычислительной техники приводит к созданию новых универсальных подходов, позволяющих дать обоснование свойствам переноса излучения в неравновесной среде. В частности, незначительная роль столкновений в атмосферной среде требует кинетического описания многих процессов, связанных с передачей энергии, наиболее очевидным из которых является ускорение частиц до высоких энергий. При этом, функция распределения частиц, как правило, неизвестна. Она формируется в результате взаимодействия с коллективными электромагнитными полями, которые описываются как ансамбль плазменных волн. Асимметрия в функции распределения частиц приводит к возникновению волн, которые в своей самой ранней линейной фазе могут быть прослежены аналитически. Более поздняя фаза, когда достигается насыщение, и волны изменяют распределение частиц, по своей сути не линейна. Представляет интерес подход, позволяющий оценивать перенос излучения в неравновесной среде с помощью моделирования газового разряда в трубке цилиндрической геометрии. Здесь для математического описания кинетики частиц и излучения плазмы используется модель самосогласованной плазмы, основанная на системе уравнений Власова-Пуассона. Такое представление открывает совершенно новый спектр возможностей при проведении исследований излучательных свойств атмосферной среды за счет детальной экспериментальной проверки в лаборатории на земной поверхности. При этом нет необходимости запуска сложных и дорогих летательных аппаратов и спутников. Однако существует некоторая сложность. Скорость геометрической обработки является основным и возможно единственным недостатком функционального представления пространственной цилиндрической сцены. Время просчета одного кадра может варьироваться от нескольких секунд (при низком разрешении), до нескольких десятков часов. В таком случае нельзя говорить об интерактивности процесса моделирования, т.к.

возникают проблемы при создании и редактировании аналитически заданных объектов. Выходом из данной ситуации может послужить «метод вокселизации». Основная его идея заключается в том, чтобы захватить сложные объекты, более простыми, ограничивающими объемами с помощью разделения пространства на области или «воксели». Каждому вокселю присваивается список объектов, находящихся в нем. Когда разыгрывается луч, сначала рассматривается область, из которой он исходит. Если он попадает на случайные объекты в списке начального вокселя, пересечения сортируются, и сохраняется ближайший из них. Если пересечение находится в текущем вокселе, то нет необходимости пересекать какие-либо другие объекты. Если не найдено пересечение или список объектов пуст, луч перемещается в соседний воксель и проверяется его список объектов. Так продолжается до тех пор, пока либо пересечение не найдено, либо полностью не пересечено пространственное разделение. Поскольку объекты пересекаются примерно в том порядке, в каком они встречаются вдоль луча, а объекты, удаленные от луча, отбрасываются, следовательно, количество пересечений значительно сокращается. Авторами настоящей работы выполнено сравнение диффузионного и радиационного переноса частиц и фотонов с результатами классического матричного метода для геометрии конечного цилиндра с точечным источником возбуждения в центре объёма. Определено влияние краевых эффектов для коаксиального цилиндра конечной длины. Отмечено, что экранирование внутренним цилиндром излучения в коаксиальной геометрии коррелирует с результатами, ранее полученными матричным методом. Таким образом, установлено, что метод вокселизации позволяет рассматривать источники плазмы трехмерной конфигурации произвольной формы, и демонстрирует наивысшую скорость вычислений по сравнению с существующими методами, особенно в сценах с неравномерным распределением излучающих объектов. Это делает привлекательным его применение в широком спектре задач, связанных с моделированием переноса излучения в неравновесной среде - атмосферной плазмы.

Voxelization method for modeling radiation transfer in a nonequilibrium medium

I.I. Zheleznov (zheleznov96y@gmail.com), V.P. Boudak
NRU MPEI, Moscow, Russia

The constant development of computer technology leads to the creation of new universal approaches that allow us to substantiate the properties of radiation transfer in a nonequilibrium medium. In particular, the insignificant role of collisions in the atmospheric environment requires a kinetic description of many processes associated with energy transfer, the most obvious of which is the acceleration of particles to high energies. At the same time, the particle distribution function is usually unknown. It is formed as a result of interaction with collective electromagnetic fields, which are described as an ensemble of plasma waves. The asymmetry in the particle distribution function leads to the appearance of waves, which in their earliest linear phase can be traced analytically. The later phase, when saturation is reached and the waves change the distribution of particles, is inherently not linear. Of interest is an approach that allows us to evaluate the transfer of radiation in a nonequilibrium medium by modeling a gas discharge in a cylindrical tube. Here, a self-consistent plasma model based on a system of Vlasov-Poisson equations is used to mathematically describe the kinetics of particles and plasma radiation. Such an idea opens up a completely new range of possibilities when conducting studies of the radiative properties of the atmospheric environment due to detailed experimental verification in a laboratory on the Earth's surface. At the same time, there is no

need to launch complex and expensive aircraft and satellites. However, there is some complexity. The speed of geometric processing is the main and perhaps the only drawback of the functional representation of a spatial cylindrical scene. The time to calculate a single frame can vary from a few seconds (at low resolution) to several tens of hours. In this case, it is impossible to talk about the interactivity of the modeling process, because problems arise when creating and editing analytically specified objects. The "voxelization method" can serve as a way out of this situation. Its main idea is to capture complex objects with simpler, limiting volumes by dividing space into areas or "voxels". Each voxel is assigned a list of objects located in it. When a ray is played, the area from which it originates is first considered. If it hits random objects in the initial voxel list, the intersections are sorted and the nearest one is saved. If the intersection is in the current voxel, then there is no need to intersect any other objects. If no intersection is found or the list of objects is empty, the beam is moved to the neighboring voxel and its list of objects is checked. This continues until either an intersection is found or the spatial separation is completely crossed. Since objects intersect approximately in the order in which they meet along the beam, and objects removed from the beam are discarded, therefore, the number of intersections is significantly reduced. The authors of this paper compare the diffusion and radiation transport of particles and photons with the results of the classical matrix method for the geometry of a finite cylinder with a point source of excitation in the center of the volume. The influence of edge effects for a coaxial cylinder of finite length is determined. It is noted that the shielding of radiation by the inner cylinder in the coaxial geometry correlates with the results previously obtained by the matrix method. Thus, it is established that the voxelization method allows us to consider plasma sources of a three-dimensional configuration of arbitrary shape, and demonstrates the highest calculation speed compared to existing methods, especially in scenes with an uneven distribution of emitting objects. This makes its application attractive in a wide range of tasks related to the modeling of radiation transfer in a nonequilibrium medium - atmospheric plasma.

Распределение яркости сумеречного небосвода

Будак В.П., Смирнов П.А. (smirnov.light@gmail.com)

ФГБУ ВО НИУ «МЭИ», Москва, Россия

За последние 50 лет в методах решения уравнения переноса излучения (УПИ) произошел существенный прогресс во многом благодаря развитию вычислительной техники и численным методам. Наименее разработанными на сегодня остаются две области: перенос излучения в средах со стохастическими параметрами и средах с трехмерной (3М) геометрией. Мощь численных методов во многом подавила развитие эффективных приближенных методов, что представляется несправедливым, особенно в области задач с произвольной 3М геометрией. Сложность построения расчетных схем для 3М геометрии и приближенное знание оптических характеристик среды делает более оправданным использование приближенных численных (инженерных) методов, которые с приемлемой точностью могут дать результат при существенно меньших затратах компьютерных ресурсов.

В настоящей работе предлагается приближенное решение задач 3М геометрии на примере актуальной задачи расчета яркости сумеречного небосвода. Традиционно в оптике атмосферы используется приближение независимого пикселя (IPA), когда геометрия предполагается плоской и только изменяется угол падения солнечного излучения на верхнюю границу атмосферы. С учетом толщи атмосферы и радиуса Земли такое приближение достаточно хорошо работает до углов падения не более 80 градусов.

При больших углах геометрия среды принципиально перестает быть плоской – сумерки, когда освещенность на поверхности Земли определяется рассеянным в атмосфере светом.

Для решения УПИ в этом случае представим решение в виде суммы анизотропной части (АЧ), которую определяем пусть приближенно, но аналитически, и гладкой (регулярной) части (РЧ), которую будем находить из решения УПИ. АЧ решения будем находить в малоугловой модификации метода сферических (МСГ), которая с высокой точностью описывает угловое распределение яркости в передней полусфере направлений. Как следствие регулярная часть будет удовлетворять краевой задаче с нулевыми на верхней границе атмосферы условиями и с диффузным отражением на поверхности Земли для модифицированного УПИ. Правая часть модифицированного УПИ будет содержать функцию источников, связанную с невязкой точного решения с МСГ в задней полусфере. Это приводит к тому, что угловое распределение РЧ близко к изотропному, что позволяет для его нахождения использовать диффузионное приближение.

Для уточнения полученного решения можно использовать первую итерацию, что приведет к точному учету яркости однократно рассеянного света и приближенно многократного. По Соболеву В.В. этого достаточно для любой задачи оптики атмосферы. В принципе для малых оптических толщ (чистой атмосферы) можно ограничиться первой итерацией от МСГ, исключая расчет РЧ в диффузионном приближении.

Отметим, что метод применим не только к сумеречной части у терминатора Земли, но и сразу ко всей атмосфере. Оценка точности предложенного решения проверена сравнением УПИ для плоской геометрии, а в области сумерек с моделированием поля яркости методом Монте-Карло.

Luminance distribution of the twilight sky

V.P. Budak, P.A. Smirnov (smirnov.light@gmail.com)

MPEI, Moscow, Russia

Over the past 50 years, significant progress has been made in methods for solving the radiative transfer equation (RTE), mostly due to the development of computer technologies and numerical methods. Two areas remain the least developed today: radiation transfer in media with stochastic parameters and media with three-dimensional (3D) geometry. The power of numerical methods has largely suppressed the development of effective approximate methods, which seems unfair, especially in the field of problems with arbitrary three-dimensional geometry. The complexity of construction computational schemes for three-dimensional geometry and approximate knowledge of the optical characteristics of the medium makes it more justified to use approximate numerical (engineering) methods capable of producing results with acceptable accuracy at much lower computational resources.

In this paper, an approximate solution of 3D geometry problems is proposed using the actual problem of calculating the luminance of the twilight sky as an example. Traditionally, the independent pixel approximation (IPA) is used in atmospheric optics, when the geometry is assumed to be flat and only the angle of incidence of the solar radiation on the upper boundary of the atmosphere changes. Taking into account the thickness of the atmosphere and the radius of the Earth, such an approximation works quite well up to angles of incidence of no more than 80 degrees. At large angles, the geometry of the medium fundamentally ceases to be flat, it is twilight, when the illumination on the Earth's surface is determined by the light scattered in the atmosphere.

To solve the RTE in this case, we represent the solution as the sum of the anisotropic part (AP), which is determined albeit approximately, but analytically, and the smooth (regular) part (RP), which we will find from the RTE solution. AP solutions will be found in the small-angle modification of the spherical harmonics method (MSH), which with high accuracy describes the angular luminance distribution in the forward hemisphere directions. As a consequence, the regular part will satisfy the boundary value problem with zero conditions at the upper boundary of the atmosphere and with diffuse reflection on the Earth's surface for the modified RTE. The right side of the modified RTE will contain the source function associated with the discrepancy of the exact solution with the MSH in the rear hemisphere. This leads to the fact that the RP angular distribution is close to isotropic, which makes it possible to use the diffusion approximation to find it.

To refine the solution obtained, the first iteration can be used, which lead to an accurate account of the luminance of singly scattered light and approximately multiple scattered. According to Sobolev V.V. this is sufficient for any problem of the atmospheric optics. In principle, for small optical depths (pure atmosphere), could be restricted to the first iteration from the MSH, excluding the calculation of RP in the diffusion approximation.

Note that the method is applicable not only to the twilight part near the Earth's terminator, but also to the entire atmosphere at once. The accuracy estimation of the proposed solution is verified by comparing the RTE for the flat geometry, and in the twilight region with the simulation of the luminance field by the Monte Carlo method.

Постерная сессия

Описание алгоритмов решения задачи переноса излучения в атмосфере Земли

Федотова Е.А. (godograf87@mail.ru), Мингалев И.В. (mingalev_i@pgia.ru), Орлов К.Г. (orlov@pgia.ru)

Полярный геофизический институт, Апатиты, Россия

В данной работе описаны алгоритмы вычисления коэффициента молекулярного поглощения, решения уравнения переноса излучения, а также алгоритм построения параметризации молекулярного поглощения и других оптических параметров. Расчет поля теплового и солнечного излучения в атмосферах Земли и других планет является очень требовательной к вычислительным ресурсам задачей. Авторами данной работы были реализованы алгоритмы решения этой задачи для земной атмосферы с использованием графических ускорителей фирмы NVIDIA, а также центрального процессора.

Description of algorithms for solving the problem of radiation transfer in the Earth's atmosphere

E.A. Fedotova (godograf87@mail.ru), I.V. Mingalev (mingalev_i@pgia.ru), K.G. Orlov (orlov@pgia.ru)

Polar Geophysical Institute, Apatity, Russia

This paper describes algorithms for calculating the molecular absorption coefficient, solving the radiation transfer equation, as well as an algorithm for constructing the parametrization of molecular absorption and other optical parameters. Calculating the field of

thermal and solar radiation in the atmospheres of the Earth and other planets is a very demanding computational task. The authors of this work have implemented algorithms for solving this problem for the Earth's atmosphere using NVIDIA graphics accelerators, as well as a central processor.

СЕКЦИЯ 4. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ РАДИАЦИИ с ОБЛАКАМИ и АЭРОЗОЛЕМ

Председатель: д.ф.-м.н. Горчаков Г.И. (ИФА РАН, Москва, Россия)

Сопредседатель: д.ф.-м.н. Виноградова А.А. (ИФА РАН, Москва, Россия), д.ф.-м.н.

Петрушин А.Г. (ИАТЭ НИЯУ МИФИ, Обнинск, Россия), д.ф.-м.н. Михайлов Е.Ф. (СПбГУ, Санкт-Петербург, Россия)

SESSION 4. RADIATION-CLOUD and RADIATION-AEROSOL INTERACTIONS

Chairman: Dr. G.I. Gorchakov (IAP RAS, Moscow, Russia)

Co-chairman: Dr. A.A. Vinogradova (IAP RAS, Moscow, Russia), Dr. A.G. Petrushin (MEPHI

IATE, Obninsk, Russia), Dr. E.F. Mikhailov (SPbSU, Saint Petersburg, Russia)

Устные доклады

Результаты совместных измерений микрофизических характеристик аэрозоля с бортов самолета-лаборатории и научного судна в Карском море в сентябре 2022 г.

Зенкова П.Н. (zpn@iao.ru), Белан Б.Д., Кабанов Д.М., Круглинский И.А., Сакерин С.М., Чернов Д.Г.

Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, Томск, Россия

В сентябре 2022 года впервые проведены одновременные измерения характеристик аэрозоля в атмосфере Карского моря с бортов самолета-лаборатории Ту-134 «Оптик» и НИС «Академик Мстислав Келдыш» (рейс 89.1). Непосредственный пролет самолета над судном на высоте 200 м от поверхности моря состоялся дважды – 9 и 10 сентября 2022 г. В докладе обсуждаются временная и пространственная (профили) изменчивость характеристик аэрозоля в период самолетной и морской экспедиций.

Исследования атмосферного аэрозоля на НИС «Академик Мстислав Келдыш» выполнялись с 6 по 19 сентября 2022 г. В период рейса средние значения характеристик аэрозоля составили: массовая концентрация поглощающего вещества (черного углерода) $M_{eBC} = 49$ нг/м³, объём частиц мелкодисперсной (субмикронной) фракции $V_f = 0.29$ мкм³/см³, объём крупнодисперсных частиц $V_c = 4.18$ мкм³/см³. Максимальные значения характеристик аэрозоля ($M_{eBC} = 225$ нг/м³, $V_f = 0.87$ мкм³/см³) наблюдались при проходе Карских ворот и вблизи о. Колгуев, что обусловлено антропогенным воздействием. Характеристики аэрозоля в 89-м рейсе несколько отличались от средних многолетних значений в Карском море, например, концентрации M_{eBC} были в 1.4 раза больше.

Измерения в самолётной экспедиции проводились в западной части Карского моря вблизи п-ова Ямал. В вертикальном распределении аэрозоля 9 сентября 2022 г. наблюдался слабо выраженный слой перемешивания с низким содержанием субмикронного аэрозоля в приземном слое (M_A около 8 мкг/м³) и постепенным спадом до 1 мкг/м³ на высоте 3.5 км. На высотах 5.5÷7 км отмечен рост концентраций субмикронного аэрозоля. Концентрации M_{eBC} на высотах до 2 км составляли около 450 нг/м³ и далее снижались до 25 нг/м³ на высоте 7.5 км. В слое 7.5÷8.5 км наблюдался резкий рост концентраций M_{eBC} до величины 300 нг/м³.

10 сентября, вертикальное распределение субмикронного аэрозоля и поглощающего вещества тоже характеризовалось слабо выраженным слоем перемешивания: M_A до 3.5 км, M_{eBC} до 3 км. Концентрации M_A постепенно спадали от 3 мкг/м³ в приземном слое до 0.4 мкг/м³ на высоте 3.5 км. В слое 2÷5.5 км отмечен рост

концентраций поглощающего вещества до 280 нг/м^3 . Анализ обратных траекторий, полученных с использованием модели HYSPLIT (<https://www.ready.noaa.gov/HYSPLIT.php>), показал, что воздушные массы в район измерений поступали через северный полюс с Гренландии, севера Канады, Сибири.

Более подробно рассматриваются характеристики аэрозоля 9 и 10 сентября – в периоды одновременных судовых и самолетных измерений. Данные судовых измерений в этот период отличались низкими значениями характеристик аэрозоля: концентрации M_{eBC} варьировали от 15 до 52 нг/м^3 , при среднем значении 15 нг/м^3 ; концентрации V_f – от 0.02 до $0.1 \text{ мкм}^3/\text{см}^3$, при среднем значении $0.04 \text{ мкм}^3/\text{см}^3$. Если экстраполировать самолетные данные до уровня моря, то 9 сентября M_{eBC} составляла 168 нг/м^3 , а 10 сентября – 36 нг/м^3 . Концентрации M_{eBC} , рассчитанные по данным реанализа MERRA-2 (<https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni>), в приземном слое менялись от 5 до 15 нг/м^3 (среднее – 9 нг/м^3), а интегральное содержание eBC в столбе атмосферы составило 0.26 мг/м^2 . По данным самолетного зондирования интегральное содержание eBC в столбе атмосферы до 9 км составило 0.43 мг/м^2 .

Исследования в морской экспедиции проводились в рамках проекта РНФ № 21-77-20025.

Results of joint measurements of microphysical characteristics of aerosol onboard aircraft laboratory and research vessel in the Kara Sea in September 2022

P.N. Zenkova (zpn@iao.ru), B.D. Belan, D.M. Kabanov, I.A. Kruglinsky, S.M. Sacerin, D.G. Chernov

V. E. Zuev Institute of Atmospheric Optics, SB RAS, Tomsk, Russia

In September 2022, simultaneous measurements of aerosol characteristics in the atmosphere of the Kara Sea were carried out for the first time onboard aircraft laboratory Optik TU-134 and RV Akademik Mstislav Keldysh (cruise 89.1). Aircraft flew immediately over ship at the height of 200 m above sea surface twice: on September 9 and 10, 2022. In this report we discuss the temporal and spatial (profiles) variations in aerosol characteristics in the period of aircraft and marine expeditions.

Studies of atmospheric aerosol onboard RV Akademik Mstislav Keldysh were carried out from September 6 to 19, 2022. In the period of the cruise the average aerosol characteristics were: the mass concentration of absorbing substance (black carbon) $M_{eBC} = 49 \text{ нг/м}^3$, the volume of particles in fine (submicron) fraction $V_f = 0.29 \text{ мкм}^3/\text{см}^3$, and the volume of coarse particles $V_c = 4.18 \text{ мкм}^3/\text{см}^3$. The aerosol characteristics were maximal ($M_{eBC} = 225 \text{ нг/м}^3$, $V_f = 0.87 \text{ мкм}^3/\text{см}^3$) during passage of the Kara Gates and near the Kolguev Island, due to anthropogenic effect. The aerosol characteristics in 89th cruise differed somewhat from multiyear average values in the Kara Sea; e.g., the concentrations M_{eBC} were a factor of 1.4 larger.

The measurements in the aircraft expedition were carried out in the western part of the Kara Sea near the Yamal Peninsula. In the vertical distribution of aerosol, on September 9, 2022 there was a poorly defined mixing layer with the low content of submicron aerosol in the near-surface layer (M_A of about 8 мкг/м^3) and a gradual decrease to 1 мкг/м^3 at the altitude of 3.5 km. The concentration of submicron aerosol was noted to grow at altitudes of 5.5-7 km. The concentrations M_{eBC} at altitudes up to 2 km were about 450 нг/м^3 , decreasing to 25 нг/м^3 further at the altitude of 7.5 km. The concentrations M_{eBC} increased sharply to 300 нг/м^3 in the layer of 7.5-8.5 km.

On September 10, the vertical distributions of submicron aerosol and absorbing substance were also characterized by poorly defined mixing layer: M_A up to 3.5 km, and M_{eBC} up

to 3 km. The concentrations M_A gradually decreased from $3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ in the near-surface layer to $0.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ at the altitude of 3.5 km. The concentrations of absorbing substance were noted to increase to $280 \text{ ng}/\text{m}^3$ in the layer of 2-5.5 km. Analysis of back trajectories, obtained using the HYSPLIT model (<https://www.ready.noaa.gov/HYSPLIT.php>), showed that air masses came to the measurement region through the North Pole from Greenland, north of Canada, and Siberia.

We analyzed more comprehensively the aerosol characteristics on September 9 and 10, i.e., in periods of simultaneous ship- and aircraft-based measurements. The ship-based measurements in this period stood out in low aerosol characteristics: the concentrations M_{eBC} varied from 15 to $52 \text{ ng}/\text{m}^3$, the average being $15 \text{ ng}/\text{m}^3$; and the concentrations V_f , from 0.02 to $0.1 \mu\text{m}^3/\text{cm}^3$, the average being $0.04 \mu\text{m}^3/\text{cm}^3$. If we extrapolate the aircraft data down to the sea level, then M_{eBC} was $168 \text{ ng}/\text{m}^3$ on September 9, but $36 \text{ ng}/\text{m}^3$ on September 10. The concentrations M_{eBC} , calculated using MERRA-2 reanalysis data (<https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni>), varied from 5 to $15 \text{ ng}/\text{m}^3$ in the near-surface layer (average being $9 \text{ ng}/\text{m}^3$); and eBC , integrated over the atmospheric column, had been $0.26 \text{ mg}/\text{m}^2$. Data from aircraft sensing indicate that the content eBC , integrated over the atmospheric column up to 9 km, had been $0.43 \text{ mg}/\text{m}^2$.

Studies in marine expedition were carried out in the framework of the Russian Science Foundation project no. 21-77-20025.

CO₂ облака на Марсе по данным прибора ACS на борту орбитального аппарата TGO проекта «ЭкзоМарс»

Лугинин М.С.¹ (mikhail.luginin@phystech.edu), Игнатьев Н.И.¹, Фёдорова А.А.¹, Трохимовский А.Ю.¹, Беляев¹ Д.А., Григорьев А.В.², F. Montmessin³, Кораблёв О.И.¹

¹ *Институт космических исследований РАН, Москва, Россия*

² *Australian National University, Канберра, Австралия*

³ *LATMOS-UVSQ, Гьянкур, Франция*

Основной составляющей марсианской атмосферы является углекислый газ. Его сезонный цикл существенно влияет на атмосферную динамику и климат Марса. Каждый год образование CO₂ льда в полярных областях Марса приводит к колебаниям атмосферного давления вплоть до 30%. Кроме того, в течение всего года конденсация углекислого газа в атмосфере приводит к образованию CO₂ облаков. Они до сих пор довольно мало изучены, несмотря на то, что наблюдались целым рядом приборов с орбиты Марса [1-4].

На Марсе наблюдаются три типа аэрозолей: минеральная пыль, водяной лед и углекислый лед. Один из способов детектирования и отождествления CO₂ льда — изучение его полос поглощения. В данной работе анализируются спектроскопические данные в области 2.7 мкм, полученные комплексом приборов ACS (Atmospheric Chemistry Suite) с борта космического аппарата TGO (Trace Gas Orbiter) проекта «ЭкзоМарс». Эта область спектра содержит два пика аэрозольного поглощения, которые расположены на 3599.5 см^{-1} и 3708.0 см^{-1} соответственно [5].

Научный комплекс ACS состоит из трех инфракрасных спектрометров: ближнего инфракрасного NIR, среднего инфракрасного MIR и теплового инфракрасного TIRVIM диапазонов. Спектральные области приборов MIR и TIRVIM позволяют наблюдать полосу поглощения CO₂ льда на 2.7 мкм и восстанавливать микрофизические свойства аэрозолей, такие как размер частиц и счётная концентрация. Спектральные данные канала NIR используются для увеличения точности восстанавливаемых величин.

В данной работе будут представлены результаты наблюдений CO₂ облаков в полосе поглощения 2.7 мкм по данным измерений комплекса ACS в режиме солнечного просвечивания в период с мая 2018 г. по июнь 2022 г.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

1. Montmessin et al. (2006). Subvisible CO₂ ice clouds detected in the mesosphere of Mars. *Icarus*, 183, 403–410. <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2006.03.015>
2. Määttä et al. (2010). Mapping the mesospheric CO₂ clouds on Mars: MEx/OMEGA and MEx/HRSC observations and challenges for atmospheric models. *Icarus*, 209, 452–469. <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2010.05.017>
3. Vincendon et al. (2011). New near-IR observations of mesospheric CO₂ and H₂O clouds on Mars. *Journal of Geophysical Research*, 116, E00J02. <https://doi.org/10.1029/2011JE003827>
4. Liuzzi et al., (2021). First Detection and Thermal Characterization of Terminator CO₂ Ice Clouds with ExoMars/NOMAD. *Geophysical Research Letters*. <https://doi.org/10.1029/2021GL095895>
5. Isokoski, K., Poteet, C. A., & Linnartz, H. (2013). Highly resolved infrared spectra of pure CO₂ ice (15–75 K). *Astronomy & Astrophysics*, 555, A85. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201321517>

CO₂ clouds on Mars observed by ACS instrument onboard TGO/EXOMARS

M. Luginin¹ (mikhail.luginin@phystech.edu), N. Ignatiev¹, A. Fedorova¹, A. Trokhimovskiy¹,
D. Belyaev¹, A. Grigoriev², F. Montmessin³, O. Korabiev¹

¹Space Research Institute (IKI), Moscow, Russia

²Australian National University (ANU), Canberra, Australia

³LATMOS-UVSQ, Guyancourt, France

The main constituent of the Martian atmosphere is carbon dioxide. It's seasonal cycle significantly affects the atmospheric dynamics and climate of Mars. During the seasonal formation of CO₂ frost deposits in the polar regions of Mars, there can be atmospheric pressure variations of up to 30%. Additionally, there are CO₂ clouds that form through carbon dioxide condensation, which have been observed by several instruments orbiting Mars, but are still not well understood. [1-4].

On Mars, there are three types of aerosols: mineral dust, water ice, and carbon dioxide ice. To distinguish carbon dioxide ice from other aerosols, one can analyze its unique absorption features. In this study, data from the Atmospheric Chemistry Suite (ACS) aboard the Trace Gas Orbiter (TGO) was used to analyze spectra in the 2.7 μm region. This region contains a CO₂ absorption feature with two aerosol absorption peaks: combination modes 2ν₂+ν₃ and ν₁+ν₃ located at 3599.5 cm⁻¹ and 3708.0 cm⁻¹ respectively [5].

ACS consists of three infrared spectrometers: Near InfraRed (NIR), Mid-InfraRed (MIR), and Thermal InfraRed (TIRVIM). MIR and TIRVIM channels have spectral coverage that allows them to observe the 2.7 μm CO₂ ice band and retrieve microphysical properties of aerosols, such as particle size and number density. The NIR spectra are used to better constrain these properties.

In this work, we will present results of CO₂ ice clouds observations using 2.7 μm absorption band the from ACS solar occultation data received in the period from May 2018 to June 2022.

The work was funded by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation.

1. Montmessin et al. (2006). Subvisible CO₂ ice clouds detected in the mesosphere of Mars. *Icarus*, 183, 403–410. <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2006.03.015>
2. Määttä et al. (2010). Mapping the mesospheric CO₂ clouds on Mars: MEx/OMEGA and MEx/HRSC observations and challenges for atmospheric models. *Icarus*, 209, 452–469. <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2010.05.017>
3. Vincendon et al. (2011). New near-IR observations of mesospheric CO₂ and H₂O clouds on Mars. *Journal of Geophysical Research*, 116, E00J02. <https://doi.org/10.1029/2011JE003827>

4. Liuzzi et al., (2021). First Detection and Thermal Characterization of Terminator CO₂ Ice Clouds with ExoMars/NOMAD. *Geophysical Research Letters*. <https://doi.org/10.1029/2021GL095895>
5. Isokoski, K., Poteet, C. A., & Linnartz, H. (2013). Highly resolved infrared spectra of pure CO₂ ice (15–75 K). *Astronomy & Astrophysics*, 555, A85. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201321517>

Радиационные эффекты облаков нижнего и верхнего яруса над территорией Западной Сибири по данным спутниковых наблюдений и численного моделирования

Насртдинов И.М.(wizard@iao.ru), Курьянович К.В., Журавлева Т.Б., Астафуров В.Г.,
Скороходов А.В.

Институт атмосферной оптики им В.Е. Зуева СО РАН, Томск, Россия

Облачность покрывает до 70% поверхности Земного шара и наряду с аэрозолем и парниковыми газами оказывает существенное воздействие на радиационный баланс в атмосфере. Облака, в зависимости от фазового состава, высоты расположения, оптических и микрофизических характеристик, по-разному влияют на потоки солнечной и тепловой радиации. Присутствие в атмосфере облачности приводит к блокированию нисходящего солнечного и уходящего собственного излучения Земли, оказывая тем самым одновременно и выхолаживающий, и нагревающий эффект. Более прозрачные кристаллические облака в совокупности могут обуславливать нагревающий эффект на уровне верхней границы атмосферы, в отличие от плотных жидкокапельных, которые приводят к выхолаживанию. В различных регионах планеты и в зависимости от сезона преобладают те или иные типы облаков со своими характеристиками, которые определяют формирование радиационного режима в конкретном районе.

По данным многолетних спутниковых (радиометр MODIS, спутники Terra/Aqua) измерений ранее были построены статистические модели характеристик различных типов облачности для Западной Сибири. Территория Западной Сибири была условно разделена на два района: северный, расположенный выше 65°с.ш., и южный – ниже 60° с.ш. Исходными данными являлись спутниковые снимки MODIS, тематические продукты MOD06_L2 (Terra) и MYD06_L2 (Aqua), содержащие сведения о параметрах облачности (оптическая толщина, эффективный радиус частиц, высота верхней границы облаков и др.), а также файлы геопривязки MOD03 и MYD03. При построении моделей использовались гистограммы распределений соответствующих характеристик и, исходя из минимума статистики по критерию согласия Колмогорова-Смирнова, подобраны теоретические распределения и найдены оценки их параметров. За период с 2010 по 2019 в летний сезон диапазоны изменения основных характеристик облаков нижнего и верхнего ярусов составили: для оптической толщины 1,5-40 и 0,75-6; для эффективного радиуса 7,5-25 мкм и 12,5-52,5 мкм. Средние значения высоты верхней границы – 1,5 км и 9 км соответственно.

Целью работы является получение оценок нисходящих и восходящих потоков коротковолнового солнечного излучения (0,2-5 мкм) в присутствии сплошной жидкокапельной и кристаллической облачности над территорией Западной Сибири в летний период на основе построенных статистических моделей характеристик облаков. Расчеты широкополосных потоков солнечной радиации выполнены для середины лета (15 июля) на широте г. Томска с использованием алгоритма метода Монте-Карло. Рассматриваемый спектральный интервал разбивался на подынтервалы, в пределах которых оптические характеристики атмосферы и подстилающей поверхности считались постоянными. Спектральные оптические характеристики облачности (коэффициент ослабления, альbedo однократного рассеяния и фактор асимметрии индикатрисы рассеяния излучения) в каждом из подынтервалов для жидкокапельных облаков

получены с помощью параметризации, предложенной А. Slingo и Н.М. Schrecker, а для кристаллических – из пакета OPAC. Фоновая аэрозольная модель атмосферы Западной Сибири была сформирована на основе пакета OPAC (continental average) и данных натурных измерений. В работе обсуждаются результаты численного моделирования радиационных потоков и их различия, обусловленные наличием облаков верхнего и нижнего ярусов по сравнению с безоблачной атмосферой.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИОА СО РАН (г. Томск).

Radiation effects of low-level clouds over Western Siberia according to satellite observations and numerical simulation

I.M. Nasrtdinov(wizard@iao.ru), K.V. Kuryanovich, T.B. Zhuravleva, V.G. Astafurov, A.V. Skorokhodov

V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics SB RAS, Tomsk, Russia

Cloudiness covers up to 70% of the Earth's surface and, as aerosols and greenhouse gases, has a significant impact on the radiation balance in the atmosphere. Clouds, depending on the phase state, altitude, optical and microphysical characteristics, have different effect on the radiation fluxes. The presence of cloudiness in the atmosphere leads to blocking of the downward solar and upward thermal radiation of the Earth, thereby providing both a cooling and heating effects. More transparent ice clouds can cause a heating effect at the top of atmosphere, in contrast to dense water clouds, which lead to cooling. In different regions of the planet and depending on the season, certain types of clouds predominate, which determine the formation of the radiation regime in a particular area.

Based on the data of long-term satellite (MODIS radiometer, Terra/Aqua satellites) measurements, statistical models of the characteristics of various types of cloudiness for Western Siberia were developed. The territory of Western Siberia was divided into two regions: northern, located above 65°N, and southern, below 60°N. The initial data were MODIS satellite images, thematic products MOD06_L2 (Terra) and MYD06_L2 (Aqua), containing information about cloudiness parameters (optical thickness, effective particle radius, cloud top height, etc.), as well as georeferencing files MOD03 and MYD03. When constructing the models, histograms of distributions of the corresponding characteristics were used and, based on the minimum of statistics according to the Kolmogorov-Smirnov agreement criterion, theoretical distributions and estimates of their parameters were found. For the period from 2010 to 2019 in the summer season, the ranges of changes in the main characteristics of the low-level and high-level clouds were: for optical depth 1.5-40 and 0.75-6; for an effective radius of 7.5-25 mkm and 12.5-52.5 mkm. The mean values of the cloud top height are 1.5 km and 9 km, respectively.

The purpose of the work is to obtain estimates of upward and downward fluxes of short-wave solar radiation (0.2-5 μm) in the presence of water and ice clouds over the territory of Western Siberia in summer based on the developed statistical models of cloud characteristics. Calculations of broadband solar radiation fluxes were performed for the middle of summer (July 15) at the latitude of Tomsk using the algorithm of the Monte Carlo method. The considered spectral interval was divided into sub-intervals; within each of them the optical characteristics of the atmosphere and the underlying surface were constant. The spectral optical characteristics of cloudiness (extinction coefficient, single scattering albedo and asymmetry factor) in each of the sub-intervals for water clouds were obtained using the parameterization proposed by A. Slingo and H.M. Schrecker, and for ice ones – from the OPAC package. The background aerosol model of the atmosphere of Western Siberia was formed on the basis of the OPAC (continental average) package and field measurements. The paper

discusses the results of numerical simulation of radiative fluxes and their differences due to the presence of the low-level and high-level clouds compared to the cloudless atmosphere.

This work was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (budget funds for IAO SB RAS).

Пропускание лазерного излучения облаками верхнего яруса на трассах земля - космос

Бусыгин В.П., Кузьмина И.Ю. (irkuzmina@bk.ru)

АО "Научно-производственная корпорация "Системы прецизионного машиностроения", Москва, Россия

В настоящее время в научно-производственной корпорации «Системы прецизионного машиностроения» (АО «НПК «СПП») разработана метрологическая лазерная система (МЛС), представляющая собой многофункциональный измерительный комплекс для выполнения высокоточных лазерных измерений дальности и псевдодальности до навигационных космических аппаратов (КА), оснащенных лазерными ретрорефлекторами и бортовой высокоточной аппаратурой регистрации лазерных импульсов (в прежней терминологии, бортовой беззапросной квантово-оптической системой (ББКОС)). Система позволяет, в частности, решать задачи контроля точности эфемеридно-временной информации навигационных КА системы ГЛОНАСС и других действующих навигационных спутниковых систем, определения расхождений бортовых и наземных шкал времени и синхронизации удалённых наземных стандартов частоты.

Следует отметить, что эффективность применения лазерных дальномерных систем сильно зависит от метеоусловий, в частности, от наличия облаков. При этом в отдельных экспериментах, проведенных в АО «НПК «СПП», удалось осуществить прием лазерных импульсов на борту КА в условиях облачности. Научная интерпретация данного результата и исследование форм и параметров облаков, при которых возможен устойчивый прием лазерных импульсов на КА, может способствовать повышению технологической производительности МЛС.

Исходя из вышесказанного, целью данной работы являлась оценка возможности функционирования МЛС в режиме односторонней лазерной локации при наличии между наземной станцией и КА определенных типов и форм облачности, допускающих прием и определение параметров лазерных импульсов.

Для проведения исследования был использован метод математического моделирования процессов генерации, распространения и приема лазерного излучения в условиях молекулярно-аэрозольной оптической модели атмосферы при наличии слоистообразных облаков верхнего и среднего ярусов в основном фронтального происхождения. Разработаны оптическая модель атмосферы для лазерной длины волны 0,532 мкм, включающая в себя слоистообразные облака верхнего и среднего ярусов с преимущественно кристаллической фазой частиц, и методика расчета переноса лазерного импульса на трассах «земля – космос» на основе метода Монте–Карло.

Исходные данные для передачи и приема лазерных импульсов в определенной мере привязаны к характеристикам рассматриваемой МЛС и, в частности, её бортового сегмента ББКОС. Параметры принимаемых импульсов исследовались как для высокоорбитальных КА с высотой орбиты $H_{\text{орб}} = 19100$ км, так и для низкоорбитальных КА с $H_{\text{орб}} = 400$ км. Определяемые величины в расчетах – интегральные значения плотности потока (или коэффициенты ослабления) E лазерного излучения на входе приемного устройства и импульсные характеристики $J(t)$, представляющие собой реакцию трассы на δ -импульс.

Выполнены расчеты переноса оптического излучения субнаносекундных лазерных импульсов наземных станций на высокоорбитальные и низкоорбитальные КА при наличии кристаллических облаков верхнего и среднего ярусов. Исследовано влияние структуры и параметров выделенных форм облаков на пространственно-временные и энергетические характеристики прямого и рассеянного компонентов лазерного излучения на входе приемной аппаратуры ББКос при различных углах расходимости исходного импульса и визирования на КА.

Показано, что принципы беззапросной лазерной дальнометрии могут быть реализованы при наличии на небосводе фронтальных перистых, перисто-слоистых и перисто-кучевых облаков, а также высокослоистых облаков с оптической толщиной до 5 – 7 единиц. Представленные результаты подтверждают возможность повышения технологической производительности систем высокоточной спутниковой лазерной дальнометрии, в частности, МЛС, так как повторяемость рассматриваемых форм облаков над территорией РФ составляет около 20%.

Transmission of laser radiation by upper-tier clouds

V.P. Busygin, I.Yu. Kuzmina (irkuzmina@bk.ru)

Research and Production Corporation "Precision Systems and Instruments" (JSC "RPC "PSI"), Moscow, Russia

At present, in the Research and Production Corporation "Precision Systems and Instruments" (JSC "RPC "PSI") has developed a Metrological Laser System (MLS), which is a multifunctional measuring complex for performing high-precision laser measurements of distance and pseudo-distance to navigation spacecraft equipped with laser retroreflectors and onboard high-precision laser pulse registering equipment (in the former terminology, an onboard segments of a no-demand (oneway) quantum optical system (NQOS)). The system allows, in particular, to solve the tasks of controlling the accuracy of ephemeris and time information of navigation spacecrafts of the GLONASS system and other operating navigation satellite systems, determining discrepancies between onboard and ground time scales and synchronizing remote ground frequency standards.

It should be noted that the operational efficiency of laser rangefinder systems strongly depends on weather conditions, in particular, on the presence of clouds. At the same time, in separate experiments conducted at JSC "RPC "PSI", it was possible to receive laser pulses on the spacecraft in cloudy conditions. The scientific interpretation of this result and the study of the shapes and parameters of clouds, at which steady reception of laser pulses on the spacecraft is possible, can contribute to improving the technological performance of MLS.

Based on the above, the purpose of this work was to assess the possibility of functioning of the MLS in the mode of one-way laser location in the presence of certain types and forms of clouds between the ground station and the spacecraft, allowing the reception and determination of the parameters of laser pulses.

To conduct the study, the method of mathematical modeling of the processes of generation, propagation and reception of laser radiation under the conditions of a molecular-aerosol optical model of the atmosphere in the presence of stratuslike clouds of the upper and middle tiers, mainly of frontal origin, was used. An optical model of the atmosphere for a laser wavelength of 0.532 microns has been developed, which includes layered clouds of the upper and middle tiers with a predominantly crystalline phase of particles, and a method for calculating the transfer of a laser pulse on the earth-space routes based on the Monte-Carlo method.

The initial data for transmitting and receiving laser pulses are to a certain extent tied to the characteristics of the MLS and, in particular, NQOS. The parameters of the received pulses were studied both for high-orbit spacecraft with an orbital altitude of 19,100 km and for low-orbit spacecraft with an orbital altitude of 400 km. Determined values in the calculations – are integral values of the flow density (or attenuation coefficients) E of the laser radiation at the input of the receiving device and the pulse characteristics $J(t)$, representing the reaction of the trace to the δ -pulse.

Calculations of the transfer of optical radiation from nanosecond laser pulses from ground stations to high-orbit and low-orbit spacecrafts in the presence of upper and middle-tier crystal clouds have been performed. The influence of the structure and parameters of the selected cloud shapes on the space-time and energy characteristics of the direct and scattered components of laser radiation at the input of the onboard segments of the NQOS receiving equipment at different angles of divergence of the initial laser pulse and sight on the spacecraft is investigated.

It is shown that the principles of one-way laser ranging can be implemented in the presence of frontal cirrus, cirrus-layered and cirrus-cumulus clouds in the sky, as well as highly layered clouds with an optical thickness of up to 5-7 units. The obtained results confirm the possibility of increasing the technological performance of high-precision satellite laser ranging systems, in particular, MLS, since the repeatability of the considered cloud forms over the territory of the Russian Federation is about 20%.

Турбулентные потоки пылевого аэрозоля в конвективных условиях

Карпов А.В. (karpov@ifaran.ru), Горчаков Г.И., Копейкин В.М., Бунтов Д.В., Гушчин Р.А.,
Даценко О.И.

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

В августе-сентябре 2021 года на опустыненной территории вблизи р. Волга были проведены экспедиционные измерения параметров ветропесчаного потока, флуктуаций дифференциальных счетных концентраций частиц аэрозоля, турбулентных пульсаций трех компонент скорости ветра и температуры воздуха, электрических токов сальтации и аэрозольных токов, напряженности электрического поля. Работы проводились на песчаной отмели с горизонтальными размерами примерно 1.5×0.7 км² обладающей сравнительно малыми вертикальными неоднородностями.

Счетные концентрации частиц аэрозоля измерялись фотоэлектрическими аэрозольными счетчиками ОЭАС-05 в диапазоне размеров 0.5 – 5.0 мкм на 4-х уровнях высоты: 0.3, 1.5, 3 и 6 м. Построены вертикальные профили суммарной концентрации частиц аэрозоля. Получены распределения частиц аэрозоля по размерам на трех уровнях высоты для фоновых условий и для режима генерации аэрозоля на подстилающей поверхности. Определены различия функций распределения с высотой при наличии ветропесчаного потока в приповерхностном слое атмосферы.

По данным флуктуаций счетных концентраций частиц аэрозоля и турбулентных пульсаций вертикальной компоненты скорости ветра рассчитаны турбулентные потоки и скорости выноса аэрозоля корреляционным методом [1-3]. Выявлены особенности турбулентных потоков для всплескового и квазинепрерывного режимов сальтации.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 20-17-00214).

1. Gorchakov G.I., Koprov B.M., Shukurov K.A. Vertical turbulent aerosol fluxes over desertized areas // Izvestia Atmos. Ocean. Phys. 2002. V. 38. Suppl. 1. P. S138–S147.
2. Gorchakov G.I., Karpov A.V., Gushchin R.A. Turbulent Fluxes of the Dust Aerosol on the Desertified Area // Doklady Earth Sciences. 2020. V. 494 No. 2. P. 799-802

Turbulent fluxes of dust aerosol under convective conditions

A.V. Karpov (karpov@ifaran.ru), G.I. Gorchakov, V.M. Kopeikin, D.V. Buntov, R.A. Gushchin, O.I. Datsenko

Institute of Atmospheric Physics A.M.Obukhov RAS, Moscow, Russia

In August-September 2021, in the deserted area near the river Volga, expeditionary measurements of wind-sand flux parameters, fluctuations of differential count concentrations of aerosol particles, turbulent pulsations of three components of wind speed and air temperature, saltation and aerosol currents, and electric field strength were carried out. The work was carried out on a sandbar with horizontal dimensions of approximately $1.5 \times 0.7 \text{ km}^2$, which has relatively small vertical heterogeneities.

The concentrations of aerosol particles were measured with OEAS-05 photoelectric aerosol counters in the size range of $0.5\text{--}5.0 \text{ }\mu\text{m}$ at 4 height levels: 0.3, 1.5, 3, and 6 m. Vertical profiles of the total concentration of aerosol particles were plotted. The size distributions of aerosol particles are obtained at three height levels for background conditions and for the regime of aerosol generation on the underlying surface. Differences in distribution functions with height are determined in the presence of a wind-sand flux in the near-surface layer of the atmosphere.

Based on the fluctuations of countable concentrations of aerosol particles and turbulent fluctuations of the vertical component of wind speed, turbulent fluxes and velocities of aerosol removal were calculated using the correlation method [1–3]. The features of turbulent fluxes for intermittent and quasi-continuous regimes of saltation are revealed.

This work was supported by the Russian Science Foundation (grant no. 20-17-00214).

1. Gorchakov G.I., Karpov A.V., Shukurov K.A. Vertical turbulent aerosol fluxes over desertized areas // *Izvestia Atmos. Ocean. Phys.* 2002. V. 38. Suppl. 1. P. S138–S147.
2. Gorchakov G.I., Karpov A.V., Gushchin R.A. Turbulent Fluxes of the Dust Aerosol on the Desertified Area // *Doklady Earth Sciences.* 2020. V. 494 No. 2. P. 799-802
3. Karpov A.V., Gorchakov G.I., Gushchin R.A., Datsenko O.I. Vertical turbulent dust-aerosol fluxes // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics.* 2021. M. 57. No 5. P. 495-503.

Вертикальные профили счетных и массовых концентраций алевритовых частиц в приземном слое атмосферы

Гушин Р.А. (gushchin@ifaran.ru)

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

На опустыненных территориях в ветропесчаном потоке наряду с песчаной фракцией и минеральном пылевым аэрозолем присутствует алевритовая фракция частиц (с размерами 10-100 мкм). Алевритовая фракция появляется в атмосфере в песчаных бурях при эрозии почвы. При сильном ветре алевритовые частицы благодаря турбулентной диффузии могут подниматься на десятки метров.

В работах [1, 2] по данным измерений на опустыненных территориях построены вертикальные профили концентраций алевритовых частиц в приповерхностном слое атмосферы на высотах от 3 до 15 см. Предложены экспоненциальные аппроксимации указанных профилей. В [3] проанализированы короткопериодные вариации профилей сальтирующих частиц в ветропесчаном потоке на опустыненной территории.

Вертикальное распределение алевритовых частиц в приземном слое атмосферы изучено недостаточно, в настоящей работе проанализированы результаты измерений вертикальных профилей горизонтальных потоков крупных частиц на опустыненной территории в Приаралье [3]. Восстановлены профили массовых и счетных концентраций алевритовых частиц в приземном слое атмосферы. Предложены кусочно-степенные аппроксимации профилей концентрации. Получена оценка зависимости показателя степени от размера частиц.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ (грант № 20-17-00214).

1. Горчаков Г.И., Карпов А.В., Гуцин Р.А., Даценко О.И., Бунтов Д. В. Вертикальные профили концентраций алевритовых частиц на опустыненной территории // Доклады РАН. Науки о Земле. 2021. Т. 496, № 2. С. 137-142.
2. Горчаков Г.И., Карпов А.В., Гуцин Р.А., Даценко О.И., Бунтов Д.В. Вертикальное распределение алевритовых и песчаных частиц в ветропесчаном потоке над опустыненной территорией // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2021. Т. 57, № 5. С. 555-564.
3. R. A. Gushchin "Short-term variability of logarithmic concentration gradient on desertified area", Proc. SPIE 11916, 27th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics, Atmospheric Physics. 2021. 119166S.

Vertical profiles of numerical and mass concentrations of aleurite particles in the surface layer of the atmosphere

Gushchin R.A. (gushchin@ifaran.ru)

Institute of Atmospheric Physics A.M.Obukhov RAS, Moscow, Russia

In desert areas, in the wind-sand flux, along with the sand fraction and mineral dust aerosol, there is an aleurite fraction of particles (with a size of 10-100 microns). The aleurite fraction appears in the atmosphere in sandstorms during soil erosion. In a strong wind, aleurite particles due to turbulent diffusion can rise to tens of meters.

In [1, 2], vertical profiles of the concentrations of aleurite particles in the near-surface layer of the atmosphere at heights from 3 to 15 cm were constructed based on measurement data in desert areas. Exponential approximations of these profiles were proposed. In [3], short-term variations in the profiles of saltating particles in a wind-sand flux in a desertified area were analyzed.

The vertical distribution of aleurite particles in the surface layer of the atmosphere has not been studied enough; in this work, we analyzed the results of measurements of the vertical profiles of horizontal fluxes of large particles in the desertified area in the Aral Sea region [3]. The profiles of mass and number concentrations of aleurite particles in the surface layer of the atmosphere have been restored. Piecewise power-law approximations of the concentration profiles are proposed. An estimate of the dependence of the exponent on the particle size is obtained.

This work was supported by the Russian Science Foundation (grant no. 20-17-00214).

1. Gorchakov G.I., Karpov A.V., Gushchin R.A., Datsenko O.I., Buntov D.V. Vertical profiles of the saltating particle concentration on a desertified area // Doklady Earth Sciences. 2021. V. 496, No 2. P.
2. Gorchakov G.I., Karpov A.V., Gushchin R.A., Datsenko O.I., Buntov D.V. Vertical Distribution of Aleurite and Sand Particles in Windsand Flux over a Desertified Area // Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics, 2021, V. 57, No. 5, P. 486–494.
3. R. A. Gushchin "Short-term variability of logarithmic concentration gradient on desertified area", Proc. SPIE 11916, 27th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics, Atmospheric Physics. 2021. 119166S.

Рассеяние света на крупных несферических частицах в приближении физической оптики

Коношонкин А.В.^{1,2} (mgg@iao.ru), Кустова Н.В.¹, Боровой А.Г.¹, Тимофеев Д.Н.¹, Шишко В.А.^{1,2}

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

²Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия

Атмосферный аэрозоль и перистые облака играют важную роль в формировании климата планеты. Однако их оптические свойства в настоящее время недостаточно изучены, поскольку не решена задача рассеяния света на крупных несферических частицах. Это с одной стороны затрудняет интерпретацию экспериментальных данных, получаемых инструментами дистанционного зондирования, с другой стороны является основным препятствием для построения оптической модели облаков для их корректного учета в задачах переноса излучения.

До недавнего времени задача рассеяния света на крупных несферических частицах не поддавалась решению, поскольку точные численные методы, основанные на решении уравнений Максвелла в данном случае не применимы. Поскольку такие методы (FDTD, DDA и др.) эффективны для решения задачи рассеяния света на частицах меньше, либо сопоставимых с длиной волны падающего излучения, а крупные частицы атмосферного аэрозоля имеют размеры от 100 мкм. С другой стороны решение, полученное в приближение геометрической оптики для кристаллических частиц, содержит сингулярность в направлении рассеяния назад, что не позволяет применять такое решение для интерпретации лидарных данных. Только недавно, разработанный нами метод физической оптики позволил получить решение задачи рассеяния света на крупных несферических частицах, характерных для атмосферного аэрозоля и перистых облаков.

В данном докладе представлено решение задачи рассеяния света на частицах в зависимости от их формы, размера и ориентации для трех длин волн: 0,355, 0,532 и 1,064 мкм. Решение получено для гексагональных пластинок и столбиков, и частиц неправильной многогранной формы. Размеры частиц варьировались от 10 до 1000 мкм. Пространственная ориентация частиц изменялась от полностью хаотической до преимущественно горизонтальной. Результаты расчетов указывают на существенную зависимость оптических характеристик как от ориентации так и от типа частицы.

Решение задачи рассеяния света представлено в виде банка данных матриц рассеяния света, который также содержит рассчитанные на ее основе лидарное, деполяризационное и спектральное отношения. Результаты численного расчета хорошо согласуются с данными лидарных наблюдений и могут быть использованы для их интерпретации.

Light Scattering by Large Nonspherical Particles within the Physical Optics Approximation

Konoshonkin A.V.^{1,2}, Kustova N.V.¹, Borovoi A.G.¹, Timofeev D.N.¹, Shishko V.A.^{1,2}

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

²Tomsk State University, Tomsk, Russia

Atmospheric aerosol and cirrus clouds play an important role in shaping the planet's climate. However, their optical properties are currently insufficiently studied, since the problem of light scattering by large non-spherical particles has not been solved. On the one hand, this makes it difficult to interpret the experimental data obtained by remote sensing instruments, and on the other hand, it is the main obstacle to constructing an optical model of clouds for their correct consideration in radiation transfer problems.

Until recently, the problem of light scattering by large non-spherical particles could not be solved, since exact numerical methods based on solving Maxwell's equations are not

applicable in this case. Since such methods (FDTD, DDA, etc.) are effective for solving the problem of light scattering on particles smaller than or comparable to the wavelength of the incident radiation, and large particles of atmospheric aerosol have sizes from 100 μm . On the other hand, the solution obtained in the geometrical optics approximation for crystalline particles contains a singularity in the backward scattering direction, which does not allow such a solution to be used for the interpretation of lidar data. Only recently, the method of physical optics developed by us made it possible to obtain a solution to the problem of light scattering by large non-spherical particles characteristic of atmospheric aerosol and cirrus clouds.

This report presents a solution to the problem of light scattering on particles depending on their shape, size and orientation for three wavelengths: 0.355, 0.532 and 1.064 μm . The solution was obtained for hexagonal plates and columns, and particles of irregular polyhedral shape. The particle sizes varied from 10 to 1000 μm . The spatial orientation of the particles changed from completely chaotic to predominantly horizontal. The calculation results indicate a significant dependence of the optical characteristics on both the orientation and the type of particle.

The solution of the light scattering problem is presented in the form of a data bank of light scattering matrices, which also contains the lidar, depolarization, and spectral ratios calculated on its basis. The results of the numerical calculation are in good agreement with the data of lidar observations and can be used for their interpretation.

Долговременные вариации конденсационной активности аэрозоля в г. Томске

Терпугова С.А. (swet@iao.ru), Антонов А.В., Яушева Е.П., Чернов Д.Г.,
Полькин Вас.В., Полькин Вик.В., Шмаргунов В.П., Панченко М.В.
Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, Томск, Россия

Состояние аэрозоля в атмосфере определяется взаимодействием и конкуренцией различных физико-химических процессов и метеоролого-синоптических факторов. Одним из основных механизмов, модифицирующих оптические характеристики аэрозоля, является ассимиляция и диссимиляция влаги в поле переменной относительной влажности воздуха. При этом меняются рассеивающие и поглощающие свойства аэрозоля, определяющие его климатическое воздействие. Для корректного учета вклада аэрозоля в радиационные характеристики атмосферы на различных временных интервалах и в разных климатических зонах требуется знание сезонных и региональных особенностей и закономерностей его конденсационной активности.

В данной работе обобщены результаты 25-летних наблюдений (1998 – 2022 гг) гигроскопических свойств аэрозоля на Аэрозольной станции Института оптики атмосферы (<http://aerosol1.iao.ru>) в Академгородке, на юго-восточной окраине города, на расстоянии около 6 км от его центра. Основным измеряемым параметром в эксперименте является коэффициент направленного рассеяния под углом 45° на длине волны 0.51 мкм как функция относительной влажности воздуха. Полученные зависимости аппроксимируются формулой Кастена-Хенела, по которой определяется параметр конденсационной активности, который и обуславливает динамику оптической характеристики как функции влажности.

Полученные данные о параметре конденсационной активности позволили выявить основные циклы его изменчивости. Основными чертами годового хода параметра γ является наличие максимума в весеннее время и минимума в летнее. Среднемесячные значения γ в максимуме варьируют от 0.25 (2015 – 2017 гг.) до 0.55 (2000, 2002, 2019 гг.). При этом абсолютные значения в отдельные дни могут достигать 0.8. Весной (март – май)

наблюдается и наибольшая изменчивость среднемесячных значений по сравнению с остальными месяцами. Сроки весеннего максимума конденсационной активности колеблются от 10 марта до 20 апреля, наиболее вероятным периодом является 25 марта – 5 апреля. Снижение γ в летние месяцы часто обусловлено влиянием дымов удаленных лесных пожаров. Особенно сильно это проявилось в июле-августе 1999 г., мае-сентябре 2003 г., мае 2004 г., июне – августе 2012 г., июле – августе 2016 г. и августе 2017 г.

Также подтверждается существование достаточно медленных, по сравнению с сезонными и синоптическими циклами, колебаний с периодом \sim 6-7 лет. Это характерно как для года в целом, так и для всех сезонов в отдельности. Максимальные значения наблюдались в 1998-1999, 2005-2007 и 2011 гг. Минимальные среднегодовые значения отмечены в 2003, 2009 и 2016 г. Отступлением от 6-7-летнего цикла является 2012 г. – экстремальный с точки зрения длительности и интенсивности лесных пожаров. Начиная с 2018 г. наблюдается новый рост среднегодовых и среднесезонных значений γ , которые, достигнув максимума в 2019 г., в 2020 и 2021 гг снова снижаются. При этом в 2019 г., несмотря на присутствие летом в атмосфере г. Томска дымной мглы, для которой характерна низкая конденсационная активность частиц, значения γ впервые за 20 лет вышли на уровень 1998 г. Это позволяет высказать предположение, что существует и еще более длительный цикл изменчивости конденсационной активности.

Работа выполнена в рамках госзадания ИОА СО РАН.

Long-term variations of the aerosol condensation activity in Tomsk

S.A. Terpugova (swet@iao.ru), A.V. Antonov, E.P. Yausheva, D.G. Chernov,
Vas.V. Pol'kin, Vik.V. Pol'kin, V.P. Shmargunov, M.V. Panchenko

V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Tomsk, Russia

The aerosol state in the atmosphere is determined by the interactions and competition between different physical and chemical processes and meteorological and synoptic factors. One of the main mechanisms among those that modify the optical characteristics of an aerosol is the moisture assimilation/dissimilation in the variable relative air humidity field. This is accompanied by changes in the aerosol scattering and absorbing properties, which determine the climate effect of aerosol. Study of temporal variability of the aerosol properties at different temporal scales (diurnal, seasonal, annual, multi-year) is important for understanding the processes of its formation and transformation in the atmosphere. To correctly account for the aerosol properties in radiation models on different timescales and in different climatic zones, the seasonal and regional features and regularities of aerosol condensation activity should be known.

This paper summarizes the results of 25-year long observations (1998 - 2022) of the aerosol hygroscopic properties at the Aerosol Station of the Institute of Atmospheric Optics (<http://aerosol1.iao.ru>) in Akademgorodok, on the southeastern outskirts of the city, at a distance of about 6 km from its center.

The main measured parameter in the experiment is the coefficient of directional scattering at an angle of 45° at a wavelength of $0.51 \mu\text{m}$ as a function of the relative humidity of the air. The obtained dependencies are approximated by the Kasten-Hanel formula, from which the parameter of condensation activity is determined, which causes the dynamics of the optical characteristic as a function of humidity.

The data obtained on the parameter of condensation activity made it possible to obtain the principal cycles of its variability. The main features of the annual behavior of the parameter γ is the presence of maximum in spring and minimum in summer. The monthly average values γ

at maximum vary from 0.25 (2015 – 2017) up to 0.55 (2000, 2002, 2019). The absolute values on some days can reach 0.8. In spring (March-May), the greatest variability of monthly averages is also observed compared to other months. The terms of the spring maximum of condensation activity vary from March 10 till April 20, the most probable period is March 25 till April 5. The decrease of γ in summer is often due to the influence of smoke from distant forest fires. This was especially pronounced in July-August 1999, May-September 2003, May 2004, June-August 2012, July-August 2016 and August 2017.

Existence of rather slow, compared to seasonal and synoptic cycles, fluctuations with a period of $\sim 6-7$ years in the long-term behavior of the annual and seasonal average values of the parameter of condensation activity is confirmed. This is typical both for the year as a whole and for all seasons separately. The maximum values were observed in 1998-1999, 2005-2007 and 2011. The minimum average annual values were noted in 2003, 2009 and 2016. Deviation from the 6-7-year cycle is 2012, which is extreme in terms of the duration and intensity of forest fires. Since 2018, there has been a new increase in the average annual and average seasonal values γ , which, having reached a maximum in 2019, decrease again in 2020 and 2021. At the same time, in 2019, despite the presence of smoke haze in the atmosphere of Tomsk in summer, which is characterized by low condensation activity of particles, the values γ reached the level of 1998 for the first time in 20 years. This allows us to suggest that there is an even longer cycle variability of condensation activity.

The work was carried out within the framework of the state assignment of IAO SB RAS.

Изменчивость содержания минеральной и сажевой компонент приземного аэрозоля в Москве в 2022 году

Губанова Д.П.(gubanova@ifaran.ru), Копейкин В.М., Виноградова А.А.
Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия

Атмосферный аэрозоль содержит климатически значимые составляющие (в частности, пыль и черный углерод), влияющие на оптические и радиационные свойства атмосферы и поверхности. Изменчивость состава атмосферного аэрозоля очень высока и связана с вариациями как метеорологических условий, так и источников и стоков аэрозольных компонент. Большой город оказывает воздействие на все эти процессы своим «островом тепла» и специфической химией атмосферы.

В течение 2022 года в Москве, в центре города, на территории Института физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН в мониторинговом режиме проводились синхронные наблюдения за содержанием в приземном воздухе аэрозоля (различных размерных фракций частиц) и черного углерода. Методика аэрозольного эксперимента подробно описана в публикациях авторов доклада. Концентрация черного углерода (BC – black carbon) определялась с помощью аэталометра AE33 фирмы Magee Scientific. В докладе анализируются вариации почасовых средних значений массовой концентрации BC и частиц PM_{10} , $PM_{2.5}$ на разных временных масштабах – от суточных до месячных и сезонных. Для интерпретации результатов измерений привлечены метеоданные, а также траектории переноса воздушных масс к Москве (<https://www.ready.noaa.gov/HYSPLIT.php>) и данные реанализа MERRA-2 (<https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/>) о пространственном распределении пыли и BC в приземном воздухе центра европейской территории России.

В 2022 году средняя концентрация BC в центре Москвы составила 1.70 ± 0.27 мкг/м³, что несколько ниже, чем в 2019 году (по данным работы [1]), со среднемесячным максимумом в августе 2.35 мкг/м³. За год выявлены 31 сутки (<9%) с аномально высоким

содержанием в приземном воздухе минеральной (частицы размером от 2.5 до 10 мкм) и/или сажевой (BC) компоненты аэрозоля. Это 14 эпизодов длительностью от 1 до 5 суток, характеризующихся неблагоприятными метеоусловиями (повышенным атмосферным давлением, низкой влажностью и слабым ветром). Кроме того, специфическим городским показателем можно считать тот факт, что 80% таких эпизодов приходится на дни с пятницы по понедельник, когда горожане уезжают из города на выходные дни, увеличивая эмиссию BC в пригородах из-за отопления дачных построек, приготовления пищи и разведения костров.

В 2022 году эпизоды регионального и дальнего переноса BC и/или пыли от удаленных источников (такие эпизоды в 2020-21 годах рассмотрены в [2]) составили всего 5-7 суток. Несколько дней в конце августа и в сентябре перенос BC и минеральных составляющих происходил от пожаров во Владимирской области и в районе Приокско-Террасного природного заповедника. Один раз в декабре зарегистрирован дальний атмосферный перенос пыли из районов песчаных бурь в западном Казахстане (аналогично случаям в октябре [3] и в декабре [4] 2020 года). В работе рассматриваются и обсуждаются различия в элементном составе городского аэрозоля, не возмущенного дальним переносом загрязнений, а также поступающего из районов пыльных бурь или пожаров биомассы.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ, грант № 23-27-00063.

1. Popovicheva et al. *Atmosphere*. 2022. 13, 563. <https://doi.org/10.3390/atmos13040563>
2. Gubanova et al. *Atmosphere*. 2022. 13, 574. <https://doi.org/10.3390/atmos13040574>
3. Gubanova et al. *AIMS Geosciences*. 2022. 8(2), 277-302. doi: 10.3934/geosci.2022017
4. Vinogradova et al. *Atmos. Ocean. Optics*. 2022. 35(6), 758-768. doi: 10.1134/S1024856022060276

Variability of mineral and soot components of near-surface aerosol in Moscow during 2022

D.P. Gubanova (gubanova@ifaran.ru), V.M. Kopeikin, A.A. Vinogradova
A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics, RAS, Moscow, Russia

Atmospheric aerosol contains climatically significant components (in particular, dust and black carbon) that affect the optical and radiation properties of the atmosphere and the surface. The variability of aerosol composition is very high and is associated with variations in meteorological conditions, as well in sources and sinks of aerosol components. The large city exerts its own influence on all these processes by its "heat island" and the specific atmospheric chemistry.

During 2022, in Moscow city center the synchronous observations of the content of aerosol (in various particle size fractions) and black carbon in near-surface air are carried out in a monitoring mode on the territory of A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics RAS. The technique of the aerosol experiment is described in detail in the publications of the authors of this work. The concentration of black carbon (BC – black carbon) is determined using AE33 aetalmeter Magee Scientific. The report analyzes the variations of hourly average values of mass concentration of BC and PM₁₀, PM_{2.5} particles at different time scales – from daily to monthly and seasonal ones. To interpret the measurement results, we use the meteorological data, as well as the trajectories of air mass transport to Moscow (<https://www.ready.noaa.gov/HYSPLIT.php>) and MERRA-2 reanalysis data (<https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/>) on the spatial distribution of dust and BC in near-surface air of the center of the European territory of Russia.

The average BC concentration was $1.70 \pm 0.27 \mu\text{g}/\text{m}^3$ in the center of Moscow in 2022, which is slightly lower than it was in 2019 (according to work [1]), with an average monthly maximum of $2.35 \mu\text{g}/\text{m}^3$ in August. During the year, 31 days (<9%) with an abnormally high

content of mineral (particles from 2.5 to 10 microns in size) and/or soot (BC) components in near-surface aerosol were detected. These days form 14 episodes lasting from 1 to 5 days, accompanied by unfavorable meteorological conditions (high atmospheric pressure, low humidity and light wind). In addition, a specific urban indicator can be considered the fact that 80% of such extreme days fall in the interval from Friday to Monday, when citizens leave the city for the weekend, increasing BC emission in the suburbs due to the heating of suburban buildings, cooking and campfires.

Through 2022, episodes of regional and long-range transport of BC and/or dust from remote sources (such episodes in 2020-21 are considered in [2]) amounted to only 5-7 days. For several days at the end of August and in September, atmospheric transport of BC and mineral components occurred from biomass fires in the Vladimir region and in the area of Prioksko-Terrasny Nature Reserve. Also, one day in December, long-range atmospheric dust transport from sandstorm areas in Western Kazakhstan was recorded (similar to October 2020 [3] and December of 2020 [4]). The work examines and discusses differences in the elemental composition of urban aerosol, which is not disturbed by long-range transport of pollutants, as well as coming from areas of dust storms or biomass fires.

The work was carried out with the financial support of the RSF, grant No. 23-27-00063.

1. Popovicheva et al. Atmosphere. 2022. 13, 563. <https://doi.org/10.3390/atmos13040563>
2. Gubanova et al. Atmosphere. 2022. 13, 574. <https://doi.org/10.3390/atmos13040574>
3. Gubanova et al. AIMS Geosciences. 2022. 8(2), 277-302. doi: 10.3934/geosci.2022017
4. Vinogradova et al. Atmos. Ocean. Optics. 2022. 35(6), 758-768. doi: 10.1134/S1024856022060276

Уровень «фоновой» концентрации углеродсодержащих аэрозолей как индикатор антропогенного воздействия на состав нижней атмосферы (эффект ковидного локдауна)

Власенко С.С.(s.vlasenko@spbu.ru), Михайлов Е.Ф., Иванова О.А., Аникин С.С., Рышкевич Т.И.

Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

Измерения массовой концентрации элементарного (ЕС) и органического (ОС) углерода, содержащегося в аэрозольных частицах, проводятся в течении нескольких лет на базе ресурсного центра «Геомодель» Научного Парка Санкт-Петербургского государственного университета (СПбГУ) в г. Петергофе (35 км от центра Санкт.-Петербурга). Содержание ЕС и ОС определялось в результате термооптического анализа фильтровых аэрозольных проб. Полученные временный ряды массовых концентраций аэрозольного углерода характеризуются сильной изменчивостью, максимальные концентрации ЕС и ОС на порядки превышают минимальные, что обусловлено разнообразием источников аэрозолей в регионе. При анализе подобных временных рядов принято различать периоды с высоким («загрязненные») и низким («чистые» или «фоновые») содержанием измеряемого компонента. При этом под «фоновыми» условиями понимается состояние атмосферы без заметного воздействия местных или региональных источников загрязнения, То есть фоновая концентрация какой-либо примеси в атмосфере определяется эмиссией естественных источников и дальним переносом. Определение фоновой концентрации и, соответственно, разделение исследуемых временных рядов на фоновые и загрязненные периоды проводилось с помощью REBS алгоритма [1].

Полученные по данным измерений за период 2015-2022 гг средние значения массовой концентрации аэрозольного углерода в «фоновых» условиях составили $2,3 \pm 0,1$ мкг/м³ для ОС и $0,26 \pm 0,02$ мкг/м³ для ЕС. Для обоих компонентов наблюдается

выраженный сезонный ход с максимумом в летний период и минимумом в зимний. При этом амплитуда сезонных колебаний составила около $0,2 \text{ мкг/м}^3$ для органического и $0,1 \text{ мкг/м}^3$ для элементарного углерода. Подобная сезонная изменчивость вполне объяснима, поскольку в теплое время года подключаются источники аэрозольного углерода, связанные с лесными пожарами, сельскохозяйственными палами, вегетацией растений и тд, которые распределены глобально по всему континенту.

Интересно отметить, что в 2020 году наблюдается резкий спад «фоновой» массовой концентрации ОС и ЕС, который для органического углерода более чем в 2 раза превышает амплитуду сезонных колебаний (минимальная концентрация ОС менее 1 мкг/м^3), причем до начала 2022 концентрация ОС и ЕС не достигла средних значений. Представляется разумным, что такое понижение «фоновой» уровня аэрозольного углерода вызвано локдауном, объявленным в России и Европе из-за пандемии Covid-19 в начале 2020 года, что привело к снижению антропогенных выбросов в атмосферу. Таким образом анализ уровня «фоновой» концентрации аэрозольного углерода может служить косвенным индикатором антропогенной активности.

1. A.F.Ruckstuhl, M.P.Jacobson, R.W.Field, J.A. Dodd Baseline subtraction using robust local regression estimation // Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer. 2001. V. 68. P.179-193.

"Background" concentration of carbon aerosols as an indicator of anthropogenic impact on the lower atmosphere (Covid-19 lockdown effect)

S.S. Vlasenko (s.vlasenko@spbu.ru), E.F. Mikhailov, O.A. Ivanova, S.S. Anikin, T.I. Ryshkevich

Saint Petersburg State University, Saint Petersburg, Russia

Mass concentrations of elemental (EC) and organic (OC) carbon in aerosols have been measured during several years in Peterhof (35 km from the center of Saint-Petersburg). The EC and OC concentration was obtained by thermo-optical analysis of filter aerosol samples. The time series of aerosol carbon mass concentrations display strong variability, the maximum concentrations of EC and OC exceeding the minimum ones by orders of magnitude, which can be explained by the diversity of aerosol sources in the region. When analyzing such time series, it is customary to distinguish between periods with high ("polluted") and low ("clean" or "background") contents of the measured component. "Background" conditions mean the state of the atmosphere without a noticeable impact of local or regional pollution sources, i.e. the background concentration of any impurity in the atmosphere is determined by the emission of natural sources and long-range transport. Determination of the background concentration and, accordingly, division of the studied time series into background and polluted periods was carried out using the REBS algorithm [1].

The average values of the mass concentration of aerosol carbon in the "background" conditions obtained from the measurement data for the period 2015-2022 were $2.3 \pm 0.1 \text{ }\mu\text{g/m}^3$ for OC and $0.26 \pm 0.02 \text{ }\mu\text{g/m}^3$ for EC. For both components there was a pronounced seasonal variation with a maximum in summer and a minimum in winter. The amplitude of seasonal variations was about $0.2 \text{ }\mu\text{g/m}^3$ for organic and $0.1 \text{ }\mu\text{g/m}^3$ for elemental carbon. Such seasonal variability is caused by the action of "summer" aerosol sources (forest and grass fires, agricultural residues burning, plant vegetation, etc.), which are distributed globally across the continent.

It is interesting to note that in 2020 there is a sharp decrease in the "background" mass concentration of OC and EC, which for organic carbon is more than 2 times the amplitude of seasonal fluctuations (minimum OC concentration less than $1 \text{ }\mu\text{g/m}^3$) and OC and EC

concentrations had not reached mean values until early 2022. It seems reasonable that such a decrease in the "background" level of aerosol carbon is caused by the lockdown, declared in Russia and Europe due to the Covid-19 pandemic in early 2020, which led to a decrease in anthropogenic emissions into the atmosphere. Thus, analysis of the level of "background" concentration of aerosol carbon can serve as an indirect indicator of anthropogenic activity.

1. A.F.Ruckstuhl, M.P.Jacobson, R.W.Field, J.A. Dodd Baseline subtraction using robust local regression estimation // *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*. 2001. V. 68. P.179-193.

Пространственное распределение потенциальных источников углеродсодержащих аэрозолей в центральной Сибири

Власенко С.С. (s.vlasenko@spbu.ru), Михайлова А.С., Иванова О.А., Небосько Е.Ю.,
Михайлов Е.Ф., Рышкевич Т.И.

Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

Представлены результаты траекторного анализа данных многолетних измерений содержания органического (ОС) и элементарного (ЕС) углерода в аэрозолях, проводимых на станции ZOTTO (пос. Зотино, Красноярский край). В качестве первичных данных использованы аэрозольные пробы, отобранные с высоты 300 м над уровнем поверхности на кварцевые фильтры. Содержание ЕС и ОС в пробах определялось термооптическим методом с помощью оборудования ресурсного центра «Геомодель» Научного Парка Санкт-Петербургского государственного университета (Thermal/Optical-Transmittance Carbon Aerosol Analyzer; Sunset Laboratory Inc., USA). Полученным временным рядам массовых концентраций аэрозольного углерода за период 2011-2021гг был сопоставлен массив обратных траекторий воздушных масс исходящих из точки измерений, построенный с помощью модели HYSPLIT. В результате анализа этих данных методами концентрационно-взвешенных траекторий (CWT - concentration weighted trajectory) и расчета функции вклада потенциальных источников (PSCF - potential source contribution function) были определены значения CWT и PSCF функций на сетке 150×250 ячеек, покрывающей географическую область 20°×20° с центром в пос. Зотино. Значения этих функций характеризуют интенсивность потенциальных источников углеродсодержащих аэрозолей для данной ячейки. Полученные данные позволяют выделить области с наиболее сильными эмиссиями органического и элементарного углерода и оценить сезонную изменчивость этих эмиссий. В частности, в летний период основные источники ОС и ЕС расположены к востоку от Зотино, в регионе реки Подкаменной Тунгуски, и связаны, вероятнее всего, с лесными пожарами. В холодные сезоны источники аэрозольного углерода преобладают в юго-западной части анализируемой географической области, где расположены крупные города и сосредоточена основная часть населения.

Spatial distribution of potential sources of carbonaceous aerosols in central Siberia

S.S. Vlasenko (s.vlasenko@spbu.ru), A.S. Mikhailova, O.A. Ivanova, E.Yu. Nebosko,
E.F. Mikhailov, T.I. Ryshkevich

Saint Petersburg State University, Saint Petersburg, Russia

We present the results of trajectory analysis of multi-year measurements of organic (OC) and elemental (EC) carbon in aerosols sampled on quartz filters from a height of 300 m at ZOTTO station. The EC and OC concentrations were determined by the thermo-optical method (Thermal/Optical-Transmittance Carbon Aerosol Analyzer; Sunset Laboratory Inc., USA). The

obtained time series were supplemented with the HYSPLIT backward trajectories. As a result the CWT and PSCF functions were calculated on a grid of 150×250 cells covering the geographical area 200×200 with the center in Zotino. These functions characterize the intensity of potential sources of carbon-containing aerosols for a given cell. The obtained data allow to identify the areas with the strongest organic and elemental carbon emissions and to estimate the seasonal variability of these emissions. In particular, in summer, the main sources of OC and EC are located to the east of Zotino, in the Podkamennaya Tunguska River region, and are most likely associated with forest fires. During the cold seasons, the sources of aerosol carbon dominate in the southwestern part of the geographical area under analysis, where large cities are located and the bulk of the population is concentrated.

Аномальное селективное поглощение дымового аэрозоля при массовых пожарах в бореальных лесах. Радиационные и микрофизические характеристики

Горчаков Г.И.¹(gengor@ifaran.ru), Копейкин В.М.¹, Семутникова Е.Г.², Карпов А.В.³, Гуцин Р.А.¹, Даценко О.И.¹, Горчакова И.А.¹, Пономарева Т.Я.³

¹ *Институт физики атмосферы им. А.М.Обухова РАН, Москва, Россия, Россия*

² *МГУ Физический факультет. Москва, Россия*

³ *Гидрометцентр России, Москва, Россия*

В 2018-2019 гг. на Аляске температура воздуха длительное время превышала климатические нормы, что привело к массовым лесным пожарам и крупномасштабному задымлению территории Аляски в июле-августе 2019 г. [1] Анализ вариаций оптических и микрофизических характеристик дымового аэрозоля по данным мониторинга на станциях AERONET позволил выявить многочисленные случаи появления дымового аэрозоля с аномальным поглощением в диапазоне спектра 440 - 1020 нм. Как в 2004 - 2005 гг. [2], так и в 2019 г. при массовых лесных пожарах на территории Аляски в большинстве случаев поглощательная способность дымового аэрозоля определялась присутствием черного углерода в частицах дымового аэрозоля, когда мнимая часть коэффициента преломления вещества дымового аэрозоля слабо зависит от длины волны в диапазоне спектра 440 - 1020 нм. В ряде случаев наблюдалось заметное увеличение мнимой части коэффициента преломления на длине волны 440 нм, что свидетельствует о наличии в частицах дымового аэрозоля коричневого углерода [3] (совместно с чёрным углеродом). По данным мониторинга на станциях AERONET [1] в июле - августе 2019 г. были также выявлены случаи, когда при появлении дымового аэрозоля мнимая часть коэффициента преломления дымового аэрозоля достигала больших значений (до 0.315). При этом наблюдался быстрый рост мнимой части коэффициента преломления с увеличением длины волны (в диапазоне спектра от 440 до 1020 нм). Показано, что спектральные зависимости коэффициента преломления с удовлетворительной точностью аппроксимируются степенными функциями. Проанализировано влияние мнимой части коэффициента преломления на спектральные зависимости аэрозольной оптической толщины ослабления и поглощения и, в том числе, на соответствующие показатели Ангстрема, которые в случаях появления аномального селективного поглощения заметно отличаются от своих типичных значений. Показано, что в условиях аномального поглощения дымового аэрозоля при больших значениях аэрозольной оптической толщины, как правило, радикально трансформируется радиационный режим атмосферы. В частности, может измениться знак радиационного форсинга дымового аэрозоля на верхней границе атмосферы.

1. Горчаков Г.И., Гушчин Р.А., Копейкин В.М., Карпов А.В., Семутникова Е.Г., Даценко О.И., Пономарева Т.Я. Аномальное поглощение дымового аэрозоля в видимой и ближней инфракрасной областях спектра // Доклады РАН. Науки о Земле. 2023. Т. 510. № 1. С. 92–98.
2. Eck T.F., Holben B.N., Reid J.S., Sinyuk A., Hyer E.J., O'Neill N.T., Shaw G.E., Vande Castle J.R., Chapin F.S., Dubovik O., Smirnov A. Optical properties of boreal region biomass burning aerosols in central Alaska and seasonal variation of aerosol optical depth at an Arctic coastal site. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2009 V. 16. No 114. D11208.
3. Горчаков Г.И., Васильев А.В., Веричев К.С., Семутникова Е.Г., Карпов А.В. Тонкодисперсный коричневый углерод в задымленной атмосфере // Доклады А.Н. 2016. Т. 471. № 1. С. 91-97.

Anomalous selective absorption of smoke aerosol during mass fires in boreal forests. Radiation and microphysical characteristics

G.I. Gorchakov¹ (gengor@ifaran.ru), V.M. Kopeikin¹, E.G. Semoutnikova², A.V. Karpov¹, R.A. Gushchin, O.I. Datsenko, I.A. Gorchakova, T.Ya. Ponomareva

¹*IFA them. A.M.Obukhov RAS, Moscow, Russia*

²*MSU Faculty of Physics. Moscow, Russia*

³*Hydrometeorological Center of Russia, Moscow, Russia*

In 2018-2019 in Alaska, the air temperature for a long time exceeded climatic norms, which led to massive forest fires and large-scale smoke in Alaska in July-August 2019 [1]. An analysis of variations in the optical and microphysical characteristics of smoke aerosol according to monitoring data at AERONET stations made it possible to identify numerous cases of the appearance of smoke aerosol with anomalous absorption in the spectral range 440 - 1020 nm. As in 2004 - 2005. [2], and in 2019, during massive forest fires in Alaska, in most cases, the absorptivity of smoke aerosol was determined by the presence of black carbon in smoke aerosol particles, when the imaginary part of the refractive index of the smoke aerosol substance weakly depends on the wavelength in the 440 -1020 nm. In some cases, a noticeable increase in the imaginary part of the refractive index at a wavelength of 440 nm was observed, which indicates the presence of brown carbon in smoke aerosol particles [3] (together with black carbon). According to monitoring data at AERONET stations [1], in July - August 2019, cases were also identified when, with the appearance of smoke aerosol, the imaginary part of the smoke aerosol refractive index reached large values (up to 0.315). In this case, a rapid increase in the imaginary part of the refractive index was observed with increasing wavelength (in the spectral range from 440 to 1020 nm). It is shown that the spectral dependences of the refractive index are approximated with a satisfactory accuracy by power functions. The influence of the imaginary part of the refractive index on the spectral dependences of the aerosol optical thickness of attenuation and absorption, including the corresponding Angstrom exponents, which, in the case of the appearance of anomalous selective absorption, noticeably differ from their typical values, is analyzed. It is shown that under conditions of anomalous absorption of smoke aerosol at large values of the aerosol optical thickness, as a rule, the radiative regime of the atmosphere is radically transformed. In particular, the sign of the radiative forcing of smoke aerosol at the upper boundary of the atmosphere can change.

1. Gorchakov G.I., Gushchin R.A., Kopeikin V.M., Karpov A.V., Semutnikova E.G., Datsenko O.I., Ponomareva T.Ya. Anomalous absorption of smoke aerosol in the visible and near infrared regions of the spectrum // Reports of the Russian Academy of Sciences. Earth Sciences. 2023. V. 510. No. 1. P. 92–98. (in Russian)
2. Eck T.F., Holben B.N., Reid J.S., Sinyuk A., Hyer E.J., O'Neill N.T., Shaw G.E., Vande Castle J.R., Chapin F.S., Dubovik O., Smirnov A. Optical properties of boreal region biomass burning aerosols in central Alaska and seasonal variation of aerosol optical depth at an Arctic coastal site. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2009 V. 16. No 114. D11208.
3. Gorchakov G.I., Verichev K.S., Karpov A.V., Semoutnikova E.G., Vasiliev A.V. Finely dispersed brown carbon in a smoggy atmosphere // Doklady Earth Sciences. 2016. V. 471. No 1. P. 1158-1163.

Анализ механизмов формирования полупрямого радиационного эффекта сибирского дымового аэрозоля в Арктике

Коновалов И.Б. (konov@ipfran.ru), Головушкин Н.А.

*Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова
Российской академии наук, Нижний Новгород, Россия*

Крупные природные пожары, ежегодно происходящие в Сибири, являются одним из основных источников атмосферного аэрозоля в Восточной Арктике. Однако радиационные эффекты сибирского дымового аэрозоля (СДА), которые возмущают радиационный баланс в этом климатически важном регионе и должны адекватно учитываться в климатических моделях, пока изучены слабо. Наименее изученным является полупрямой радиационный эффект (ППРЭ) СДА, который определяется радиационным воздействием аэрозоля на облачный покров. Ранее в результате численного исследования [1] было найдено, что ППРЭ сибирских дымов в Арктике сопоставим по порядку величины с соответствующим прямым радиационным эффектом, но противоположен ему по знаку. Кроме того, было обнаружено, что ППРЭ СДА не может быть объяснен известными механизмами, центральную роль в которых играет поглощение солнечного излучения аэрозолями: в частности, рассматриваемый эффект был выявлен и в тестовых расчетах, в которых основные поглощающие вещества (черный и коричневый углерод) в составе СДА отсутствовали. Определение механизмов ППРЭ СДА являлось целью данной работы.

Для достижения указанной цели были проанализированы результаты численных экспериментов, выполненных (как и в предыдущем исследовании [1]) с использованием химико-транспортной модели CHIMERE и метеорологической модели WRF. Для описания оптических свойств СДА в данной работе использовался оригинальный метод, который был разработан ранее [2] в результате сопоставления модельных расчетов оптических свойств СДА с данными спутниковых измерений. Численные эксперименты были выполнены как с учетом, так и без учета поглощения света черным и коричневым углеродом в составе дымов. На основе полученных модельных данных была проанализирована усредненная во времени и по пространству динамика потоков излучения, облачного покрова на различных ярусах облачности и метеорологических характеристик в зависимости от продолжительности радиационного воздействия дымов. В результате установлено, что основную роль в формировании ППРЭ СДА в Арктике играет уменьшение оптической толщины облаков на среднем ярусе облачности, которое вызывается ослаблением турбулентных флуктуаций скорости вертикального переноса и соответствующим уменьшением потока влаги вследствие аэрозольного выхолаживания нижней атмосферы. Полученные результаты демонстрируют ранее неизвестный механизм формирования ППРЭ слабопоглощающего атмосферного аэрозоля, а также свидетельствуют о сильных взаимосвязях между мгновенным радиационным воздействием сибирского дымового аэрозоля и метеорологическими процессами в Восточной Арктике.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-27-00172, <https://rscf.ru/project/23-27-00172/>.

1. Коновалов И.Б., Головушкин Н.А., Журавлева Т.Б., Насртдинов И.М., Ужegov В.Н., Beekmann M. Применение модельного комплекса CHIMERE-WRF для изучения радиационных воздействий сибирского дымового аэрозоля в Восточной Арктике // *Оптика атмосферы и океана*. 2023. Т. 36. № 2. С. 129-139.

2. Konovalov I.B., Golovushkin N.A., Beekmann M., and Andreae M.O.: Insights into the aging of biomass burning aerosol from satellite observations and 3D atmospheric modeling: evolution of the aerosol optical properties in Siberian wildfire plumes // *Atmos. Chem. Phys.* 2021. V. 21, P. 357–392.

Analysis of the formation mechanisms of the semi-direct radiative effect of Siberian biomass burning aerosol in the Arctic

Konovalov I.B. (konov@ipfran.ru), Golovushkin N.A.

A.V. Gaponov-Grekhov Institute of Applied Physics of the RAS, Nizhniy Novgorod, Russia

Intense wildfires that occur annually in Siberia are one of the main sources of atmospheric aerosol in the eastern Arctic. However, the radiative effects of Siberian biomass burning (BB) aerosol, which perturb the radiation balance in this climatically important region and should be adequately taken into account in climate models, are still poorly understood. The least studied is the semi-direct radiative effect (SDRE) of Siberian BB aerosol, which is determined by the radiative effect of aerosol on the cloud cover. As a result of our previous numerical study [1], it was found that the SDRE of Siberian smoke in the Arctic is comparable in order of magnitude with its direct radiative effect, but is opposite in sign. In addition, it was found that SDRE of Siberian BB aerosol cannot be explained by the known mechanisms in which the absorption of solar radiation by aerosol plays a central role: in particular, the same effect was detected in test simulations in which the main absorbing substances (black and brown carbon) of Siberian smoke were disregarded. Identifying the mechanisms of SDRE of Siberian BB aerosol was the goal of the present study.

To achieve this goal, we analyzed the results of our numerical experiments performed (as in the previous study [1]) using the CHIMERE chemistry transport model and the WRF meteorological model. To represent the optical properties of Siberian BB aerosol, in this work, we used an original method that was developed earlier [2] as a result of a comparison of simulations of the optical properties of Siberian BB aerosol with corresponding satellite observations. The experiments were performed both with and without taking into account the absorption of light by black and brown carbon within the Siberian smoke plumes. On the basis of the model data obtained, the time and space averaged dynamics of radiative fluxes, cloud cover at different cloud levels, and meteorological characteristics were analyzed as a function of the duration of the aerosol-radiation interaction. As a result, it has been found that the main role in the formation of SDRE of Siberian BB aerosol in the Arctic is played by a decrease in the optical thickness of clouds in the middle cloud layer, which, in turn, is caused by a weakening of turbulent fluctuations in the vertical transport velocity and a corresponding decrease in the moisture flux due to aerosol cooling of the lower atmosphere. The results obtained demonstrate a previously unknown mechanism of the formation of SDRE of a weakly absorbing atmospheric aerosol, and also indicate strong feedbacks between the instantaneous radiative forcing of Siberian smoke and meteorological processes in the eastern Arctic.

The study was supported by the Russian Science Foundation grant No. 23-27-00172, <https://rscf.ru/project/23-27-00172/>.

1. Konovalov I.B., Golovushkin N.A., Zhuravleva T.B., Nasrtdinov I.M., Uzhegov V.N., Beekmann M. Application of the CHIMERE-WRF model complex to study the radiative effects of Siberian biomass burning aerosol in the eastern Arctic // *Optika Atmosfery i Okeana*. 2023. V. 36. No. 02. P. 129–139. [in Russian].

2. Konovalov I.B., Golovushkin N.A., Beekmann M., Andreae M.O. Insights into the aging of biomass burning aerosol from satellite observations and 3D atmospheric modeling: evolution of the aerosol optical properties in Siberian wildfire plumes // *Atmos. Chem. Phys.* 2021. V. 21, P. 357–392.

Перенос сажевого аэрозоля Сибирских лесных пожаров в стратосфере

Черемисин А.А.¹ (aacheremis@gmail.com), Романченко И. И.¹, Новиков П.В.^{1,3}, Маричев В.Н.², Бочковский Д.А.²

¹*Институт химической кинетики и горения им. В. В. Воеводского СО РАН, Новосибирск, Россия*

²*Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, Томск, Россия*

Сажевый аэрозоль в стратосфере вызывает интерес из-за потенциальной способности влиять на климатические изменения. Большое время жизни, источники пополнения стратосферного аэрозоля, а также малоизученные механизмы вертикального переноса аэрозоля в стратосфере привлекают внимание исследователей.

В последнее десятилетие привлекло к себе внимание явление, возникающее в результате сильных лесных пожаров - пирокумулятивные выбросы сажевого аэрозоля прямо в стратосферу Земли [1]. В литературе отмечают необычное поведение сажевого аэрозоля, который поднимается из нижней стратосферы, куда он был выброшен в результате пирокумулятивного выброса, в более высокие слои стратосферы. В качестве одного из возможных механизмов такого подъема сажевого аэрозоля рассматривается гравитофотофорез [2]. Результаты исследования возможностей этого механизма, а также альтернативные варианты представлены в [3].

Летом 2019-2022 годов были зафиксированы многочисленные лесные пожары в Сибири и Канаде. В докладе обсуждаются результаты наших исследований, согласно которым большой вклад в аэрозольное наполнение стратосферы в 2019 и 2022 годах внесли обширные пожары на территории Сибири [3].

В Томске при лидарных наблюдениях в августе 2019 и 2022 года в нижней стратосфере были обнаружены слои сильного аэрозольного рассеяния. Лидарные наземные наблюдения проводились на стратосферной лидарной станции Института оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН в Томске на длине волны 532 нм. Географическое положение пожаров, регистрировалось комплексом радиометров видимой и инфракрасной визуализации VIIRS, размещенным на борту спутника Suomi NPP. Для анализа распространения аэрозоля рассчитывались обратные траектории движения воздушных масс, начиная с момента наблюдения над Томском, с использованием пакета HYSPLIT и данных GDAS по скоростям ветра. На пути следования воздушных масс изучалось также высотное распределение аэрозоля по данным, полученным спутниковым облачно-аэрозольным лидаром CALIOP.

Расчет обратных траекторий движения воздушных масс и их анализ с привлечением спутниковых радиометрических данных о пожарах, а также данных космического лидара CALIOP об аэрозоле позволил сделать вывод, что наблюдавшиеся аэрозольные слои произошли от пирокумулятивных выбросов, возникших при пожарах в Сибири.

Дальнейшее использование спутниковых данных о яркостной температуре облаков в области обширных пожаров, полученных со спутника Himawari 8 позволило точно локализовать образования пирокумулятивных выбросов в Сибири.

1. Fromm M., Lindsey, D.T., Servranckx R., Yue G., Trickl T., Sica R., Doucet P., Godin-Beekmann S. The Untold Story of Pyrocumulonimbus // Bull. Amer. Meteorol. Soc. 2010. V. 91. N. 9. P. 1193-1210.

2. Ansmann A., Baars H., Chudnovsky A., Mattis I., Veselovskii I., Haarig M., Seifert P., Engelmann R., Wandinger U. Extreme levels of Canadian wildfire smoke in the stratosphere over central Europe on 21–22 August 2017 // Atmos. Chem. Phys. 2018. V. 18. P. 11831–11845.

3. Черемисин А.А. Гравитофотофоретический механизм вертикального переноса сажевого аэрозоля в стратосфере. / Сб. трудов Международного симпозиума «Атмосферная радиация и динамика», Санкт-Петербург. 2021. Издательство ВВМ, С. 88-94.

4. Черемисин А. А., Маричев В. Н., Бочковский Д. А., Новиков П. В., Романченко И. И. Стратосферный аэрозоль сибирских лесных пожаров по данным лидарных наблюдений в Томске в августе 2019 г. // Оптика атмосферы и океана. 2021. Т. 34. № 11. С. 898–905.

Stratospheric transport of soot aerosol from Siberian forest fire events

A.A. Cheremisin¹, I.I. Romanchenko¹, P.V. Novikov^{1,3}, V.N. Marichev², D.A. Bochkovskiy²

¹V.V. Voevodsky Institute of Chemical Kinetics and Combustion, SB RAS, Novosibirsk, Russia

²V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics, SB RAS, Tomsk, Russia

³Krasnoyarsk Institute of Railway Transport Engineering, Krasnoyarsk, Russia

Soot aerosol in the stratosphere attracts attention due to its potential ability to affect climatic changes. Long lifetime, sources of atmospheric aerosol, as well as poorly studied mechanisms of the vertical transport of aerosol in the stratosphere are the issues of researchers' concern.

During the recent decade, the phenomenon arising as a result of severe forest fire events that has attracted much attention is pyrocumulus of soot aerosol directly into the Earth's stratosphere [1]. The unusual behavior of soot aerosol rising from the lower stratosphere, where it is injected as a result of pyrocumulus, to higher stratospheric layers, is described in the literature. Gravitophoresis is considered as one of the possible mechanisms of soot aerosol uprise [2]. Results of the investigation of possibilities provided by this mechanism, as well as alternative versions, are presented in [3].

Numerous forest fire events were recorded in the summer seasons of 2019-2022 in Siberia and in Canada. Results of our studies discussed in the present report show that a substantial contribution into stratospheric aerosol in 2019 and 2022 has been made by extensive fire events at the territory of Siberia [3].

Lidar observations in Tomsk in August 2019 and 2022 revealed the layers of strong aerosol scattering. Land-based lidar observations were carried out at the stratospheric lidar station of V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics SB RAS in Tomsk at the wavelength of 532 nm. The geographic locations of fires were recorded with a set of radiometers by visible and infrared visualization VIIRS, arranged on board the Suomi NPP satellite. To analyze aerosol propagation, the inverse trajectories of air mass motion were calculated, starting from the moment of observation above Tomsk, using the HYSPLIT package and GDAS data on wind velocities. On the routes of air masses, the altitudinal distribution of aerosol was also studied relying on the data obtained from the satellite-based cloud-aerosol lidar CALIOP.

Calculation of the inverse trajectories of air mass motion and their analysis involving the satellite radiometric data on fire events, as well as the data from the space lidar CALIOP on aerosol, allowed us to conclude that the observed aerosol layers originated from pyrocumulus arising during fire events in Siberia.

Further consideration of the satellite data on radiance temperature of clouds over the area of extensive fires, obtained from the Himawari 8 satellite, allowed precise localization of pyrocumulus formation in Siberia.

1. Fromm M., Lindsey, D.T., Servranckx R., Yue G., Trickl T., Sica R., Doucet P., Godin-Beekmann S. The Untold Story of Pyrocumulonimbus, Bull. Amer. Meteorol. Soc. 2010. V. 91. N. 9. P. 1193-1210.

2. Ansmann A., Baars H., Chudnovsky A., Mattis I., Veselovskii I., Haarig M., Seifert P., Engelmann R., Wandinger U. Extreme levels of Canadian wildfire smoke in the stratosphere over central Europe on 21–22 August 2017, Atmos. Chem. Phys. 2018. V. 18. P. 11831–11845.

3. Cheremisin A.A. Gravitophoretic mechanism of the vertical transport of soot aerosol in the stratosphere. Proceedings of International Symposium «Atmospheric Radiation and Dynamics», St. Petersburg. 2021. VVM Publishers, P. 88-94.

4. Cheremisin A.A., Marichev V.N., Bochkovskii D.A., Novikov P.V., Romanchenko I.I. Stratospheric aerosol of Siberian forest fires according to lidar observations in Tomsk in August 2019, Atmospheric and Oceanic Optics. 2022. Vol. 35, 57–64.

Микроструктура пылевого аэрозоля в приземном слое и в толще атмосферы

Даценко О.И. (datsenko@ifaran.ru), Горчаков Г.И., Карпов А.В.

Значительная часть пылевого аэрозоля поступает в атмосферу с опустыненных территорий [1,2]. При дальнем переносе распределение частиц пылевого аэрозоля трансформируется. Поэтому представляет интерес микроструктура пылевого аэрозоля вблизи источников [2,3]. Представлены результаты измерений функции распределения частиц пылевого аэрозоля по размерам. Показано, что распределение частиц по размерам аппроксимируются обратностепенными функциями (распределения типа Юнге), что согласуется с существующими представлениями о микроструктуре пылевого аэрозоля. Проанализированы результаты мониторинга микроструктуры пыльной мглы по данным AERONET в регионе Пекина в периоды заносов пылевого аэрозоля из пустыни Такла-Макан. В [1] представлены результаты восстановления распределения объемов частиц пылевого аэрозоля по размерам. Показано, что в распределении доминирует фракция грубодисперсного аэрозоля. В процессе трансформации дымной мглы и смогообразования в городской атмосфере заметный вклад в наблюдаемую микроструктуру вносит тонкодисперсная фракция. Переход к счетному распределению частиц по размерам позволяет наглядно показать вариации тонкодисперсной фракции и микроструктуры пылевого аэрозоля в целом. Показано, что функция распределения частиц по размерам для пыльной мглы в регионе Пекина с удовлетворительной точностью аппроксимируются кусочно-степенными функциями. Наблюдаемые вариации микроструктуры пылевого аэрозоля в регионе Пекина свидетельствует как об условиях выноса аэрозоля с опустыненной территории [3], так и о влиянии его дальнего переноса. Проанализирована изменчивость поглощательной способности пыльной мглы в регионе Пекина. Установлено, что выносимый из пустыни Такла-Макан пылевой аэрозоль отличается малыми значениями мнимой части коэффициента преломления в области спектра 440-1020 нм.

С увеличением времени пребывания пылевого аэрозоля в регионе Пекина мнимая часть коэффициента преломления заметно увеличивается.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 20-17-00214).

1. Горчаков Г.И., Даценко О.И., Копейкин В.М., Карпов А.В., Гушин Р.А., Горчакова И.А., Мирсаитов С.Ф., Пономарева Т.Я. Пыльная мгла на Северо-Китайской равнине // *Оптика атмосферы и океана*. 2021. Т. 34, № 12. С. 948–955.

2. Gorchakov G.I., Karpov A.V., Kopeikin V.M., Buntov D.V., Gushchin R.A., Datsenko O.I. Dust aerosol emission on the desertified area // *Proc. SPIE 11560, 26th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics, Atmospheric Physics*, 2020. 1156076.

3. Горчаков Г.И., Копров Б.М., Шукуров К.А. Влияние ветра на вынос аэрозоля с подстилающей поверхности // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана*. 2004. Т. 40, № 6. С. 759-775.

Dust aerosol microstructure in the surface layer of the atmosphere

O.I. Datsenko (datsenko@ifaran.ru), G.I. Gorchakov, A.V. Karpov
A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics RAS, Moscow, Russia

A significant part of the dust aerosol enters the atmosphere from desert areas [1, 2]. During long-range transfer, the distribution of dust aerosol particles is transformed. Therefore, the microstructure of dust aerosol near sources is of interest [2, 3]. The results of measurements of the size distribution function of dust aerosol particles are presented. It is shown that the size distribution of particles is approximated by inverse power functions (Junge-type distributions), which is consistent with existing ideas about the microstructure of dust aerosol. The results of monitoring the dust haze microstructure according to AERONET data in the Beijing region during the periods of dust aerosol drifts from the Takla Makan desert are

analyzed. In [1], the results of the reconstruction of the size distribution of dust aerosol particles are presented. It is shown that the distribution is dominated by the fraction of coarse aerosol. During the transformation of smoke haze and smog formation in the urban atmosphere, a significant contribution to the observed microstructure is made by the fine fraction. The transition to a countable particle size distribution makes it possible to visually show the variations in the fine fraction and microstructure of the dust aerosol as a whole. It is shown that the particle size distribution function for the dust haze in the Beijing region is approximated with a satisfactory accuracy by piecewise power functions. The observed variations in the microstructure of dust aerosol in the Beijing region indicate both the conditions for the removal of aerosol from a desertified area [3] and the effect of its long-range transport. The variability of the absorptive capacity of the dust haze in the Beijing region is analyzed. It has been established that the dust aerosol carried out from the Taklamakan desert is distinguished by small values of the imaginary part of the refractive index in the spectral region 440-1020 nm.

With an increase in the residence time of the dust aerosol in the Beijing region, the imaginary part of the refractive index noticeably increases.

The work was supported by the Russian Science Foundation (grant no. 20-17-00214).

1. Gorchakov G.I., Datsenko O.I., Kopeikin V.M., Karpov A.V., Gushchin R.A., Gorchakova I.A., Mirsaitov S.F., Ponomareva T.Y. Dust haze over the north china plain // *Atmospheric and Oceanic Optics*. 2022. T. 35. № 2. С. 125-132.

2. Gorchakov G.I., Karpov A.V., Kopeikin V.M., Buntov D.V., Gushchin R.A., Datsenko O.I. Dust aerosol emission on the desertified area // *Proc. SPIE 11560, 26th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics, Atmospheric Physics*, 2020. 1156076.

3. Gorchakov G.I., Koprov B.M., Shukurov K.A. Wind effect on aerosol transport from the underlying surface // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2004. V. 40. No 6. P. 679-694.

Постерная сессия

Конденсационная активность частиц в зоне бореальных лесов Центральной Сибири

Иванова О.А. (junga2007@mail.ru), Небосько Е.Ю., Михайлов Е.Ф.
Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

Центральную роль в формировании облаков играют аэрозольные частицы, выступающие в качестве ядер конденсации облаков (Cloud Condensation Nuclei, CCN), на которые оседает водяной пар, в результате чего образуются облака.

В работе представлены результаты измерений общих концентраций облачных ядер конденсации при шести различных значениях пересыщения в диапазоне 0.1-1.1%, полученные на фоновой станции высотной мачты ZOTTO в летний период 2021 года. Для каждого спектра активации облачных ядер конденсации вычислены параметры приближения этого спектра аналитической функцией. Наблюдается высокая вариативность значений концентраций ядер конденсации, обусловленная как выбросами от сильных источников, таких как лесные пожары, которые ее увеличивают, так и ливневыми дождями, наоборот, уменьшающими ее вследствие вымывания частиц. При увеличении пересыщения видна устойчивая динамика роста концентрации облачных ядер конденсации. Также в работе приведен анализ возможности предсказания конденсационной активности частиц из полученных параметров приближения.

Работа выполнена при поддержке ресурсного центра СПбГУ «Геомодель».

Condensation activity of particles in the boreal forest zone of Central Siberia

O.A. Ivanova (junga2007@mail.ru), E.Yu. Nebosko, E.F. Mikhailov
Saint-Petersburg State University, Saint Petersburg, Russia

The central role in the clouds formation plays aerosol particles acting as cloud condensation nuclei (Cloud Condensation Nuclei, CCN). The water vapor condenses on these particles that lead to the formation of clouds.

The paper presents the results of measurements of the total concentrations of cloud condensation nuclei at six different values of supersaturation obtained at the background station of the ZOTTO high-rise mast in the summer of 2021. For each activation spectrum of cloud condensation nuclei, the parameters of approximation of this spectrum by an analytical function are calculated. There is a high variability in the concentrations of condensation nuclei, due both to emissions from strong sources, such as forest fires, which increase it, and torrential rains, on the contrary, reduce it due to the washing out of particles. With an increase of supersaturation, a stable dynamics of growth in the concentration of cloud condensation nuclei is observed. Also an analysis of the possibility of predicting the condensation activity of particles based on the obtained approximation parameters is provided in this work.

Acknowledgements. This work was supported by the Geo Environmental Research Center "Geomodel" of the Saint-Petersburg State University.

Решение задачи рассеяния света на смеси ледяных кристаллов перистых облаков для интерпретации данных сканирующего поляризационного лидара

Кустова Н.В.¹ (kustova@iao.ru), Коношонкин А.В.^{1,2}, Коханенко Г.П.¹, Балин Ю.С.¹, Насонов С.В.¹

¹*Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, Томск, Россия*

²*Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия*

Информация о пространственной ориентации ледяных частиц, входящих в состав перистых облаков, необходима для улучшения моделей численного моделирования климата. В настоящее время такие систематические данные отсутствуют, поскольку контактные методы исследования (например, такие как забор образцов с борта самолета) нарушают их пространственную ориентацию, а вертикально ориентированные лидары не способны определять угол отклонения частиц от горизонтальной плоскости в облаке (их флаттер). Для решения такой задачи в Институте оптики атмосферы разработан сканирующий поляризационный лидар, позволяющий получать характеристики рассеянного кристаллами перистого облака излучения в зависимости от угла наклона лидара. В предположении однородности зондируемого перистого облака получаемый лидаром сигнал не должен зависеть от угла сканирования в случае хаотической пространственной ориентации ледяных кристаллов. И напротив, наличие существенных изменений сигнала от угла сканирования, наблюдаемое в эксперименте, позволяет однозначно судить о присутствии слоев ориентированных кристаллов в облаке.

Важно отметить, что в реальном облаке наблюдается смесь кристаллов различной формы и пространственной ориентации. Для интерпретации получаемых экспериментальных данных необходимо иметь оптическую модель – решение задачи рассеяния света как на хаотически ориентированных, так и на ориентированных преимущественно в горизонтальной плоскости кристаллах в зависимости от угла наклона лидара. Поскольку размер кристаллов перистых облаков достигает нескольких сотен микрон получить такое решение с помощью точных численных методов не возможно. В

данной работе для решения задачи рассеяния света использовался метод физической оптики, разрабатываемый в последние годы в ИОА СО РАН. В данном докладе представлено сравнение результатов экспериментальных наблюдений с результатами численного моделирования на основе построенной оптической модели, которое показало хорошее согласие. Были проанализированы различные модели облаков. Также в результате сопоставления результатов систематических лидарных наблюдений с теоретическими данными, полученными на основе оптической модели, был подробно рассмотрен вопрос о законе ориентации частиц в пространстве. Ранее в мировом научном сообществе для описания горизонтально ориентированных частиц использовался нормальный закон распределения. Проведенные нами наблюдения показали, что экспоненциальный закон гораздо лучше описывает поведение частиц в облаке.

Solving the problem of light scattering by a mixture of ice crystals of cirrus clouds for the interpretation of scanning polarization lidar data

N.V. Kustova¹ (kustova@iao.ru), A.V. Konoshonkin^{1,2}, G.P. Kohanenko¹, Yu.S. Balin¹, S.V. Nasonov¹

¹*V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics of SB SO RAS, Tomsk, Russia*

²*National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia*

Information about the spatial orientation of ice particles of cirrus clouds is necessary to improve numerical climate modeling models. Currently, such systematic data are not available, since contact methods of research (for example, such as taking samples from an aircraft) violate their spatial orientation, and vertically oriented lidars are not able to determine the angle of deviation of particles from a horizontal plane in a cloud (their flutter). To solve this problem, a scanning polarizing lidar has been developed at the Institute of Atmospheric Optics, which makes it possible to obtain characteristics of the radiation scattered by crystals of a cirrus cloud depending on the tilt angle of the lidar. Assuming the homogeneity of the sounding cirrus cloud, the signal received by the lidar should not depend on the scanning angle in the case of a random spatial orientation of ice crystals. And vice versa, the presence of significant changes in the signal from the scanning angle, observed in the experiment, makes it possible to unambiguously judge the presence of layers of oriented crystals in the cloud.

It is important to note that a mixture of crystals of various shapes and spatial orientations is observed in a real cloud. To interpret the obtained experimental data, it is necessary to have an optical model – a solution to the problem of light scattering both on randomly oriented and on crystals oriented predominantly in the horizontal plane, depending on the lidar tilt angle. Since the size of cirrus cloud crystals reaches several hundred microns, it is not possible to obtain such a solution using accurate numerical methods. In this report, to solve the problem of light scattering, we used the method of physical optics, developed in recent years at the Institute of Atmospheric Optics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences. This report presents a comparison of the results of experimental observations with the results of numerical simulation based on the constructed optical model, which showed good agreement. Various cloud models were analyzed. Also, as a result of comparing the results of systematic lidar observations with theoretical data obtained on the basis of an optical model, the question of the law of particle orientation in space was considered in detail. Previously, the world scientific community used the normal distribution law to describe horizontally oriented particles. Our observations have shown that the exponential law describes the behavior of particles in a cloud much better.

Активность воды и поверхностное натяжение органических и неорганических аэрозольных наночастиц

Михайлов Е.Ф.¹ (eugene.mikahailov@spbu.ru), Власенко С.С.¹, Ченг Я.², Су Х.² и Пушель У.²

¹Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

²Институт химии общества Сакса Планка, Майнц, Германия

Поглощение воды аэрозольными частицами и их способность служить облачными ядрами конденсации (ОЯК) являются одними из центральных вопросов современных исследований в науке об атмосфере и климате. Активность воды и поверхностное натяжение (межфазная энергия) являются ключевыми термодинамическими параметрами классической теории Келера, которая описывает гигроскопический рост частиц как функцию относительной влажности. Для определения этих параметров в основном используются объемные образцы и методы, но их применимость к наночастицам ограничена, поскольку взаимодействие газ-частица и связанные с ним фазовые переходы зависят от размера частиц. Чтобы преодолеть разрыв между экспериментальными и модельными результатами, был разработан новый метод, определения активности воды и поверхностного натяжения наночастиц (1, 2), названный Дифференциальный Анализ Келера (ДКА) (1, 2). В данном исследовании метод ДКА применяется для определения активности воды и поверхностного натяжения на основе гигроскопических факторов роста, измеренных с помощью тандемного анализатора дифференциальной подвижности влажности (НТДМА) для частиц диаметром 17-100 нм при относительной влажности (RH) 2,0 - 99,6 %. Широкий диапазон размеров частиц и RH позволяют определять активность воды и поверхностное натяжение пересыщенных водных растворов наночастиц в условиях, недоступных для других методов. Мы анализируем и обсуждаем результаты измерений, полученные для наночастиц и сравниваем и с макро-объемными методами и термодинамическими моделями. Кроме того, наши НТДМА измерения дают информацию о реструктуризации частиц при сорбции водяного пара (3, 4), что позволяет определить распределение пор по размерам и массовый эквивалентный диаметр для исследованных наночастиц, а также провести анализ неопределенности и уточнить полученные с помощью ДКА термодинамические параметры для условий ненасыщенного и пересыщенного водяного пара.

Работа выполнена при поддержке российского научного фонда, проект № 22-27-00258.

1. Cheng, Y., H. Su, T. Kopp, E. F. Mikhailov and U. Pöschl: Size dependence of phase transitions in aerosol nanoparticles, *Nature Communications* 6, 5923, 2015.
2. Su, H., YF. Cheng & U. Pöschl: New Multiphase Chemical Processes Influencing Atmospheric Aerosols, Air Quality, and Climate in the Anthropocene. *Accounts of Chemical Research*, doi: 10.1021/acs.accounts.0c00246, 2020.
3. Mikhailov, E., S. Vlasenko, S. T. Martin, T. Koop and U. Pöschl: Amorphous and crystalline aerosol particles interacting with water vapor: conceptual framework and experimental evidence for restructuring, phase transitions and kinetic limitations. *Atmospheric Chemistry and Physics* 9, 9491-9522, 2009.
4. Mikhailov, E. F., M. L. Pöhlker, K. Reinmuth-Selzle, S. S. Vlasenko, O. O. Krüger, J. Fröhlich-Nowoisky, C. Pöhlker, O. A. Ivanova, A. A. Kiselev, L. A. Krempner & U. Pöschl: Water uptake of subpollen aerosol particles: hygroscopic growth, cloud condensation nuclei activation, and liquid-liquid phase separation. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 21 (9), doi: 10.5194/acp-21-6999-2021, 2021.

Water activity and surface tension of mixed organic and inorganic aqueous aerosol nanoparticles

E.F. Mikhailov¹, S.S. Vlasenko¹, Yafang Cheng², Hang Su², Ulrich Pöschl²

¹Department of Atmospheric Physics, Saint Petersburg State University, Saint Petersburg, Russia

²Multiphase Chemistry Department, Max Planck Institute for Chemistry, Mainz, Germany

The water uptake of aerosol particles and their ability to serve as cloud condensation nuclei (CCN) are among the central issues of current research in atmospheric and climate science. Water activity and surface tension (interfacial energy) are the key thermodynamic parameters of classical Köhler theory, which describes the hygroscopic growth of particles as a function of relative humidity. Bulk samples and methods are mostly used to determine these parameters, but their applicability to nanoparticles is limited because the gas-particle partitioning and related phase transitions (deliquescence, efflorescence) depend on particle size. To bridge the gap between experimental and modelling results for bulk materials and nanoparticles, a new method called Differential Köhler Analysis (DKA) was developed to determine the water activity and surface tension of supersaturated aqueous solutions based on aerosol measurement data for nanometer-sized droplets (1, 2). In this study, the DKA method is applied to derive water activities and surface tensions from hygroscopic growth factors measured with a humidity tandem differential mobility analyzer (HTDMA) for particles with diameter of 17-100 nm at relative humidities (RH) of 2.0 - 99.6 %. The wide particle size and RH range allow for determining the water activity and surface tension of highly supersaturated aqueous solutions under conditions that are not accessible to other methods. We analyze and discuss the nanoparticle measurement results in relation to those of bulk methods and thermodynamic models. In addition, our HTDMA measurements provide information about particle restructuring in response to water vapor adsorption at low and intermediate RH levels (3, 4), which enable the determination of pore size distributions and mass equivalent diameters for the investigated nanoparticles as well as uncertainty analyses and refinements of the DKA-derived thermodynamic parameters for conditions of water vapor sub- and supersaturation.

This work was supported by the Russian Science Foundation, project no. 22-27-00258.

1. Cheng, Y., H. Su, T. Kopp, E. F. Mikhailov and U. Pöschl: Size dependence of phase transitions in aerosol nanoparticles, *Nature Communications* 6, 5923, 2015.
2. Su, H., YF. Cheng & U. Pöschl: New Multiphase Chemical Processes Influencing Atmospheric Aerosols, Air Quality, and Climate in the Anthropocene. *Accounts of Chemical Research*, doi: 10.1021/acs.accounts.0c00246, 2020.
3. Mikhailov, E., S. Vlasenko, S. T. Martin, T. Koop and U. Pöschl: Amorphous and crystalline aerosol particles interacting with water vapor: conceptual framework and experimental evidence for restructuring, phase transitions and kinetic limitations. *Atmospheric Chemistry and Physics* 9, 9491-9522, 2009.
4. Mikhailov, E. F., M. L. Pöhlker, K. Reinmuth-Selzle, S. S. Vlasenko, O. O. Krüger, J. Fröhlich-Nowoisky, C. Pöhlker, O. A. Ivanova, A. A. Kiselev, L. A. Kremper & U. Pöschl: Water uptake of subpollen aerosol particles: hygroscopic growth, cloud condensation nuclei activation, and liquid-liquid phase separation. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 21 (9), doi: 10.5194/acp-21-6999-2021, 2021.

Основные оптические характеристики однородных облачных слоев смешанного фазового состава в инфракрасном диапазоне длин волн

Петрушин А.Г. (petrushin-2005@mail.ru)

ИАТЭ НИЯУ МИФИ, Обнинск, Россия

Рассчитывались основные оптические характеристики рассеяния излучения (средний косинус индикатрисы рассеяния излучения, альbedo однократного рассеяния излучения, показатель ослабления излучения) для модели микроструктуры однородных по объему облачных слоев смешанного фазового состава. Рассматривался диапазон инфракрасного излучения с длинами волн λ от 1,0 до 12 мкм. Модель микроструктуры включала в себя водные капли и ледяные кристаллы правильных форм с размерами, при которых наблюдается преимущественно хаотическая ориентация этих кристаллов в пространстве [1]. Динамика изменения параметров микроструктуры двух фракций в

смешанной облачной среде (водных капель и ледяных кристаллов) в зависимости от средней температуры облачного слоя T определялась использованием известного процесса Бергерона-Финдайзена в диапазоне T от 232 К до 273 К, который считается преобладающим при росте переохлажденных капель в смешанной облачной среде [2]. При расчетах оптических характеристик использовались ранее разработанные методики для ледяных кристаллов с правильными формами (гексагональные пластинки и столбики) с размерами, превышающими длину волны падающего излучения

Специфика изменения спектральных характеристик в зависимости от T связана главным образом с размерами частиц, зависящих от T и отношения этих размеров к длине волны λ , особенно для водных капель. Сравнение всех рассмотренных спектральных оптических характеристик показывает их существенную зависимость от температуры T . Влияние значений комплексного показателя преломления излучения m для воды и льда на указанные оптические характеристики наиболее заметно при крайних значениях диапазона температуры в диапазоне длин волн $\lambda \approx 10 - 12$ мкм, где значения m отличаются более, чем в два раза. Спектральные зависимости оптической толщины однородных облачных слоев, пропорциональных показателю ослабления излучения также демонстрируют значительную изменчивость от вариации температуры облачного слоя.

1. Петрушин А.Г. О параметризации основных оптических и радиационных характеристик однородных облачных слоев смешанного фазового состава Сборник докладов: Международной научной конференции. "Гетерогенные системы и процессы в природных и техногенных средах. Атмосферная экология. Гетерис - 2017. Санкт-Петербург часть 2, с.110 – 125

2. Петрушин А.Г. Параметризация основных микроструктурных характеристик однородных облачных слоев смешанного фазового состава в зависимости от их средней температуры // Сборник трудов Международного симпозиума "Атмосферная радиация и динамика" (МСАРД–2021). Санкт-Петербург, 2021. С. 82-87.

The main optical characteristics of homogeneous mixed- phase cloud layers composition in the infrared wavelength range

A.G. Petrushin (petrushin-2005@mail.ru)

МЕРФИ IATE, Obninsk, Russia

The main optical characteristics of radiation scattering (the asymmetry parameter of the optical scattering phase function, single-scattering albedo and extinction coefficients) were calculated for the model of the microstructure of cloud layers homogeneous in volume with a mixed phase composition. The range of infrared radiation with wavelengths λ from 1.0 to 12 μm was considered. The microstructure model included water drops and ice crystals of regular shapes with sizes at which a predominantly chaotic orientation of these crystals in space is observed [1]. The dynamics of changes in the parameters of the microstructure of two fractions in a mixed cloudy medium (water drops and ice crystals) depending on the average temperature of the mixed-phase cloud layer T was determined using the well-known Bergeron-Findeisen process in the range T from 232 K to 273 K, which is considered to be predominant during the growth of supercooled drops in mixed cloud environment [2]. The methods for calculating the optical characteristics of ice crystals with regular shapes (plates and columns) with dimensions exceeding the wavelength of the incident radiation λ were applied.

The specificity of the change in the spectral characteristics depending on T is mainly associated with the particle sizes depending on T and the ratio of these sizes to the wavelength λ , especially for water droplets. Comparison of all considered spectral optical characteristics shows their significant dependence on temperature T . The influence of the complex refractive

index values m for water and ice on these optical characteristics is most noticeable at the extreme values of the temperature range T for wavelength range $\lambda = 10\text{-}12$ microns, where the values of m differ by more than twice. The spectral dependences of the optical thickness of homogeneous mixed-phase cloud layers, which are proportional to the extinction coefficient also demonstrate significant variability with variations in the temperature T of the mixed-phase cloud layer.

1. Petrushin A.G. On the parametrization of the main optical and radiative characteristics of homogeneous cloud layers of mixed phase composition. Collection of reports: International scientific conference. "Heterogeneous systems and processes in natural and man-made environments. Atmospheric ecology. Heteris - 2017. St. Petersburg part 2, p.110 - 125

2. Petrushin A.G. Parameterization of the main microstructural characteristics of homogeneous cloud layers of mixed phase composition depending on their average temperature // Proceedings of the International Symposium "Atmospheric Radiation and Dynamics" (ISARD-2021). St. Petersburg, 2021, pp. 82-87.

СЕКЦИЯ 5. ОЗОНОСФЕРА – МОНИТОРИНГ, МОДЕЛИРОВАНИЕ И ПРОГНОЗЫ

Председатель: к.ф.-м.н. **Розанов Е.В.** («ОЗЛаб», СПбГУ, Санкт-Петербург, Россия/**World Radiation Center**, Davos, Switzerland)

Сопредседатели: д.ф.-м.н. **Смышляев С.П.** (РГГМУ, Санкт-Петербург, Россия)

SESSION 5. OZONOSPHERE – MONITORING, MODELING AND FORECASTS

Chairman: Dr. **E.V. Rozanov** («O3Lab» SPbSU, Saint Petersburg, Russia / **World Radiation Center**, Davos, Switzerland)

Co-Chairmen: Dr. **S.P. Smyshlyayev** (RSHU, Saint Petersburg, Russia)

Устные доклады

Валидация измерений общего содержания озона по данным ИКФС-2 с борта КА Метеор-М N2 в 2015-2020 гг.

Поляков А.В.¹ (a.v.polyakov@spbu.ru), Виролайнен Я.А.¹, Тимофеев Ю.М.¹, Неробелов Г.М.¹, Козлов Д.А.²

¹Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

²Государственный научный центр Российской Федерации «Исследовательский центр имени М.В.Келдыша», Москва, Россия

Атмосферный озон играет важную роль для земной биосферы, поглощая опасное солнечное УФ-излучение, а также вносит свой вклад в формирование климата. В настоящее время вариации озона широко отслеживаются различными методами локального и дистанционного зондирования, но только спутниковые методы могут предоставить данные о глобальном распределении озона и его аномалиях. В отличие от методов измерения, основанных на измерениях солнечного излучения, спутниковые измерения теплового излучения дают информацию независимо от солнечного освещения. Для подобных измерений широкое распространение получили Фурье-спектрометры, работающие в инфракрасном диапазоне спектра (FTIR). Ранее (на МСАРД-2021) мы продемонстрировали применение методики оценивания общего содержания озона (ОСО) из спектров уходящего ИК излучения, основанной на использовании искусственных нейронных сетей (ИНС). Методика была применена к спектральным измерениям прибора ИКФС-2 на борту российского метеоспутника «Метеор М №2» в 2015-2020гг. с использованием данных прибора OMI для обучения ИНС. Впоследствии методика была доработана и уточнена, проведена детальная валидация полученных результатов на основе сравнения с данными наземных измерений на станциях международных наблюдательных сетей WOUDC и Eubrewnet, а также со спутниковыми измерениями приборов OMI (Aura), TROPOMI (Sentinel 5p) и IASI (Metop). Проанализировано широтно-сезонное поведение разностей результатов различных измерений, что позволяет оценить соответствующие зависимости погрешностей методики. Представлены данные по глобальному распределению ОСО за период с 2015 по 2020 год. Средние разности между данными ИКФС-2 и независимыми измерениями ОСО составляют до 2 %, стандартные отклонения разностей (COP) варьируют от 2 до 4 %. В то же время как анализ ошибок аппроксимации ИНС данных OMI, так и сравнение результатов ИКФС-2 с независимыми данными демонстрируют увеличение расхождений в сторону полюсов. В весенне-зимний период COP достигают 8% в Южном и 6% в

Северном полушариях. Методика может быть использована для обработки спектральных данных ИКФС-2 и, как следствие, дает глобальную информацию об ОСО в период 2015-2020 гг. независимо от солнечной освещенности и наличия облачности.

Исследование выполнено в рамках работы лаборатории «Исследования Озонового слоя и верхней атмосферы» СПбГУ (соглашение с Минобрнауки РФ № 075–15-2021-583).

Validation of the total ozone columns using the IKFS-2 instrument aboard the Meteor-M N2 satellite in 2015-2020

A.V. Polyakov¹(a.v.polyakov@spbu.ru), G.M. Nerobelov¹, Ya.A. Virolainen¹, Yu.M. Timofeev¹,
D.A. Kozlov²

¹ Saint Petersburg State University, Saint Petersburg, Russia

² State Scientific Center of the Russian Federation "Keldysh Research Center", Moscow, Russia

Atmospheric ozone plays an important role in the Earth's biosphere by absorbing dangerous solar UV radiation and contributes to climate formation. Ozone variations are monitored by different methods of local and remote sensing, but only satellite methods can provide data on the global distribution of ozone and its anomalies. Unlike measurement methods based on solar radiation measurements, satellite measurements of thermal radiation provide information regardless of solar radiation. For such measurements, Fourier spectrometers operating in the infrared spectra region (FTIR) are usually used. Previously (at MSARD-2021), we presented the application of the technique for estimating the ozone total column content (OTC) from the outgoing IR radiation spectra, based on the artificial neural networks (ANNs). The technique was applied to the spectral measurements of the IKFS-2 instrument aboard the Russian meteorological satellite Meteor M N2 in 2015-2020, using data from the OMI instrument for ANN training. Later the methodology was improved. A detailed validation of the obtained results was carried out based on comparison with ground-based measurements presented by the WOUDC and Eubrewnet networks and satellite measurements of the OMI (Aura), TROPOMI (Sentinel 5p), and IASI (Metop) instruments. The latitudinal-seasonal behavior of the differences in the results of different measurements is analyzed, which allows to estimate the corresponding dependences of the measurement errors. TOCs distribution for the period 2015 to 2020 is shown. The average differences between the IKFS-2 data and independent TOC measurements are up to 2%, the standard deviations of the differences (SDD) vary from 2 to 4%. At the same time, both the analysis of the ANN approximation errors of the OMI data and the comparison of the IKFS-2 results with independent data demonstrate an increase in discrepancies towards the poles. In the spring-winter period, SDDs reach up to 8% in the Southern and up to 6% in the Northern Hemispheres. The retrieval technique can be used to process the IKFS-2 spectral data and, as a result, provides global information on TOCs in the period 2015–2020, regardless of solar illumination and the presence of clouds.

The study was carried out in the "Ozone Layer and Upper Atmosphere Research" laboratory of St. Petersburg State University (agreement with the Ministry of Education and Science of the Russian Federation No. 075-15-2021-583).

Измерения общего содержания озона на наблюдательной станции СПбГУ в Петергофе

Виrolainen Я.А.¹(yana.virolainen@spbu.ru), Ионов Д.В.¹, Неробелов Г.М.^{1,2}, Поляков А.В.¹

¹ Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

² Научно-исследовательский центр экологической безопасности РАН, Санкт-Петербург, Россия

Атмосферный озон играет уникальную роль в жизни на Земле. Стратосферный озон защищает биосферу от губительного влияния жесткого УФ-излучения Солнца, тропосферный озон является парниковым газом и химически-активным загрязнителем атмосферы. Валидация и взаимная калибровка разных систем мониторинга атмосферного озона позволяет определить точность различных методов, а также гармонизировать отдельные ряды измерений. На станции СПбГУ в Петергофе измерения общего содержания озона (ОСО) проводятся с помощью Фурье-спектрометра высокого спектрального разрешения Bruker IFS 125HR (FTIR-метод), а также спектрометров Ocean Optics HR4000 в УФ и ВИД-диапазонах спектра (DOAS-UV и DOAS-VIS-методы, соответственно).

Мы сопоставили временные ряды, полученные с использованием различных методик определения содержания озона из FTIR-спектров солнечного излучения, с данными измерений ОСО эталонным спектрофотометром Dobson №108 на станции Воейково, расположенной в ~50 км от станции СПбГУ. На основании этого сопоставления мы отобрали ряды ОСО, которые в дальнейшем были сопоставлены с данными DOAS-измерений за период 2009–2022 гг. DOAS-измерения ОСО были скорректированы на основе FTIR-измерений. Полученные гармонизированные ряды позволили проанализировать изменчивость ОСО в окрестностях Санкт-Петербурга в различных временных масштабах. Архив наземных измерений ОСО на станции СПбГУ в Петергофе может быть использован как для валидации спутниковых данных, так и для учета в различных атмосферных моделях.

Наземные спектральные измерения на станции СПбГУ были выполнены на научном оборудовании ресурсного центра СПбГУ «Геомодель». Исследование выполнено в рамках работы лаборатории «Исследования Озонового слоя и верхней атмосферы» СПбГУ (соглашение с Минобрнауки РФ № 075–15-2021-583).

Measurements of total ozone columns at the SPbU site in Peterhof

Ya.A. Virolainen¹(yana.virolainen@spbu.ru), D.V. Ionov¹, G.M. Nerobelov^{1,2}, A.V. Polyakov¹

¹*Saint Petersburg State University, Saint Petersburg, Russia*

²*Scientific Research Centre for Ecological Safety of the RAS, Saint Petersburg, Russia*

Atmospheric ozone plays a unique role in life on Earth. Stratospheric ozone protects the biosphere from harmful UV solar radiation; tropospheric ozone is a greenhouse gas and a chemically active pollutant of the atmosphere. Validation and inter-calibration of different atmospheric ozone monitoring systems makes it possible to determine the accuracy of various methods, as well as to harmonize individual measurement series. At the St. Petersburg State University site in Peterhof, total ozone column (TOC) measurements are carried out using the Bruker IFS 125HR high spectral resolution Fourier spectrometer (FTIR method) and the Ocean Optics HR4000 spectrometers in the UV and VIS spectral ranges (DOAS-UV and DOAS- VIS methods, respectively).

We compared the time series derived using various strategies for TOC retrievals from the FTIR solar spectra measurements with the TOC data obtained using the Dobson No. 108 spectrophotometer at the Voeykovo site, located at the distance of ~50 km from the SPbU site. Based on this comparison, we selected TOC series, which were subsequently compared with the data of DOAS measurements for the period 2009–2022. The DOAS TOC measurements were then corrected using FTIR measurements as a reference. The harmonized series of TOC measurements made it possible to analyze the TOC variability in the vicinity of St. Petersburg on various time scales. The archive of ground-based TOC measurements at the SPbU site in

Peterhof can be used both for validation of satellite data and for assimilation in various atmospheric models.

Ground-based spectral measurements at the SPbU site were carried out using the scientific equipment of the resource center of St. Petersburg State University "Geomodel". The study was carried out as part of the work of the Ozone layer and upper atmosphere research laboratory of St. Petersburg State University (agreement with the Ministry of Education and Science of the Russian Federation No. 075-15-2021-583).

Исследование содержания HCl и HF в атмосфере методом наземной ИК Фурье-спектроскопии

Акишина С.В. (st076936@student.spbu.ru), Поляков А.В., Виролайнен Я.А.
Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

Проблема разрушения озонового слоя стала одной из главных экологических проблем прошлого столетия. Исследования показали, что основной причиной уменьшения содержания стратосферного озона являлись выбросы хлорфторуглеродных (ХФУ) соединений, активно используемых во второй половине 20-го века. В результате фотолиза ХФУ в стратосфере наблюдается рост концентрации свободного хлора, непосредственно участвующего в реакциях с разрушением озона, а также хлористого водорода (HCl), который является резервуаром активного хлора. В настоящей работе были получены оценки общего содержания (ОС) HCl и фтористого водорода (HF). HF не участвует в циклах разрушения озонового слоя, однако является важным индикатором динамических вариаций содержания химически активных атмосферных газов, таких как HCl и озон.

Мы оптимизировали методику восстановления атмосферного содержания указанных газов, используя новые версии априорной информации о профилях газов (WACCM.v7) и спектрах поглощения (HITRAN2020, ATM). На основе спектральных наземных измерений солнечного излучения Фурье-спектрометром Bruker IFS 125HR на станции наблюдательной сети IRWG-NDACC St. Petersburg (59.9 N, 29.8 E) за март 2009 – март 2023 гг. были получены величины общего содержания и оценки трендов содержания HCl и HF вблизи Санкт-Петербурга. Наблюдается отрицательный тренд ОС HCl: $(-0.26 \pm 0.21) \text{ \%/year}$. Тренд HF оценивается как $(0.59 \pm 0.27) \text{ \%/year}$. Сравнение результатов с данными близлежащих станций IRWG-NDACC показало хорошую согласованность с измерениями на станциях Harestua (60.2 N, 10.8 E) и Kiruna (67.8 N, 20.4 E).

Кроме того, в работе приводится оценка периодов уменьшения содержания в атмосфере хлористого водорода и связанных с этим возможных озоновых аномалий. В частности, нами замечено относительно резкое уменьшение ОС HCl в зимне-весенний период 2023 года. Таким образом, в этот период были возможны активация хлора и, соответственно, химические потери озона.

Работа выполнена при поддержке министерства науки и высшего образования Российской Федерации, № соглашения 075-15-2021-583, в Лаборатории Исследований Озонового слоя и Верхней Атмосферы СПбГУ.

Работа выполнена с использованием оборудования ресурсного центра СПбГУ «Геомодель».

Study of HCl and HF content in the atmosphere by ground-based infrared Fourier spectroscopy

S.V. Akishina (st076936@student.spbu.ru), A.V. Polyakov, Ya.A. Virolainen
Saint Petersburg State University, Saint Petersburg, Russia

The problem of ozone layer destruction has become one of the major environmental problems of the last century. The emissions of chlorofluorocarbons (CFCs), which were actively used in the second half of the 20th century, are mainly responsible for stratospheric ozone depletion. As a result of photolysis of CFCs in the stratosphere, an increase in active chlorine, directly involved in reactions with ozone depletion, and consequently an increase in hydrogen chloride (HCl), which is a reservoir of active chlorine, are observed. In the present study, we derived the atmospheric total columns (TCs) of HCl and hydrogen fluoride (HF). HF is not involved in ozone depletion cycles, but it is a dynamic tracer of variations in the content of chemically active atmospheric gases such as HCl and ozone.

We optimized the methodology for estimating the atmospheric concentration of these gases using new releases of a priori information about the gas profiles (WACCM.v7) and their absorption spectra (HITRAN2020, ATM). We derived the TCs and trend estimates of HCl and HF near St. Petersburg using ground-based spectral measurements of solar radiation by the Bruker IFS 125HR Fourier spectrometer at the IRWG-NDACC St. Petersburg observation network station (59.9 N, 29.8 E) for March 2009 – March 2023. We observe a negative trend in HCl TCs: $(-0.26 \pm 0.21) \%$ /year. HF trend is estimated as $(0.59 \pm 0.27) \%$ /year. Comparison of the results with observations at nearby IRWG-NDACC stations showed a good agreement with measurements at the Harestua (60.2 N, 10.8 E) and Kiruna (67.8 N, 20.4 E) stations.

In addition, we detected the periods of short-term decreases in hydrogen chloride TCs and possible ozone anomalies associated with them. In particular, we noticed a relatively strong decrease in HCl TCs during the winter-spring period of 2023. Therefore, in this period, a chlorine activation and, as a result, the ozone chemical loss were also possible.

The work was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, agreement No. 075-15-2021-583, at the Laboratory of Ozone Layer and Upper Atmosphere Research, SPbSU.

The work was performed using the equipment of the St. Petersburg State University Resource Center "Geomodel".

Измерения общего содержания CFC-11, CFC-12 и HCFC-22 в атмосфере на станции NDACC St.Petersburg

Поляков А.В. (a.v.polyakov@spbu.ru), Макарова М.В., Виролайнен Я.А.
Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

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 происходит 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 газов, например, HCFC-22. Получены оценки общего содержания (ОС) фреонов CFC-11, CFC-12, HCFC-22 в атмосфере за период 2009-2023 гг. над Петергофом в окрестности Санкт-Петербурга на основе наземных измерений солнечного ИК излучения. Систематические погрешности определения ОС составляют 7.6, 5.7 и 2.2%, случайные 3.1, 3.8 и 2.4% для CFC-11, HCFC-22 и CFC-12, соответственно. Общая изменчивость за вычетом систематического тренда равна 4.1, 5.2 и 2.4%, среднеквадратическая изменчивость в течение дня равна 0.8, 3.7 и 0.6% для CFC-11, HCFC-22 и CFC-12, соответственно. Оценки тренда за 2009-2023 гг. составили $-0.29 \pm 0.05\%$, $+1.78 \pm 0.09\%$ и $-0.55 \pm 0.04\%$, что согласуется с данными других авторов.

В период 2009-2016 гг. наблюдался устойчивый рост содержания HCFC-22, но после 2016 г. наступил период его стабилизации в атмосфере над Санкт-Петербургом, связанный с ограничением и частичным прекращением его применения. Вместе с тем, 22 июня 2022 были зарегистрированы экстремально высокие (более чем в 10 раз превышающие средние значения) величины ОС HCFC-22, вероятно связанные с техногенным загрязнением. Такое наблюдение показало возможность использования FTIR спектроскопии в качестве средства контроля техногенных выбросов.

Исследование выполнено в рамках работы лаборатории «Исследования Озонового слоя и верхней атмосферы» СПбГУ (соглашение с Минобрнауки РФ № 075–15-2021-583). Измерения солнечного излучения выполнялись с использованием аппаратуры ресурсного центра «Геомодель».

Measurements of CFC-11, CFC-12, and HCFC-22 total columns in the atmosphere over the St. Petersburg NDACC site

A.V. Polyakov (a.v.polyakov@spbu.ru), M.V. Makarova, Ya.A. Virolainen
Saint-Petersburg State University, Saint Petersburg, Russia

Halocarbons is 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. Halocarbons are accumulated in the troposphere, from where they are transported into the stratosphere of polar regions of the Earth through the general atmospheric circulation. The ozone layer may be destroyed there up to the formation of so-called ozone holes. The result of prohibitions and restrictions in the use of chlorofluorocarbons is both a decrease in the content of such compounds as CFC-11 and CFC-12, as well as the growth of their substitutes, for example, HCFC-22. Total columns (TCs) of atmospheric CFC-11, CFC-12, and HCFC-22 were estimated above Peterhof near Saint Petersburg, Russia for the period of 2009-2023. Systematic errors of TCs retrieval are 7.6, 5.7 and 2.2%, random errors are 3.1, 3.8 and 2.4% for CFC-11, HCFC-22, and CFC-12, respectively. The total variability minus trend is 4.1, 5.2 and 2.4%, the intraday root-mean-square variability is 0.8, 3.7 and 0.6% for CFC-11, HCFC-22, and CFC-12 TCs, respectively. Trend estimates for 2009-2023 are $-0.29 \pm 0.05\%$, $+1.78 \pm 0.09\%$ and $-0.55 \pm 0.04\%$, which is consistent with the independent data.

In 2009-2016, a steady increase in the HCFC-22 TCs was observed. After 2016, HCFC-22 TCs in the atmosphere over St. Petersburg started to stabilize due to the limitation and partial cessation of HCFC-22 usage. However, extremely high (10 and more times higher than average values) HCFC-22 TC values have been observed on June 22, 2022, which may be caused by technogenic emissions. Such observations demonstrate the capability of FTIR spectroscopy to monitor the anthropogenic pollutions.

The study was carried out in the "Ozone Layer and Upper Atmosphere Research" laboratory of St. Petersburg State University (agreement with the Ministry of Education and Science of the Russian Federation No. 075-15-2021-583). Measurements of solar radiation were performed using the equipment of the SPBU resource center "Geomodel".

Актуализация климатических норм общего содержания озона

Соломатникова А.А. (pulsin@mail.ru), Павлова К.Г.
ФБГУ «Главная геофизическая обсерватория им. А.И.Воейкова», Санкт-Петербург, Россия

Продолжительность рядов наблюдений общего содержания озона (ОСО) на большинстве станций озонометрической сети Росгидромета к настоящему времени составляет около 50 лет. Однородные ряды данных позволили рассчитать тридцатилетние нормы, которые демонстрируют существенные региональные различия сезонного хода

ОСО. Для расчета климатических норм ОСО был использован период 1973–2002 гг. В 2022 году в соответствии с рекомендациями Росгидромета в качестве единого периода для расчета норм принят интервал с 1991-го по 2020-й год.

Анализ полученных при смещении временного интервала норм продемонстрировал значительные изменения осредненных значений. Новые нормы заметно ниже тех, что использовались ранее (до 4 %), изменения имеют явно выраженный сезонный ход, и этот ход носит индивидуальный характер для разных регионов.

Общее понижение нормальных значений во многом обусловлено исключением из расчета периода с высоким содержанием озона в атмосфере (1973-1987г.г.). Сезонный ход изменений норм и его вариативность от региона к региону могут быть вызваны разными причинами, связанными как с изменением глобальной циркуляции, так и с механизмами накопления, переноса и разрушения озона в атмосфере, действующими с разной интенсивностью в разных регионах в разные сезоны.

Использование новых норм позволяет актуализировать оценку нынешнего состояния озонового слоя, но при оценке долгосрочных трендов необходимо также учитывать и прежние нормы.

Updating of climate norms for the total ozone

A.A. Solomatnikova (pulsin@mail.ru), K.G. Pavlova
The Voeikov MGO, Saint Petersburg, Russia

The duration of the total ozone (TO) data series at most stations of the ozone network of Roshydromet is currently about 50 years. The calculated 30-year average monthly norms (1973–2002) demonstrate significant regional differences in the TO seasonal variation. In 2022, the interval from 1991 to 2020 was chosen as a new period for calculating the norms.

The analysis of the norms obtained during the shift of the time interval showed significant changes in the averaged values. The new norms are lower than those used previously (1-4%), the changes have a pronounced seasonal course, and this course is individual for different regions.

The general decrease in the values of the norms is due to the exclusion from the calculation of the period with a high content of ozone in the atmosphere (1973-1987). The seasonal course of changes in norms and its variability from region to region can be caused by various reasons. Changes in the global circulation and the mechanisms of accumulation, transport and destruction of ozone in the atmosphere have different intensity in different regions in different seasons.

The using of new norms allows updating the assessment of the current state of the ozone layer, but for analyzing long-term trends, it is also necessary to use the old norms.

Изменения стратосферы Арктики в XXI веке по расчетам химико-климатической модели SOCOLv4

Варгин П.Н.^{1,2}(p_vargin@mail.ru), Кострыкин С.В.^{3,4}, Коваль А.В.⁵⁻⁷, Розанов Е.В.^{7,8}, Егорова Т.А.⁸,
Смышляев С.П.^{6,7}, Цветкова Н.Д.¹

¹ Центральная Аэрологическая обсерватория, Долгопрудный, Московская область, Россия

² Институт Физики Атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия

³ Институт Вычислительной Математики им. Г.И. Марчука РАН, Москва, Россия

⁴ Институт Глобального Климата и Экологии им. Ю.А. Израэля, Москва, Россия

⁵ Факультет Физики Атмосферы, Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

⁶ Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург, Россия

⁷ Лаборатория исследования озонового слоя и верхней атмосферы, Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

⁸ *Physikalisch-Meteorologisches Observatorium Davos/World Radiation Center (PMOD/WRC), Davos, Switzerland*

Исследование изменений основных динамических процессов стратосферы Арктики, влияющих на состояние озонового слоя, выполнено на основе анализа среднемесячных данных двух ансамблевых расчетов, состоящих из трех членов, ХКМ SOCOLv4 с 2015 г. по 2100 г., проведенных по умеренному (SSP2-4.5) и жесткому (SSP5-8.5) сценариям роста парниковых газов. Сравнение двадцатилетних периодов в конце и начале XXI века с 2080 г. по 2099 г. и с 2015 г. по 2034 г. для марта (когда наблюдается наибольшее разрушение озонового слоя) показывает снижение температуры стратосферы на 5°-10°. Минимальная температура в нижней стратосфере Арктики в марте, которая определяет силу разрушения озонового слоя, наблюдается при наименьшем среднезональном меридиональном потоке тепла в нижней стратосфере в январе-феврале. При умеренном сценарии наблюдается рост амплитуды волны с зональным числом 1 в январе-феврале. При жестком сценарии наблюдается сильно различие между членами ансамбля и, амплитуда этой волны, осредненная ансамблю, к концу века характеризуется лишь небольшим усилением. Среди всех расчетов выявлено пять эпизодов с отрицательными аномалиями ОСО до -100 е.Д. в марте в Арктике, что сравнимо с мартом 2011 г., но меньше чем в марте 2020 г., когда наблюдалось наибольшее разрушение озонового слоя. Однако при обоих сценариях ожидается увеличение общего содержания озона в марте в Арктике к концу 21 века. При расчетах по обоим сценариям выявлено усиление изолированности стратосферного полярного вихря в Арктике и рост объемов воздушных масс, с температурами достаточными для формирования необходимых для активации озоно-разрушающих соединений полярных стратосферных облаков первого типа (PSC NAT) в марте, что позволяет говорить об усилении стратосферного полярного вихря в конце зимнего сезона в нижней стратосфере Арктики к концу XXI века. В обоих сценариях наблюдается усиление остаточной меридиональной циркуляции (ОМЦ) в марте к концу 21 века. При этом при жестком сценарии усиление ОМЦ возможно превысит 20%. Обсуждаются выявленные к концу 21 века изменения водяного пара, соединений азотной кислоты, а также аэрозольных и жидких частиц серной кислоты SSA / STS, влияющих на состояние озонового слоя.

Работа выполнена в Лаборатории исследований озонового слоя и верхней атмосферы СПбГУ (Соглашение 075-15-2021-583) и в Российском государственном гидрометеорологическом университете (проект FSZU-2023-0002).

Arctic stratosphere changes in the 21st century in the Earth system model SOCOLv4

P.N. Vargin^{1,2}(p_vargin@mail.ru), S.V. Kostykin^{3,4}, A.V. Koval^{5,6,7}, E.V. Rozanov^{7,8}, T.A. Egorova⁸, S.P. Smyshlyaev^{6,7}, N.D. Tsvetkova¹

¹Central Aerological Observatory, Moscow region, Russia

² Obukhov Institute of Atmospheric Physics of the Russian Academy of Science, Moscow, Russia

³ Marchuk Institute of Numerical Mathematics of the Russian Academy of Science, Moscow, Russia

⁴ Izrael Institute of Global Climate and Ecology, Moscow, Russia

⁵ Atmospheric Physics Department, Saint-Petersburg State University, Saint Petersburg, Russia

⁶ Department of Meteorological Forecasts, Russian State Hydrometeorological University, Saint Petersburg, Russia

⁷ Ozone layer and upper atmosphere research laboratory, Saint Petersburg State University, Saint Petersburg, Russia

⁸ *Physikalisch-Meteorologisches Observatorium Davos/World Radiation Center (PMOD/WRC), Davos, Switzerland*

Two ensemble simulations of new Earth system model SOCOLv4 for the period from 2015 to 2099 under moderate (SSP2-4.5) and severe (SSP5-8.5) scenarios of GHG emissions growth were analyzed to investigate changes in key dynamical processes relevant for Arctic stratospheric ozone. The model shows a 5–10 K cooling and 5-20% humidity increases in the Arctic lower - upper stratosphere in March (when the most considerable ozone depletion occurs) between the 2080-2099 and 2015-2034 periods. The minimal temperature in the lower polar stratosphere in March, which defines the strength of ozone depletion, appears when zonal mean meridional heat flux (HF) in the lower stratosphere in January - February is the lowest. In the late 21st century, the strengthening of HF up to 20 K m/s (~25%) in the upper stratosphere nearby 70°N in January – February is obtained in the moderate scenario while only a slight increase of HF over 50°N-60°N up to 5 K m/s in the upper stratosphere and a decrease with the comparable values over the high latitudes in the severe scenario. Although the model simulations confirm the expected ozone layer recovery (total ozone minimum values in Arctic in March through the 21 century are characterized by a positive trend in both scenarios), the large scale negative ozone anomalies up to -100 DU and comparable to the observed in March 2011 but weaker than record values in March 2020 are possible till the late 21 century. The volume of low stratospheric air with temperatures below solid nitric acid trihydrate polar stratospheric clouds (PSC NAT) formation threshold is reconstructed from 3D potential vorticity and temperature fields inside the polar vortex. It is shown a significant positive trend in this parameter in March under the SSP5-8.5. Revealed increase in the polar vortex isolation throughout the 21 century indicates its possible strengthening in the lower stratosphere. Positive trends of surface area density (SAD) of PSC NAT particles in March in the lower Arctic stratosphere over the 2015-2099 is significant in the severe scenario. The polar vortex longitudinal shift toward Northern Eurasia is expected in the lower stratosphere in the late 21 century in both scenarios. The statistically significant long term stratospheric sulfuric acid aerosols trend in March is expected only in the SSP5.8-5 scenario most probably due to cooler stratosphere and stronger BDC intensification. Both scenarios predict an increase in the residual meridional circulation (RMC) in March by the end of the 21 century. In some regions of the stratosphere, the RMC enhancement under the severe GHG scenario can exceed 20%.

The study was performed at the 'Laboratory for the Research of the Ozone Layer and the Upper Atmosphere' of SPbSU and Russian State Hydrometeorological University under the state task of the Ministry of Science and Higher Education and was funded by the Government of the Russian Federation [agreement 075-15-2021-583] and state task project FSZU-2023-0002.

Моделирование изменений климата и вариаций атмосферного озона в XX-XXI веке с помощью ХКМ SOCOLv3

Усачева^{1,2} М.А. (usa4eva.m@mail.ru), Смышляев^{1,2} С.П., Зубов^{2,3} В.А. и Розанов^{2,4} Е.В.

¹Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург, Россия

²Лаборатория исследования озонового слоя и верхней атмосферы, Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

³Санкт-Петербург, Россия, Главная геофизическая обсерватория имени А.И. Воейкова,

⁴Давосская физико-метеорологическая обсерватория и Всемирный радиационный центр (PMOD/WRC), Давос, Швейцария

Исследование вариаций параметров озонового слоя и поиски основных причин этих изменений до настоящего времени остаются проблемой, актуальность которой определяется существенной ролью озона в сложной системе «Солнце – атмосфера – поверхность Земли – космос». Поглощая ИК-излучение Земли в полосе 9,57 мкм, озон

вносит вклад в изменение температуры нижней атмосферы, а поглощая УФ-излучение Солнца в диапазоне 200-320 нм, влияет на температурную стратификацию стратосферы.

Для оценки относительного вклада основных химических и физических процессов в наблюдаемую изменчивость климата и газового состава атмосферы в 1980-2020 годах была использована химико-климатическая модель (ХКМ) SOCOLv3. В качестве основных рассматривались следующие факторы: (1) изменение содержания озоноразрушающих субстанций; (2) изменение атмосферных концентраций парниковых газов, температуры поверхности океана и площади морского льда; (3) вариации солнечной активности и (4) изменение содержания атмосферного аэрозоля. При этом, для оценки относительной роли указанных факторов были проведены расчеты по сценариям с учетом каждого фактора (с 1 по 4) по отдельности, а также базовый модельный эксперимент по сценарию с учетом всех факторов совместно.

Проанализирована изменчивость температуры тропосферы и нижней стратосферы, а также содержания озона за период с 1980 по 2020 годы по данным наземных и спутниковых измерений. Данные измерений были сопоставлены с результатами базового эксперимента ХКМ SOCOLv3.

Modelling the climate changes and atmospheric ozone variations in XX-XXI by CCM SOCOLv3

Usacheva M.A.^{1,2} (usa4eva.m@mail.ru), Smyshlyaev S.P.^{1,2}, Zubov V.A.^{2,3} and Rozanov^{2,4}
E.V.

¹ Russian State Hydrometeorological University, Saint Petersburg, Russia,

² Laboratory for the study of the ozone layer and the Upper Atmosphere, Saint Petersburg State University, Saint Petersburg, Russia,

³ Voeikov Main Geophysical Observatory, Saint Petersburg, Russia,

⁴ Physikalisch-Meteorologisches Observatorium and World Radiation Center (PMOD/WRC) in Davos, Davos, Switzerland

The study of variations in the parameters of the ozone layer and the search for the main causes of these changes still remain a problem, the relevance of which is determined by the significant role of ozone in the complex system "Sun – atmosphere – Earth's surface – space". By absorbing the IR radiation of the Earth in the band of 9.57 microns, ozone contributes to the temperature change of the lower atmosphere, and by absorbing the UV radiation of the Sun in the range of 200-320 nm, it affects the temperature stratification of the stratosphere.

To assess the relative contribution of the main chemical and physical processes to the observed variability of climate and atmospheric gas composition in 1980-2020, the SOCOLv3 chemical and climatic model (CCM) was used. The following factors were considered as the main ones: (1) changes in the content of ozone-depleting substances; (2) changes in atmospheric concentrations of greenhouse gases, ocean surface temperature and sea ice area; (3) variations in solar activity and (4) changes in atmospheric aerosol content. At the same time, to assess the relative role of these factors, calculations were carried out on scenarios taking into account each factor (from 1 to 4) separately, as well as a basic model experiment on the scenario taking into account all factors together.

The variability of the temperature of the troposphere and the lower stratosphere, as well as the ozone content for the period from 1980 to 2020 was analyzed according to ground and satellite measurements. The measurement data were compared with the results of the basic SOCOLv3 CCM experiment.

Оценка результатов краткосрочного прогноза общего содержания озона

с помощью данных реанализа ERA-Interim

Зубов^{1,2} В.А. (v_zubov@rambler.ru)

¹Лаборатория исследования озонового слоя и верхней атмосферы,

Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

²Главная геофизическая обсерватория имени А.И. Воейкова, Санкт-Петербург, Россия

На основе алгоритма множественной линейной регрессии разработан и реализован в виде комплекса программ метод прогноза общего содержания озона (ОСО) с заблаговременностью 24 и 48 часов для Северного полушария. В качестве предикторов использованы поля температуры и геопотенциала основных изобарических поверхностей, полученные из данных объективного анализа Гидрометцентра РФ (ГМЦ) за 8 лет (2001 – 2008 гг., сайт: <http://meteoinfo.ru/grib>), а также значения ОСО в день составления прогноза из спутниковых измерений приборами TOMS и OMI (спутниковые платформы Earth Probe и Aura соответственно, сайт: <https://ozonewatch.gsfc.nasa.gov>).

Построенный набор регрессионных уравнений (593 700 реализаций) был проверен на независимом материале 2009 года (объективный анализ ГМЦ и спутниковые данные приборов TOMS и OMI), и из него, путем прямого перебора, были отобраны регрессионные уравнения, дающие минимальную среднюю квадратическую ошибку прогноза.

Далее отобранные регрессионные уравнения для прогноза ОСО были протестированы с помощью данных реанализа ERA-Interim за 40-летний период (1980-2019, режим идеального прогноза). При этом особое внимание уделялось эпизодам с экстремальными значениями ОСО.

Estimating results of the short-range forecast of the total column ozone by the ERA-Interim data

V.A. Zubov^{1,2} (v_zubov@rambler.ru)

¹Ozone layer and upper atmosphere research laboratory, Saint Petersburg State University, Saint Petersburg, Russia

²Voeikov Main Geophysical Observatory, Saint Petersburg, Russia

The forecasting scheme of the total column ozone (TCO) over the Northern Hemisphere for 24 and 48 hours has been elaborated and programmed on the base of the multi-regression linear algorithm (MRL). The temperature and geopotential height of the common pressure levels were used as independent variables for MRL. Also, the current TCO was utilized as the additional independent parameter.

The temperature and geopotential height values for the TCO forecasting were taken from the objective analysis data of the Hydrometeorological Service of Russian Federation (HMS RF) (2001-2008, <http://meteoinfo.ru/grib>). The correspondent values of TCO were downloaded from the satellite measurement site (<https://ozonewatch.gsfc.nasa.gov>, OMI and TOMS instruments on the Earth Probe и Aura platforms respectively).

All constructed regression equations (593 700 realizations) have been tested against the independent data of 2009 (objective analysis of HCR RF and satellite observations of OMI and TOMS). On the base of testing the equations were considered as the best if they allowed one to calculate the TCO values with the least rms error against the correspondent measurement data. Finally, the set of the best MRL equations have been evaluated by performing with them the short-range ideal TCO forecast on the base of the reanalysis data (ERA-Interim, 1980-2019). The special attention was paid to the episodes with the extreme values of TCO.

Статистический анализ моделей, описывающих озоновый слой Земли

Алфимов В.А.¹(valentin.alfimov@yandex.com), Фролькис В.А.^{2,3}

¹Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, Санкт-Петербург, Россия

²Главная геофизическая обсерватория им. А.И. Воейкова, Санкт-Петербург, Россия

³Санкт-Петербургский государственный экономический университет, Санкт-Петербург, Россия

Использование математических моделей в исследовании озонового слоя позволяет создавать прогнозы и оценивать тенденции его изменений. Потенциально, это поможет принимать меры по защите озонового слоя и сохранению его целостности. Так как дефицит озона проявляется главным образом в полярных областях (в Антарктиде озоновая дыра появляется каждую весну), то этим областям уделяется особое внимание.

Рассматриваются фотохимические модели SOCOL, CMAM, GEOSCCM, MOCAGE, NIWA, UKESWM, EMAC, CCRNIES, направленные на исследование озонового слоя Земли. Для сравнительного анализа перечисленных моделей производится их группирование в кластеры, на основе которых выделяются модели со схожими свойствами. Сравнение моделей проводится за период 1960-2018 гг. в пределах четырех географических зон: Антарктики, Арктики, Европейской широтно-долготной зоны и в симметричной ей области Южного полушария. В рамках сравнительного анализа исследовался вопрос принадлежности моделей к одному и тому же ансамблю на основе кластеризации и проверки статистических гипотез.

Для определения принадлежности той или иной модели к ансамблю используется кластеризация по медианному значению моделируемого содержания озона за осенние периоды и по его дисперсии. Для кластеризации и поиска аномальных модельных результатов применяется плотностной алгоритм пространственной кластеризации с присутствием шума (DBSCAN). В спорных ситуациях применяется алгоритм нечёткой кластеризации С-средних (FCM), позволяющий использовать инструмент нечёткой логики. В качестве факторов, позволяющих отнести модель к ансамблю, выступают непараметрические статистические тесты, такие как дисперсионный тест Левена и медианный тест Мудса. Таким образом, рассматриваются уровни «доверия», позволяющие принять решение о принадлежности той или иной модели к определенному ансамблю.

В Южном полушарии модели SOCOL, CMAM, MOCAGE образуют центральный кластер из субкластеров указанных моделей при разных начальных возмущениях. Модели UKESWM, CCSRNIIES, EMAC, NIWA определяются как аномальные. При этом UKESWM характеризуется наибольшей дисперсией среди рассмотренных моделей, EMAC наибольшей, а CCSRNIIES наименьшей медианой в обоих полушариях. Последним также свойственны самые низкие дисперсии в зоне Антарктики. Модель NIWA образует небольшой кластер из реализации для трех начальных возмущений (r1-r3), который характеризуется значимо меньшей дисперсией, чем у основного кластера. Доминирующий кластер моделей в зоне Антарктики достаточно разряжен и включает модель GEOSCCM. В симметричной Европе зоне Южного полушария, модельные субкластеры SOCOL(r1-r3), CMAM(r1-r5), MOCAGE(r1-r3) сходятся, уплотняя центральный кластер по дисперсии, при этом медиана и дисперсия модели GEOSCCM относительно других моделей становится значительно меньшей, что приближает её статистику к модели CCSRNIIES. Дисперсия модели NIWA уменьшается и становится минимальной среди всех моделей.

В Северном полушарии в основной кластер входят модели SOCOL, CMAM, EMAC. В Арктической зоне основной кластер плотный и дополняется моделью GEOSCCM, при этом всем моделям основного кластера соответствует низкая дисперсия относительно других моделей. MOCAGE и NIWA образуют независимые кластеры из вариантов моделей при возмущениях r1-r3. UKESWM характеризуется наибольшей дисперсией, CCSRNIES – низкой дисперсией и меньшей медианой. При этом все 4 модели являются разрозненными аномалиями относительно основного кластера. В Европейской зоне дисперсия GEOSCCM приближает к модели NIWA и обе модели превосходят по дисперсии UKESWM, в силу чего они образуют условный кластер с максимальной дисперсией на данном географическом участке. MOCAGE на обоих участках имеет самую высокую медиану среди моделей.

По итогу работы модели были сгруппированы по статистическим свойствам и проведен анализ на основе статистических показателей моделей с указанием достоверности результата. Для двух моделей проанализирована прогнозная динамика до 2100 года.

Statistical analysis of models simulating the Earth's ozone layer

V.A. Alfimov¹(valentin.alfimov@yandex.com), V.A. Frolkis^{2,3}

¹*Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, Saint Petersburg, Russia*

²*The Voeikov Main Geophysical Observatory, Saint Petersburg, Russia*

³*Saint Petersburg State University of Economics, Saint Petersburg, Russia*

Application of mathematical models to study the ozone layer allows for forecasting and assessing trends in its changes. Potentially, it could help to take actions in order to protect the ozone layer and preserve its integrity. Since ozone depletion is mainly observed in polar regions (the ozone hole appears over Antarctica every spring), these regions are of particular research interest.

The photochemical models SOCOL, CMAM, GEOSCCM, MOCAGE, NIWA, UKESWM, EMAC, CCSRNIES, aimed at studying the Earth's ozone layer, are considered. To perform a comparative analysis of the listed models, they are grouped into clusters, based on which models with similar properties are identified. The comparison of models is carried out over the period of 1960-2018 within four geographic zones: Antarctica, the Arctic, the European longitudinal zone, and the symmetrical zone of the Southern Hemisphere. Within the comparative analysis, the question of whether models belong to the same ensemble was studied based on clustering and testing statistical hypotheses.

To determine the membership of a particular model in an ensemble, clustering is performed based on the median value of the model and its variance during autumn periods. Density-based spatial clustering with noise (DBSCAN) is used for clustering and searching for anomalous model results. In controversial situations, the fuzzy C-means (FCM) is applied, which allows to use fuzzy logic. Non-parametric statistical tests, such as Levene's variance test and Mood's median test, serve as factors for assigning a model to an ensemble. Thus, "confidence" levels are considered, allowing a decision to be made about the membership of a particular model in a certain ensemble.

In the Southern Hemisphere, the models SOCOL, CMAM, and MOCAGE form a central cluster of subclusters of these models with different initial perturbations. The models UKESWM, CCSRNIES, EMAC, and NIWA are identified as anomalous. UKESWM is characterized by the highest variance among the considered models, EMAC has the highest median, and CCSRNIES has the lowest median in both hemispheres. Both are also characterized by the

lowest variances in the Antarctic region. The NIWA model forms a small cluster of realizations for its three initial perturbations (r1-r3), which is characterized by significantly lower variance than the main cluster. The dominant cluster of models in the Antarctic region is quite sparse and includes the GEOSCCM model. In the symmetric to European zone of the Southern Hemisphere, the model subclusters SOCOL(r1-r3), CMAM(r1-r5), and MOCAGE(r1-r3) converge and densifying the central cluster by variance, while the median and variance of the GEOSCCM model become significantly smaller compared to other models, bringing it closer to the CCSRNIES model. The variance of the NIWA model decreases and becomes the lowest among all models.

In the Northern Hemisphere, the main cluster includes the models SOCOL, CMAM, and EMAC. In the Arctic zone, the main cluster is dense and supplemented by the GEOSCCM model. All models of the main cluster have low variance compared to other models. MOCAGE and NIWA form independent clusters of model variants with perturbations r1-r3. UKESWM is characterized by the highest variance, CCSRNIES - by low variance and lower median. At the same time, all four models are separate anomalies relative to the main cluster. In the European zone, the variance of GEOSCCM approaches that of the NIWA model, and both models exceed UKESWM in variance, which is why they form a conditional cluster with the maximum variance in this geographic area. MOCAGE has the highest median among models in both hemisphere's areas.

Thus, the models were grouped by statistical properties and an analysis was carried out based on the statistical indicators of the models with an indication of the reliability of the result. For two models, the predictive dynamics up to 2100 is analyzed.

Сравнительный анализ вариаций озonoактивных компонент внутри арктического стратосферного вихря на основе траекторного моделирования и данных реанализа

Лукьянов А.Н.(lukyanov@caomsk.mipt.ru), Юшков В.А., Вязанкин А.С.
Центральная аэрологическая обсерватория, Долгопрудный, Россия

Рассмотрены зимне-весенние сезоны в Арктике с наиболее сильными стратосферными вихрями и, как следствие, наибольшими потерями озона. Для исследования вариаций озона и озonoактивных компонент использован ансамбль обратных траекторий внутри вихря и данные реанализа M2SCREAM, включающий некоторые химические компоненты, влияющие на концентрацию озона. Показано, что рекордное разрушение озона зимой 2020 г. было обусловлено не только долгоживущим устойчивым стратосферным полярным вихрем, но также и более ранним образованием полярных стратосферных облаков с гетерогенными реакциями на их поверхности и более сильной денитрификацией исследуемых воздушных масс. Предложенный метод может быть использован для валидации химических транспортных и климатических химических моделей при моделировании процессов разрушения озона в полярной области в зимне-весенние сезоны.

Работа проводилась в рамках научной темы Росгидромета 2.9 «Развитие и модернизация технологий мониторинга средней атмосферы и озонового слоя в условиях меняющегося климата».

Comparative analysis of variations in ozone-active components inside the Arctic stratospheric vortex based on trajectory modeling and reanalysis data

A.N. Lukyanov(lukyanov@caomsk.mipt.ru), V.A. Yushkov, A.S. Vyazankin
Central Aerological Observatory, Dolgoprudny, Russia

The winter-spring seasons in the Arctic with the strongest stratospheric vortices and, as a result, the greatest ozone losses are considered. To study variations in ozone and ozone-active components, we used an ensemble of backward trajectories inside the vortex and M2SCREAM reanalysis data, which includes some chemical components that affect the ozone concentration. It is shown that the record ozone depletion in the winter of 2020 was due not only to the long-lived stable polar stratospheric vortex, but also to the earlier formation of polar stratospheric clouds with heterogeneous reactions on their surfaces and stronger denitrification of the studied air masses. The proposed method can be used to validate chemical transport and climatic chemical models in modeling the processes of ozone depletion in the polar region in the winter-spring seasons.

The work was carried out within the framework of the scientific theme of Roshydromet 2.9 "Development and modernization of technologies for monitoring the middle atmosphere and the ozone layer in a changing climate."

WRF-Chem моделирование тропосферного озона в районе Санкт-Петербурга

Неробелов Г.^{1,2} (akulishe95@mail.ru), Виrolайнен Я.¹, Ионов Д.¹, Поляков А.¹

¹Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

²Научно-исследовательский центр экологической безопасности РАН, Санкт-Петербург, Россия

Информация об изменчивости озона (O₃) в тропосфере важна как из-за его негативного воздействия на живые организмы как токсичного газа, так и из-за его влияния на парниковый эффект. В настоящее время налажен регулярный мониторинг содержания озона в тропосфере при помощи наземных и спутниковых дистанционных измерений. Например, в Петергофе (Санкт-Петербург, Россия) с 2009 г. проводятся регулярные наземные дистанционные измерения содержания в атмосфере более 20 газов (включая озон). Однако данные измерения обладают рядом недостатков, из-за которых исследование пространственно-временной изменчивости тропосферного озона затрудняется. Например, наземные дистанционные измерения являются локальными и, также как и спутниковые измерения, обладают относительно низким вертикальным разрешением. В последние десятилетия для изучения пространственно-временной изменчивости тропосферного озона в дополнение к измерениям используются численные модели, описывающие изменение содержания газовых примесей и аэрозолей в атмосфере Земли. Одна из таких моделей - трехмерная модель прогноза погоды и состава атмосферы высокого пространственного и временного разрешения WRF-Chem. Целью исследования является оценка возможности численной модели WRF-Chem описывать динамику тропосферного озона в районе российского мегаполиса Санкт-Петербурга в течение нескольких лет на основе ее валидации по наземным и спутниковым измерениям. В дальнейшем валидированную модель возможно будет использовать для исследования особенностей изменения тропосферного озона в условиях северных широт (60° С.Ш.) и антропогенного воздействия Санкт-Петербурга.

Наземные спектральные измерения и измерения приземной концентрации озона на станции СПбГУ были выполнены на научном оборудовании ресурсного центра СПбГУ «Геомодель». Исследование выполнено при поддержке гранта РФФИ № 23-27-00166.

WRF-Chem modelling of tropospheric ozone near St Petersburg

Nerobelov G.^{1,2} (akulishe95@mail.ru), Virolainen Ya.¹, Ionov D.¹, Polyakov A.¹

¹Saint Petersburg State University, Saint Petersburg, Russia

²Scientific Research Centre for Ecological Safety of the RAS, Saint Petersburg, Russia

Variation of ozone (O₃) in the troposphere is important for humans due to the negative influence of ozone molecules on living organisms as a toxic gas and on greenhouse effect. Nowadays regular monitoring of tropospheric ozone is established by ground-based and satellite remote observations. For example, regular ground-based remote measurements of more than 20 gases (including ozone) in the atmosphere have been carried out in Peterhof (St Petersburg, Russia) since 2009. However, such measurements possess some limitations which hamper investigations of tropospheric ozone spatio-temporal variation. For instance, ground-based observations are local and, together with satellite data, provide information with relatively crude vertical resolution. During the last decades, in addition to the measurements, numerical models, which describe variations of gases and aerosols in the Earth's atmosphere, have also been used to study spatio-temporal variation of tropospheric ozone. One of such models is 3D numerical weather prediction and atmospheric composition model of high spatial and temporal resolution WRF-Chem. The aim of this study is to evaluate the capability of the WRF-Chem numerical model to simulate dynamics of tropospheric ozone near Russian megacity St Petersburg during several years by validation with ground-based and satellite measurements. In the next studies the validated model can be used to investigate features of tropospheric ozone variation under the conditions of northern latitudes (60°N) and St Petersburg anthropogenic influence.

Ground-based spectroscopic measurements and measurements of near-surface ozone concentration at SPbU station were carried out with scientific equipment of SPbU resource centre "Geomodel". The investigation is supported by RSF project № 23-27-00166.

Влияние Эль-Ниньо – Южного колебания на озоновый слой и динамические процессы в арктической стратосфере

А.Р. Яковлев (endrusj@rambler.ru), С.П. Смышляев

Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург, Россия

Эль-Ниньо - Южное колебание (ЭНЮК) оказывает влияние на атмосферную циркуляцию и, следовательно, перенос химически взаимодействующих примесей как в тропосфере, так и в стратосфере. Проанализированы данные ре-анализа по температуре поверхности океана, температуре воздуха, концентрации и общему содержанию озона и зонального ветра. Исследуется влияние ЭНЮК на динамику полярной стратосферы и озонового слоя в течение периода с 1980 по 2020. Особое внимание уделяется изучению различий влияния разных типов ЭНЮК (Восточно-Тихоокеанское (ВТ) и Центрально-Тихоокеанское (ЦТ)) Эль-Ниньо и Ла-Нинья. Показано, что при фазе ЦТ Эль-Ниньо зональный ветер сильнее ослабевает и чаще обращается, чем при фазе ВТ Эль-Ниньо, что ЦТ Эль-Ниньо приводит к более быстрому разрушению полярного вихря (ПВ), повышению температуры воздуха в стратосфере и увеличению концентрации и общего содержания озона, чем ВТ Эль-Ниньо. При фазе Ла-Нинья при ЦТ типе ПВ является более устойчивым, что часто приводит к существенному снижению содержания озона. При ВТ Ла-Нинья часто наблюдаются мощные ВСП, которые приводят к разрушению ПВ и увеличению содержания озона.

The impact of El Niño - Southern Oscillation on the ozone layer and dynamic processes in the Arctic stratosphere

A.R.Jakovlev (endrusj@rambler.ru), S.P. Smyshlyayev

Russian State Hydrometeorological University, Saint-Petersburg, Russia

El Niño - Southern Oscillation (ENSO) impacts atmospheric circulation and, consequently, the transport of chemically interacting impurities both in the troposphere and in the stratosphere. The re-analysis data on ocean surface temperature, air temperature, concentration and total ozone column and zonal wind are analyzed. The impact of ENSO on the dynamics of the polar stratosphere and the ozone layer during the period from 1980 to 2020 is studied. Particular attention is paid to the study of differences in the influence of different types of ENSO (East Pacific (EP) and Central Pacific (CP)) El Niño and La Niña. It is shown that during the CP El Niño phase, the zonal wind weakens more strongly and revolves more often than during the EP El Niño phase, that the CP El Niño leads to a more rapid destruction of the polar vortex (PV), an increase in air temperature in the stratosphere and an increase in the concentration and total ozone than EP El Niño. During the La Niña phase in the CP type, the PV is more stable, which often leads to a significant decrease in the ozone content. Powerful SSWs are often observed during EP La Niña, which lead to the destruction of HP and an increase in the ozone content.

Изменение динамических условий полярной атмосферы на основе данных модели SOCOLv4

Иманова А. С.^{1,2}(a.imanova@spbu.ru), Смышляев С.П.^{1,2}, Коваль А. В.^{1,2}, Розанов Е. В.^{1,3}

¹Лаборатория исследований озонового слоя и верхней атмосферы, Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

²Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург, Россия

³Physikalisch-Meteorologisches Observatorium Davos/World Radiation Center (PMOD/WRC), Davos, Switzerland

Проведён анализ моделирования поведения озона и других параметров атмосферы при двух сценариях выброса парниковых газов – умеренном (SSP2-4.5) и жестком (SSP5-8.5) в полярных регионах с 2015 по 2099 год на основе данных модели SOCOLv4. Были рассмотрены такие параметры как общее содержание озона, температура, скорость зонального и меридионального ветра, содержание хлорных и бромных компонент. Также проведён расчёт остаточной меридиональной циркуляции, что позволяет провести диагностику волнового воздействия на средний поток, а также возможность расчета процессов переноса газовых примесей в меридиональной плоскости.

Работа выполнена в Лаборатории исследований озонового слоя и верхней атмосферы СПбГУ (Соглашение 075-15-2021-583) и в Российском государственном гидрометеорологическом университете (проект FSZU-2023-0002).

Changing the dynamic conditions of the polar atmosphere based on the data of the SOCOLv4 model

A.S. Imanova^{1,2}(a.imanova@spbu.ru), S.P. Smyshlyaev^{1,2}, A.V. Koval^{1,2}, E.V. Rozanov^{1,3}

¹Ozone layer and upper atmosphere research laboratory, Saint Petersburg State University, Saint Petersburg, Russia

²Department of Meteorological Forecasts, Russian State Hydrometeorological University, Saint Petersburg, Russia

³Physikalisch-Meteorologisches Observatorium Davos/World Radiation Center (PMOD/WRC), Davos, Switzerland

We present an analysis of the ozone and other atmospheric parameters behavior under two scenarios of the future anthropogenic activity - moderate (SSP2-4.5) and severe (SSP5-8.5) in the polar regions from 2015 to 2099 simulated with the SOCOLv4 model. We consider such parameters as the total ozone content, temperature, zonal and meridional wind speed, content

of chlorine and bromine components. Also, the calculation of the residual meridional circulation was carried out, which makes it possible to diagnose the wave effect on the average flow, as well as the possibility of calculating the processes of transfer of gas species in the meridional plane.

The work was carried out at the Laboratory for Ozone Layer and upper atmosphere reserche of St. Petersburg State University (grant 075-15-2021-583) and in the Russian State Hydrometeorological University (project FSZU-2023-0002).

Сравнения оценок антропогенных эмиссий мегаполиса Санкт-Петербурга, полученных разными методами

Тимофеев Ю.М.¹, Неробелов Г.М.^{1,2} (akulishe95@mail.ru), Поберовский А.В.¹

¹Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

²Научно-исследовательский центр экологической безопасности РАН, Санкт-Петербург, Россия

Рост содержания парниковых газов в атмосфере Земли изменяет радиационный баланс планеты и приводит к изменениям климата. Антропогенные эмиссии такого парникового газа, как CO₂ с территорий больших городов имеют важное значение в климатических изменениях. Это связано с тем, что крупные города определяют до примерно 70% всех антропогенных эмиссий CO₂. Развиваются различные методы оценок эмиссий CO₂, которые основаны на прокси данных (потребление ископаемого топлива, расположение ТЭЦ, городская засветка и др.) и измерениях содержания CO₂ в атмосфере (наземные, спутниковые, самолетные и др.). Правительства многих стран приняли соглашения по уменьшению антропогенных эмиссий CO₂ и других парниковых газов. Поэтому важной задачей является контроль принятых обязательств, проводя независимый мониторинг антропогенных эмиссий парниковых газов, используя современные методы. Например, существует несколько действующих и запланированных программ по спутниковым наблюдениям, разработанных специально для мониторинга эмиссий парниковых газов с относительно высоким пространственным разрешением (несколько км). В дополнение к этому, активно изучаются и совершенствуются методики по оценке эмиссий парниковых газов на основе решения обратной задачи.

В последние несколько лет антропогенные эмиссии CO₂ российского крупного города Санкт-Петербурга оцениваются при помощи инвентаризационных баз данных и методов, основанных на измерениях содержания газа в атмосфере. В текущем исследовании сравниваются оценки антропогенных эмиссий CO₂ Санкт-Петербурга, полученные разными методами.

Наземные спектральные измерения на станции СПбГУ были выполнены на научном оборудовании ресурсного центра СПбГУ «Геомодель».

Anthropogenic CO₂ emissions of St. Petersburg megacity by different methods

Yu.M. Timofeyev¹, G.M. Nerobelov^{1,2} (akulishe95@mail.ru), A.V. Poberovskii¹

¹Saint Petersburg State University, Saint Petersburg, Russia

²Scientific Research Centre for Ecological Safety of the RAS, Saint Petersburg, Russia

Increase of greenhouse gases (GHGs) content in the Earth atmosphere changes the planet's radiation balance and causes climate changes. Anthropogenic emissions of such GHG as CO₂ from the territories of large cities play an important role in the climate changes since the cities contribute up to 70% to the total CO₂ anthropogenic emissions. Different methods of CO₂ emissions estimation have been developed which are based on proxy data (fossil fuel consumption, locations of power plants, nighttime lights, etc.) and observations of CO₂

atmospheric content (ground-based, satellite, aircraft, etc.). Lately authorities of many countries have made a commitment to reduce anthropogenic emissions of CO₂ and other GHGs. Therefore it is important to control undertaken agreements by carrying out independent monitoring of anthropogenic emissions using state-of-the art methods. For instance, there are several working and scheduled satellite observation programmes which were developed specifically to monitor GHGs emissions with relatively high spatial resolution (several km). In addition, today CO₂ emission estimation techniques based on inversion modelling are actively investigated and improved.

In the last years CO₂ anthropogenic emissions of Russian megacity St. Petersburg have been estimated by inventory and experimental methods. In the current study CO₂ anthropogenic emissions of St. Petersburg by different methods are compared and results of the comparison will be presented.

Ground-based spectroscopic measurements at SPbU station were carried out with scientific equipment of SPbU resource centre "Geomodel".

Валидация WRF-Chem моделирования переноса CO₂ в Санкт-Петербурге и Хельсинки

Неробелов Г.М.^{1,2}(akulishe95@mail.ru), Тимофеев Ю.М.¹, Смышляев С.П.³, Фока С.Ч.¹

¹Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

²Научно-исследовательский центр экологической безопасности РАН, Санкт-Петербург, Россия

³Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург, Россия

Увеличение содержания CO₂ в атмосфере, вызванное антропогенными эмиссиями с территорий больших городов (~70%), определяют необходимость тщательной оценки эмиссий. Современные экспериментальные методы оценки антропогенных эмиссий CO₂ основаны на решении обратной задачи с помощью высокоточных измерений содержания CO₂ и численных моделей переноса и состава атмосферы. Точность численных моделей существенно определяет погрешности оценок эмиссий. Цель текущего исследования заключается в адаптации численной модели прогноза погоды и состава тропосферы и нижней стратосферы WRF-Chem и валидации её возможностей описывать перенос CO₂ в российском мегаполисе Санкт-Петербурге и столице Финляндии г. Хельсинки.

Исследование показало, что модель WRF-Chem хорошо представляет сезонную и суточную вариацию содержания CO₂, вызванную выделением и поглощением растительности. Наблюдается высокая корреляция между содержанием CO₂ на основе данных моделирования и измерениями в приземном слое (коэффициент корреляции или КК ~0.73) и в атмосферном слое до высоты ~75 км (КК ~0.95). Погрешности моделирования общего содержания CO₂ (XCO₂) в Санкт-Петербурге по отношению к наземным измерениям прибором Bruker EM27/SUN составляют ~0.3% и вероятно связаны с ошибками в химических граничных условиях и атмосферном переносе.

Мы благодарим Juha Hatakka и Ivan Mammarella их Финского метеорологического института и Университета Хельсинки за предоставление измерений на территории Хельсинки.

Validation of WRF-Chem modelling of CO₂ transport in St Petersburg and Helsinki

G.M. Nerobelov^{1,2}(akulishe95@mail.ru), Yu.M. Timofeyev¹, S.P. Smyshlyayev³, S.Ch. Foka¹

¹Saint Petersburg State University, Saint Petersburg, Russia

²SPC RAS – Scientific Research Centre for Ecological Safety of the RAS, Saint Petersburg, Russia

³Saint Petersburg, Russian State Hydrometeorological University, Saint Petersburg, Russia

An increase of CO₂ content in the atmosphere, caused by anthropogenic emissions from the territories of large cities (~70%), determines the topicality of accurate emission estimation.

Advanced experiment-based methods of the CO₂ anthropogenic emission estimation are based on the solution of an inverse problem using highly-accurate measurements of CO₂ content and numerical models of atmospheric transport and chemistry. The accuracy of such models greatly determines errors of the emission estimations. The aim of the current study is to adapt numerical weather prediction and atmospheric chemistry model WRF-Chem and validate its capability to simulate atmospheric CO₂ over the Russian megacity of St. Petersburg.

The research has demonstrated that the WRF-Chem model simulates well seasonal and diurnal cycles of CO₂ content which are due to CO₂ emission and absorption by plants. Correlation between the modelled and measured CO₂ content time serieses is high both in a surface layer (correlation coefficient or CC is ~0.73) and in total atmospheric column up to ~75 km (XCO₂, CC is ~0.95). Error of XCO₂ modelling in relation to ground-based Bruker EM27/SUN measurements in St. Petersburg constitutes about 0.3% and probably is related to inaccuracies in chemical boundary conditions and atmospheric transport simulation during specific meteorological conditions (low wind speed and weak turbulent mixing).

We are grateful to Juha Hatakka and Ivan Mammarella from Finnish Meteorological Institute and University of Helsinki for providing observations on the territory of Helsinki.

Вклад различных реакций в поведение мезосферной фотохимической системы: анализ на основе трехмерного химико-транспортного моделирования

Беликович М.В. (belikovich@ipfran.ru), Чубаров А.Г., Куликов М.Ю., Фейгин А.М.

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук», Нижний Новгород, Россия

Регион мезосферы нижней термосферы представляет существенный научный интерес. Фундаментальные задачи данного региона связаны как с его малой изученностью, так и с рядом уникальных условий (низкие давления и температуры), представляющих существенные сложности для лабораторного моделирования. Практический интерес связан с поиском климатических предикторов. Так скорость изменения температуры мезопаузы за время наблюдений достигает до 0,5-1 К в год, в то время как тренд глобального потепления, наблюдаемый у поверхности Земли, составляет всего 1,5-2 К за период с 1850 по 2020 гг. В исследовании мезосферных процессов большое значение имеет фотохимия региона (в которой участвуют многочисленные малые газовые составляющие), поскольку ее вклад (например, в температуру мезопаузы) существенен.

Концентрация малых газовых составляющих определяется как фотохимическими процессами, описываемыми уравнениями химической кинетики, так и процессами переноса адвекцией и диффузией. Однако компоненту (со временем жизни значительно меньшим характерного времени переноса) с достаточно высокой точностью можно описать в рамках только фотохимии. Аппарат анализа динамических систем обширен и хорошо развит, поэтому анализ только фотохимии мезосферы приносит практическую пользу. Так мезосферные измерения ограничены в основном результатами дистанционного спутникового зондирования опосредованных характеристик, поэтому для определения концентрации интересующих компонент, часто используются фотохимические соотношения, которые, как правило, являются результатом нахождения части фотохимической системы в локальном равновесии.

Мезосферная фотохимическая система включает множество реакций, однако очевидно, не все они равнозначны. Поведение исходной системы можно приближенно описать эволюцией упрощенной системы с меньшим количеством реакций. Количество

реакций при этом будет определяться необходимой точностью описания. Упрощение системы можно также проводить путем замены динамического описания (посредством дифференциальных уравнений), алгебраическим, подразумевающим нахождение подсистем в состоянии локального фотохимического равновесия. В предыдущих работах была развита методика упрощения фотохимических систем (метод базовых динамических моделей), одним из элементов которой является количественное сравнение эволюций полной и упрощенной систем. Полученная в результате применения методики система легче поддается анализу, а иногда и вовсе интегрируема.

Одной из проблем мезосферных спутниковых измерений является недостаточная обоснованность используемых фотохимических соотношений, которые, как правило основаны на анализе сильно редуцированной фотохимической системы. К сожалению, метод базовых динамических моделей на данный момент не является общеупотребительным. Так, в ряде работ было показано, что предположение о равновесности ночного озона, используемое в процедуре определения атомарного кислорода по данным прибора SABER на спутнике Timed, может нарушаться, что ведет к значительным искажениям в средних распределениях атомарного кислорода на высотах близких к 80км.

Первоначальным шагом в методике является оценка вклада различных реакций в правую часть уравнений химической кинетики, определяющих поведение фотохимической системы. Это указывает на то, какие реакции вероятно значимы для рассмотрения. Стоит отметить, что данного шага недостаточно для построения редуцированной системы. В данной работе представлены оценки значимости реакций (в дневное и ночное время) для семейств нечетного кислорода и водорода, являющихся ключевыми для мезосферной фотохимии. Для этого используется трехмерная химико-транспортная модель. По результатам модели вычисляется зональное среднее (с учетом времени суток) от отношения члена правой части уравнений химической кинетики, отвечающих рассматриваемой реакции, к общей сумме всех источников/стоков.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-12-00064, <https://rscf.ru/project/22-12-00064/>.

The contribution of various reactions in mesospheric photochemical system: the analysis based on 3D chemical transport modeling

M.B. Belikovich (belikovich@ipfran.ru), A.G. Chubarov, M.Yu Kulikov, A.M. Feigin
A.V. Gaponov-Grekhov Institute of Applied Physics of the RAS, Nizhniy Novgorod, Russia

The mesosphere-lower thermosphere is the region of significant scientific interest. The fundamental problems of this region are associated both with its low level of knowledge and with a number of unique conditions (low pressures and temperatures), which are difficult to realize in laboratory conditions. Practical interest is associated with climate predictors. The rate of mesopause temperature change during the observation period reaches up to 0.5–1 K per year, while the global warming trend observed at the Earth's surface is only 1.5–2 K for the period from 1850 to 2020. In the study of mesospheric processes, the photochemistry of the region, which involves numerous small gas components, is of great importance, since its contribution (for example, to the mesopause temperature) is significant.

The concentration of small gas components is determined both by photochemical processes described by the equations of chemical kinetics and by transport processes: advection and diffusion. However, a component with a lifetime much shorter than the characteristic transfer time can be described with a sufficiently high accuracy only in terms of photochemistry. The apparatus for the analysis of dynamical systems is extensive and well

developed; therefore, the analysis of only the photochemistry of the mesosphere is of practical use. Since mesospheric measurements are limited mainly by the results of remote satellite sensing of indirect characteristics (like airglow), to determine the concentrations of the components of interest, photochemical ratios are often used, which, as a rule, are the result of a part of the photochemical system being in local equilibrium.

The mesospheric photochemical system includes many reactions, however, obviously, not all of them are equivalent. The behavior of the original system can be approximately described by the evolution of a simplified system with fewer reactions. The number of reactions in this case will be determined by the accuracy required in the description. Simplification of the system can also be carried out by replacing the dynamic description (by means of differential equations) with an algebraic one, implying that the subsystems are in a state of local photochemical equilibrium. In previous works, a technique for simplifying photochemical systems (the method of basic dynamic models) was developed, one of the elements of which is a quantitative comparison of the evolutions of the complete and simplified systems. The system obtained as a result of applying the technique is easier to analyze, and sometimes even completely integrable.

One of the problems of mesospheric satellite measurements is the insufficient validity of the used photochemical relationships, which are usually based on the analysis of a strongly reduced photochemical system. Unfortunately, the method of basic dynamic models is not currently in common use. In our papers we showed that the assumption of nighttime ozone equilibrium, used in the procedure for determining atomic oxygen from the data of the SABER instrument onboard the Timed satellite, can be invalid, which leads to significant distortions in the mean distributions of the observed atomic oxygen at altitudes close to 80 km.

The initial step in the technique is to estimate the contribution of various reactions to the right hand side of the equations of chemical kinetics that determine the behavior of the photochemical system. This indicates which responses are likely to be relevant to consider. It should be noted that this step is not enough to build a reduced system. This paper presents estimates of the significance of reactions (during the daytime and at night) for the families of odd oxygen and hydrogen, which are key for mesospheric photochemistry. For this, a three-dimensional chemical transport model is used. Based on the results of the model, the zonal averages (taking into account the time of day) are calculated from the ratio of the term on the right side of the chemical kinetics equations corresponding to the reaction under consideration to the total sum of all sources/sinks.

The study was supported by the Russian Science Foundation grant No. 22-12-00064, <https://rscf.ru/project/22-12-00064/>.

Постерная сессия

Влияние солнечной активности на озоноразрушающие газы и озон в сентябре 2017 г.

И.А. Миронова (i.a.mironova@spbu.ru), П.О. Пикулина, Н.В.Бобров, Г.Г.Доронин, М.Н. Мельник, Е.В. Розанов

Санкт-Петербургский государственный университет, Россия, Санкт-Петербург

В данной статье анализируется влияние солнечных вспышек и высыпаний энергичных частиц на озоноразрушающие компоненты нечетной группы водорода (НОх) и нечетного семейства азота (NOy), а также озон в сентябре 2017 г. Изменения в

озоноразрушающих газах и озон в средней атмосфере после солнечного воздействия были исследованы с использованием химико-климатической модели HAMMONIA.

Работа выполнена в СПбГУ «Лаборатория исследования озонового слоя и верхних слоев атмосферы» при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации по договору 075-15-2021-583.

Impact of solar activity on ozone-depleting gases and ozone in September 2017

I.A. Mironova (i.a.mironova@spbu.ru), P.O. Pikulina, N.V. Bobrov, G.G. Doronin, M.N. Melnik,
E.V. Rozanov

Saint Petersburg State University, Saint Petersburg, Russia

This paper analyzes the effect of solar flares and energetic particle precipitation on the ozone-depleting components of the odd hydrogen group (HO_x) and the odd nitrogen family (NO_y), as well as ozone in September 2017. The changes in ozone-depleting gases and ozone in the middle atmosphere after solar forcing were investigated using the HAMMONIA chemistry-climate model.

The work was performed in the SPbSU “Ozone Layer and Upper Atmosphere Research Laboratory” supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation under agreement 075-15-2021-583.

СЕКЦИЯ 6. РАДИАЦИОННАЯ КЛИМАТОЛОГИЯ и РАДИАЦИОННЫЕ АЛГОРИТМЫ в МОДЕЛЯХ ПРОГНОЗА ПОГОДЫ и КЛИМАТА

Председатель: д.ф.-м.н. **Покровский О.М.** (РГГУ, Санкт-Петербург, Россия)

Сопредседатели: к.ф.-м.н. **Фролькис В.А.** (ГГО им. А.И. Воейкова, Санкт-Петербург, Россия), к.ф.-м.н. **Спорышев П.В.** (ГГО им. А.И. Воейкова, Санкт-Петербург, Россия), д.г.н. **Чубарова Н.Е.** (МГУ, Москва, Россия)

SESSION 6. RADIATIVE CLIMATOLOGY and ALGORITHMS in MODELS for WEATHER and CLIMATE FORECASTING

Chairman: Dr. **O.M. Pokrovsky** (RSHU, Saint Petersburg, Russia)

Co-Chairmen: Dr. **V.A. Frolkis** (FGBI MGO, Saint Petersburg, Russia), Dr. **P.V. Sporyshev** (FGBI MGO, Saint Petersburg, Russia), Dr. **N.E. Chubarova** (MSU, Moscow, Russia)

Устные доклады

Моделирование потоков длинноволнового излучения и радиационного форсинга CO₂ в умеренных широтах с использованием различных спектроскопических баз данных и моделей континуального поглощения паров воды

Фирсов К.М.¹ (fkm@volsu.ru), Чеснокова Т.Ю.² (ches@iao.ru), Размоллов А.А.¹ (alek.razmolv2010@yandex.ru)

¹Волгоградский государственный университет, Волгоград, Россия

²Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, Томск, Россия

Проблемы климатических изменений часто связывают с возрастанием концентрации парниковых газов, которые поглощают излучение в длинноволновом диапазоне (λ более 3 мкм). В частности, атмосферная концентрация CO₂ за последние пятьдесят лет возросла от 330 до примерно 400 ppm. Мгновенный радиационный форсинг парниковых газов является способом оценки влияния возрастания концентрации парниковых газов на нагрев атмосферы и подстилающей поверхности. Форсинг CO₂ определяют как разность потоков длинноволнового излучения при различных концентрациях CO₂ в атмосфере Земли. В работе [1] были сделаны оценки радиационного форсинга от удвоения концентрации CO₂ (от 320 ppm до 640 ppm) и было показано, что на нижней границе атмосферы его величина составляет всего 0,55 Вт/м², что говорит о требуемой точности моделирования атмосферных радиационных процессов в климатических задачах.

Точность расчета радиационных характеристик зависит от качества спектроскопической информации. Спектроскопические базы данных по параметрам линий атмосферных газов и модели континуального поглощения периодически обновляются. Поэтому необходимо проводить оценки, насколько существенны эти обновления при решении задач переноса излучения в атмосфере Земли.

Сделаны оценки влияния континуального поглощения водяного пара в атмосфере на радиационный форсинг CO₂ при увеличении концентрации от 330 до 395 ppm на основе массовых расчетов потоков теплового излучения для летних месяцев 2021 г. в регионе Нижнего Поволжья. Было показано, что усиление парникового эффекта за счет увеличения концентрации CO₂ с ростом влажности будет приводить к еще большему нагреву атмосферы и меньшему нагреву поверхности. При этом неопределенности в

континуальном поглощении H₂O за счет использования разных моделей континуума приводят к изменениям величины радиационного форсинга CO₂ на нижней границе атмосферы, не превышающим 2% [2].

Проведены расчеты нисходящих и восходящих потоков ИК излучения для метеорологических условий, характерных для летних и зимних условий умеренных широт при использовании различных версий спектроскопических баз данных HITRAN [3] и GEISA [4]. Проанализированы расхождения в потоках излучения восходящих на верхней границе атмосферы и нисходящих на нижней границе атмосферы в спектральном диапазоне 0–3000 см⁻¹ при использовании различных баз данных, и показано, что различия в параметрах линий поглощения приводят к погрешностям, не превышающим 0,7 Вт/м² [5].

Работа выполнена в рамках государственного задания ИОА СО РАН.

1. Forster P., Ramaswamy V., Artaxo P., et al. Changes in Atmospheric Constituents and in Radiative Forcing. In: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, P.129-234.
2. K. M. Firsov, T. Yu. Chesnokova, and A. A. Razmolov Impact of Water Vapor Continuum Absorption on CO₂ Radiative Forcing in the Atmosphere in the Lower Volga Region// Atmospheric and Oceanic Optics. 2023. V. 36. N.2. P. 162–168
3. HITRAN URL= <https://www.cfa.harvard.edu/hitran/>
4. GEISA URL=<http://www.pole-ether.fr>
5. Т.Ю. Чеснокова, К.М. Фирсов Влияние обновления информации по параметрам линий поглощения атмосферных газов на результаты моделирования потоков теплового излучения в атмосфере// Оптика атмосферы и океана. 2023. Т.36. №5 (в печати)

Simulation of the fluxes of longwave radiation and CO₂ radiative forcing in mid latitudes with use of different spectroscopic databases and water vapor continuum absorption models

K.M. Firsov¹(fkf@volsu.ru), T. Yu. Chesnokova² (ches@iao.ru), A.A.

Razmolov¹(alek.razmolov2010@yandex.ru)

¹Volgograd State University, Volgograd, Russia

²V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics SB RAS, Tomsk, Russia

The problems of climate change are often connected with an increase in concentration of greenhouse gases which absorb the radiation in the longwave region ($\lambda > 3 \mu\text{m}$). In particular, the CO₂ atmospheric concentration has increased from 330 to about 400 ppm for the last 50 years. The instantaneous radiative forcing of greenhouse gases is the way to estimate the effect of an increase in the greenhouse gases concentration on heating of the atmosphere and underlying surface. The instantaneous CO₂ radiative forcing is defined as the difference between longwave radiative fluxes at different CO₂ concentrations in the Earth's atmosphere. In the work [1], the radiative forcing due to the CO₂ concentration doubling (from 320 to 640 ppm) was estimated, and it was shown that their value was only 0.55 W/m² that points to the required accuracy of the atmospheric radiative processes simulation in climate applications.

The accuracy of the radiative characteristics calculation depends on quality of spectroscopic information. The spectroscopic databases on absorption lines parameters of atmospheric gases and continual absorption models are regularly updated. Therefore, it is necessary to estimate the impact of this updating on solving of the problem of radiative transfer in the Earth's atmosphere.

The impact of water vapor continuum absorption in the atmosphere on CO₂ radiative forcing is estimated on the basis of mass calculations of thermal radiative fluxes for summer conditions of 2021 in the Lower Volga Region. It is shown that the enhancement of the greenhouse effect due to an increase in the CO₂ concentration with humidity growth will lead to more stronger heating of the atmosphere and lesser heating of the surface. At that, the uncertainties in the H₂O continual absorption due to use

of different continuum models cause the change up to 2% in the CO₂ radiative forcing at the atmosphere bottom [2].

The downward and upward fluxes of longwave radiation for meteorological conditions, typical for summer and winter of mid latitudes, are calculated with use of different versions of the HITRAN[3] and GEISA[4] spectroscopic databases. The discrepancies in the upward fluxes at the atmosphere top and downward fluxes at the Earth surface due to use of different spectroscopic databases are analysed in 0-3000 cm⁻¹ spectral region. It is shown that the difference in absorption line parameters leads to an error up to 0.7 W/m²[5].

1. Forster P., Ramaswamy V., Artaxo P., et al. Changes in Atmospheric Constituents and in Radiative Forcing. In: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, P.129-234.

2. K. M. Firsov, T. Yu. Chesnokova, and A. A. Razmolov Impact of Water Vapor Continuum Absorption on CO₂ Radiative Forcing in the Atmosphere in the Lower Volga Region// Atmospheric and Oceanic Optics. 2023. V. 36. N.2. P. 162–168

3. HITRAN URL= <https://www.cfa.harvard.edu/hitran/>

4. GEISA URL=<http://www.pole-ether.fr>

5. Т.Ю. Чеснокова, К.М. Фирсов Влияние обновления информации по параметрам линий поглощения атмосферных газов на результаты моделирования потоков теплового излучения в атмосфере//Оптика атмосферы и океана. 2023. Т.36. №5 (в печати)

Моделирование антропогенного потока тепла и острова тепла в мегаполисах России

Фролькис В.А.^{1,2}(vfrolkis@gmail.com), Евсиков И.А.³, Мовсесова Л.В.³, Мотылев А.Д.²

¹ Главная геофизическая обсерватория им. А.И. Воейкова, Санкт-Петербург, Россия

² Санкт-Петербургский государственный экономический университет, Санкт-Петербург, Россия

³ Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, Санкт-Петербург, Россия

Выделяемая в атмосферу часть энергии, потребляемой зданиями, отнесенная к единице площади подстилающей поверхности, называется антропогенным потоком тепла (АПТ). АПТ появляется в результате отопления и вентиляции зданий и приводит к появлению городского острова тепла, обеспечивающего значительное увеличение температуры в городском покрывающем слое в течение отопительного периода. Для оценки АПТ, как правило, используются три основных подхода: 1) прямые измерения тепловых потоков; 2) инвентаризацию, которая заключается в суммировании всех потребителей энергии; 3) дистанционные спутниковые измерения. Предлагается альтернативный подход инвентаризации, в рамках которого моделируется АПТ на основе геометрической 2D или 3D модели города, строительных норм, теплофизических свойств ограждающих конструкций и температуры наружного воздуха.

Для построения модели города используется веб-картографическая платформа «OpenStreetMap», информация с сайта «Яндекс.Карты» и технико-экономические паспорта многоквартирных домов, имеющиеся в Интернете. На базе геометрической модели городских зданий с разрешением 30×30 м² и данных из СП 131.13330.2020 (Строительная климатология), СП 50.13330.2012 (Тепловая защита зданий) и ГОСТ 30494-2011 (Здания жилые и общественные. Параметры микроклимата в помещениях) производится оценка АПТ.

Рассматриваются два алгоритма расчета АПТ. Первый строится на понятиях «Градусо-сутки отопительного периода» и «Нормативное сопротивление теплопередаче ограждающих конструкций» [1], а второй использует «Нормируемую (базовую) удельную характеристику расхода тепловой энергии на отопление и вентиляцию здания» [2]. Даны

оценки для границ административной и урбанизированной территорий, под последней понимается территория с застройкой выше 6 м.

В Санкт-Петербурге средняя плотность АПТ для урбанизированной территории при разности между температурой внутреннего и наружного воздуха $\Delta T = 1^\circ\text{C}$ по первому алгоритму составляет 0.96 Вт/м^2 , а по второму 2.19 Вт/м^2 , при этом полный АПТ оценивается соответственно в 155.09 и 352.71 ($10^6 \text{ Вт/}^\circ\text{C}$). Для урбанизированных территорий Москвы, Новосибирска, Екатеринбурга, Краснодара и Томска при $\Delta T = 1^\circ\text{C}$ по второму алгоритму средняя плотность АПТ равна 2.19, 1.81, 1.86, 2.11 и 1.61 Вт/м^2 , при этом полный АПТ составляет 612.25, 101.81, 103.88, 67.511 и $33.036 (10^6 \text{ Вт/}^\circ\text{C})$.

Городской остров тепла оценивается при помощи модели нестационарного горизонтально-однородного пограничного слоя атмосферы, в которой для замыкания уравнений турбулентного пограничного слоя используются уравнение баланса и соотношение для масштаба турбулентной энергии ($b-l$ модель) [3]. Например, для Санкт-Петербурга АПТ приводит к увеличению температуры в декабре в зависимости от температурной стратификации от 3°C до 8.2°C при среднесуточной температуре воздуха в диапазоне $[-20^\circ\text{C}, -10^\circ\text{C}]$, от 2°C до 3°C при среднесуточной температуре 0°C .

1. Гинзбург А.С., Евсиков И.А., Фролькис В.А. Зависимость антропогенного потока тепла от температуры воздуха (на примере Санкт-Петербурга) // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2021. Т. 57. № 5. С. 526-538.

2. Фролькис В.А. Евсиков И.А. Расчет антропогенного потока тепла за период отопительного сезона в мегаполисе (на примере Санкт-Петербурга) // ENVIROMIS 2022. С. 395-398.

3. Вагер Б.Г., Фролькис В.А., Мовсесова Л.В. Оценка влияния радиационного притока тепла на вертикальную структуру пограничного слоя атмосферы // Вестник гражданских инженеров. 2005. № 3(4). С. 109-112.

Modeling of Anthropogenic Heat Flux and Heat Islands in Russian Megacities

V.A. Frolkis^{1,2}(vfrolkis@gmail.com), I.A. Evsikov³, L.V. Movsesova³, A.D. Motylev²

¹Voeikov Main Geophysical Observatory, Saint Petersburg, Russia

²Saint-Petersburg State University of Economics, Saint Petersburg, Russia

³Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, Saint Petersburg, Russia

The part of the energy consumed by buildings released into the atmosphere, per unit area of the underlying surface, is called the anthropogenic heat flux (AHF). AHF appears as a result of heating and ventilation of buildings and leads to the appearance of an urban heat island, which provides a significant increase in temperature in the urban canopy layer during the heating season. As a rule, three main approaches are used to evaluate AHF: 1) direct measurements of heat fluxes; 2) inventory, which consists in summing up all energy consumers; 3) remote satellite measurements. An alternative inventory approach is proposed, in which AHF is modeled based on a geometric 2D or 3D model of the city, building codes, thermophysical properties of enclosing structures and outdoor air temperature.

To construct a model of the city, the "OpenStreetMap" web mapping platform, information from the "Yandex.Maps" website and technical and economic passports of apartment buildings available on the Internet are used. Based on a geometric model of urban buildings with a resolution of $30 \times 30 \text{ m}^2$ and data from SP 131.13330.2020 (Construction climatology), SP 50.13330.2012 (Thermal protection of buildings) and GOST 30494-2011 (Residential and public buildings. Indoor microclimate parameters) the AHF is evaluated.

Two algorithms for calculating APT are considered. The first is based on the concept of the heating season degree-day index and "Normalized (basic) specific characteristic of thermal energy consumption for heating and ventilation of the building" [2]. Estimates are given for the boundaries of administrative and urbanized territories, the latter being understood as a territory with buildings above 6 m.

In St. Petersburg, the average AHF density for an urbanized area with a difference between indoor and outdoor air temperature $\Delta T = 1^\circ\text{C}$ according to the first algorithm is 0.96 W/m^2 , and according to the second algorithm is 2.19 W/m^2 , while the total AHF is estimated at 155.09 and 352.71 ($10^6 \text{ W/}^\circ\text{C}$) respectively. For the urbanized territories of Moscow, Novosibirsk, Yekaterinburg, Krasnodar, and Tomsk at $\Delta T = 1^\circ\text{C}$, according to the second algorithm, the average density of the AHF is 2.19, 1.81, 1.86, 2.11, and 1.61 W/m^2 , while the total APT is 612.25, 101.81, 103.88, 67.511 and 33.036 ($10^6 \text{ W/}^\circ\text{C}$).

The urban heat island is estimated using a model of the non-stationary horizontally homogeneous boundary layer of the atmosphere, in which the balance equation and the relation for the scale of turbulent energy ($b-l$ model) are used to close the equations of the turbulent boundary layer ($b-l$ model) [3]. For example, for St. Petersburg, AHF leads to an increase in temperature in December, depending on the temperature stratification from 3°C to 8.2°C at an average daily air temperature in the range $[-20^\circ\text{C}, -10^\circ\text{C}]$, from 2°C to 3°C at an average daily temperature of 0°C .

1. A. S. Ginzburg, I. A. Evsikov and V. A. Frol'kis. Dependence of the Anthropogenic Heat Flux on Air Temperature (Using St. Petersburg as an Example) // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2021, Vol. 57, No. 5, pp. 461–471.

2. Victor Frolkis and Igor Evsikov Calculation of the anthropogenic heat flux during the heating season in a metropolis (on the example of St. Petersburg) // *ENVIROMIS 2022*. P. 395-398.

3. Vager B.G., Frolkis V.A., Movsesova L.V. The Influence of Radiation Processes on Vertical Structure of the Atmospheric Boundary Layer // *Bulletin of Civil Engineers*. 2005. № 3(4). P. 109-112.

Энтропийный анализ среднесуточных температур воздуха по данным метеостанций России

Фролькис В.А.^{1,2}(vfrolkis@gmail.com), Осипов А.Н.²

¹ Главная геофизическая обсерватория им. А.И. Воейкова, Санкт-Петербург, Россия

² Санкт-Петербургский государственный экономический университет, Санкт-Петербург, Россия

Климатическая система является сложной нестационарной открытой термодинамической системой с многочисленными нелинейными обратными связями, которые генерируют флуктуации ее параметров. Высокий уровень шума мешает оценить тренд изменения метеорологических параметров, заметить тонкие изменения в климатической системе, а это совокупности с нестационарностью, стохастичностью и негладкостью метеорологических полей затрудняет использование традиционных методов анализа и стимулирует поиск других подходов. Один из сравнительно новых способов изучения изменения состояния климатической системы состоит в использовании энтропийного анализа, в основе которого лежит понятие выборочной энтропии, например, температурных временных рядов.

Метеорологические данные могут рассматриваться как произвольная выборка из некоторого стохастического процесса, причем сама вариация может быть не гладкой. Процедура измерений дополнительно вносит в данные разрывы, связанные с ошибками измерений. Именно это обстоятельство делает успешным применение энтропийного анализа нестационарных временных метеорологических рядов, так как такой анализ не чувствителен к негладкости данных и пропускам в них. Энтропийный подход позволяет оценить хаотическую составляющую температурных рядов, а, следовательно, и климатической системы. Это связано с тем, что при изменении состояния системы меняется распределение ее параметров, что приводит к изменению значения энтропии, которую можно рассматривать как функцию состояния сложной системы (Ю. Климантович). Для этой цели рассматриваются первая (на амплитудном покрытии) и вторая (на временном покрытии) информационные энтропии Шеннона и

перестановочная энтропия третьего–шестого порядка, а также дисперсия и показатель Херста, рассчитанный на основе R/S анализа.

Первая выборочная информационная энтропия Шеннона оценивает вариабельность процесса, т.е. отклонения распределения значений временного ряда от равномерного, она уменьшается при снижении уровня вариабельности стохастической составляющей системы, а также позволяет понять существует ли некий «агрегированный фактор», влияющий на изменение исследуемого сигнала (состояния системы). Однако первая энтропия Шеннона слабо чувствительна к выбросам, поэтому для их учета можно использовать вторую выборочную энтропию. Вторая выборочная информационная энтропия Шеннона позволяет определить стабильность происходящих в системе процессов, она может рассматриваться в качестве индекса, показывающего наличие в системе импульсов. Близкие к максимальным значения второй энтропии соответствуют более стабильному состоянию системы, и наоборот, ее малые значения показывают на менее стабильное, взрывоопасное поведение протекающих в системе процессов. Следовательно, уменьшение значений второй энтропии указывает на тенденцию к возможным резким изменениям значений параметров системы, на повышения уровня хаотизации. Изменение показателя Херста указывает на изменение предсказуемости.

Проведен анализ среднесуточных температурных рядов, полученных на метеостанциях Российской Федерации и приведенный в архиве ВНИИГМИ–МЦД, за периоды 1961-1990 и 1991-2020 гг. Сравнение между собой двух этих периодов, а также сравнение поведения температурных рядов в различных климатических зонах позволяет диагностировать изменения, происходящие в климатической системе. Показано, что на ряде метеорологических станций в последние десятилетия увеличивается хаос, или, по крайней мере, растет уровень зашумленности в климатической системе.

Различные климатические зоны характеризуются разными значениями усредненной энтропии независимо от способа ее вычисления. Значения 1-й и 2-й энтропии, а также дисперсия среднесуточной температуры в северных климатических зонах больше, чем в умеренных и южных. Перестановочная энтропия максимальна в Приморском крае. За тридцатилетие 1990-2020 гг, 2-я энтропия уменьшается, до 2% в северных климатических зонах по сравнению с периодом 1961-1990 гг. Изменения средних значений 1-й и 2-й энтропии более выражены при сравнении последних 10 лет в для каждого тридцатилетия. Значения показателя Хёрста за период 60 лет для среднесуточной температуры лежат в диапазоне 0,6 – 0,66, а при удалении годового сезонного хода находятся в интервале 0,68 – 0,74.

Entropy Analysis of Average Daily Air Temperature Data from Weather Stations Located in Russia

V. Frolkis^{1, 2}(vfrolkis@gmail.com), A.N. Osipov²

¹*Voeikov Main Geophysical Observatory, Saint Petersburg, Russia*

²*Saint-Petersburg State University of Economics, Saint Petersburg, Russia*

The climate system is a complex non-stationary open thermodynamic system with numerous non-linear feedbacks generating fluctuations in its parameters. High level of noise makes it hard to assess the trend of changes in weather parameters and to trace subtle changes in the climate system, whereas non-stationarity, stochasticity and non-smoothness of climate data makes traditional methods of analysis difficult and stimulates the search for new approaches. One of the relatively new ways of studying changes in the state of the climate

system is entropy analysis (which is based on the concept of selective entropy) of temperature time series.

Weather data may be considered as random sample from a stochastic process, and its variation doesn't have to be smooth. The measurement procedure additionally creates missing data, related to measurement errors. This circumstance makes it appropriate to use entropy analysis of non-stationary weather time series, because such analysis is not sensitive to non-smoothness and missing data. Entropy-based approach allows to measure the chaotic component of temperature time series and, by extension, of the climate system itself. It is related to the fact that when the state of a system changes, so does the distribution of parameters of that system. It leads to variations in entropy, which may be considered a function of the state of a complex system (Klimontovich Y.). First and second selective entropies (by Shannon), permutation entropy (of orders 3 to 6), variance and Hurst exponent, calculated using R/S analysis, have been considered for use in such analysis.

First selective entropy assesses the variability of a process, i.e., deviations in the distribution of times series values from uniform distribution. Its value decreases with decrease in the variability of the stochastic component of the system. Its use allows to understand whether there is a certain "aggregated factor" affecting changes in the studied signal (the state of the system). However first selective entropy is weakly sensitive to outliers, which may be better traced using second selective entropy. Second selective entropy is used to measure the stability of processes occurring in a system, as it may be considered to be an index, measuring the presence of pulses in a system. Close to maximum values of second selective entropy correspond to a more stable state of a system, whereas its lower values point to less stable, explosive behaviors of studied processes. Therefore, decrease in the values of second selective entropy point to higher probability of sharp changes of system parameters, to increase level of chaotization. Changes in Hurst exponent values point to changes in the predictability of a system.

Time series containing average daily temperature data from hundreds of weather stations from different parts of Russian Federation (retrieved from RIHMI-WDC archive) have been analyzed. Two time periods have been studied: 1961-1990 and 1991-2020. Comparing these two periods to each other and comparing different climatic zones has allowed to diagnose and analyze changes occurring in the climatic system. It's been showed that the level of observed chaos has risen in recent decades on a number of weather stations.

Different climatic zones have different average entropy values, regardless of methods of calculating the entropy used. The values of first and second selective entropies, as well as of the variance of average daily temperatures, are higher in northern climatic zones when compared with temperate and southern zones. Permutation entropy is the highest in Primorsky Krai. Second selective entropy value is lower in 1991-2020 period in comparison with 1961-1990 period, up to 2% in northern zones. Changes in first and second selective entropy values are more pronounced when last decades of the two periods are compared. The values of Hurst exponent calculated using average daily temperature data from full 60 years lie mostly in the range 0.6 – 0.66. If the yearly seasonal component is removed from the data, then the values of Hurst exponent lie in the range 0.68 – 0.74.

Анализ влияния колебаний солнечной активности на изменение глобального климата в масштабах столетий

Покровский О.М. (pokrov_06@mail.ru)

Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург, Россия

Во многих работах последних десятилетий (см. обзоры Gray и др. а также Wilson) показано, что климатическая система может частично модулировать астрономические силы гравитационного, электромагнитного и солнечного происхождения. В них обсуждается возможная цепочка физических причин, объясняющих эту когерентность. За последние несколько лет в ряде исследований астрофизиков на основе анализа данных было высказано предположение, что планетарные гармоника гравитационного поля внутри солнечной системы независимым образом регулируют колебания солнечной активности (см. например, Scafetta и др.). Кроме того, климат Земли, по-видимому, представляет собой сигнатуру множества астрономических гармоник. Scafetta и др. (2010) показал, что тщательный и улучшенный анализ имеющихся данных действительно поддерживает планетарную теорию солнечных и климатических вариаций. В ряде работ астрофизиков (см. например Travalgini, 2012, Edmonds, 2020) были выявлены следующие частоты квазипериодических колебаний солнечной активности: примерно, через 61, 86, 103, 115, 130, 150 и 178 лет. Эта полоса частот генерирует известные большие солнечные минимумы Маундера, Дальтона, и подобные им малые минимумы в недавнем прошлом. Основная проблема, с которой столкнулись астрофизики было то, что они использовали классический метод Фурье спектрального анализа рядов в то время, когда длина доступного климатического ряда глобальной температуры атмосферного воздуха меньше ширины «окон», предназначенных для анализа колебаний солнечной активности и определяющих ее изменений планетарного гравитационного поля. Поэтому получаемые оценки оказываются статистически незначимыми. Недавние работы автора (Покровский О.М., Покровский И.О., 2019, 2020, 2022), в которых использовались современные математические методы вейвлет и кросс-вейвлет анализа, удалось преодолеть этот недостаток и получить целый ряд статистически состоятельных оценок связи колебаний солнечной активности и основных климато-образующих факторов на Земле в масштабах столетий.

Analysis of the influence of solar activity oscillations on century-scale global climate change

O.M. Pokrovsky(pokrov_06@mail.ru)

Russian State Hydrometeorological University, Saint-Petersburg, Russia

Many works of recent decades (see reviews by Gray et al. and Wilson) have shown that the climate system can partially modulate astronomical forces of gravitational, electromagnetic, and solar origin. They discuss a possible chain of physical causes explaining this coherence. Over the past few years, a number of studies by astrophysicists based on data analysis have suggested that planetary harmonics of the gravitational field within the solar system independently regulate fluctuations in solar activity (see, for example, Scafetta et al.). In addition, the Earth's climate appears to be the signature of many astronomical harmonics. Scafetta et al. (2010) have shown that a thorough and improved analysis of the available data does indeed support a planetary theory of solar and climate variations. In a number of works by astrophysicists (see, for example, Travalgini, 2012, Edmonds, 2020), the following frequencies of quasi-periodic fluctuations in solar activity were revealed: after about 61, 86, 103, 115, 130, 150, and 178 years. This frequency band generates the known large solar minima of Maunder, Dalton, and similar small minima in the recent past. The main problem faced by astrophysicists was that they used the classical Fourier method of spectral analysis of series at a time when the length of the available climate series of global atmospheric air temperature is less than the width of the "windows" designed to analyze fluctuations in solar activity and the changes in planetary gravitational force that determine it. fields. Therefore, the estimates obtained are

statistically insignificant. The recent works of the author (Pokrovsky O.M., Pokrovsky I.O., 2019, 2020, 2022), which used modern mathematical methods of wavelet and cross-wavelet analysis, managed to overcome this shortcoming and obtain a number of statistically consistent estimates of the relationship between solar oscillations activity and the main climate-forming factors on Earth on a scale of centuries.

Верификация радиационных алгоритмов в моделях прогноза погоды на примере модели прогноза погоды ICON

Шатунова М.В.¹ (shatunova@mecom.ru), Чубарова Н.Е.^{2,1} (chubarova@geogr.msu.ru),
Шувалова Ю.О.¹, Кирсанов А.А.¹, Бундель А.Ю.¹, Тарасова М.А.^{2,1}, Ривин Г.С.^{1,2}

¹Гидрометеорологический научно-исследовательский центр РФ, Москва, Россия

²Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

В современном мире прогноз погоды является продуктом многокомпонентной системы, объединяющей подготовку данных, численную модель среды и последующую обработку модельных результатов. Неточности в описании физических процессов в численной модели, переход ошибок от одного процесса к другому, наличие компенсационных ошибок затрудняют интерпретацию результатов моделирования и оценку качества прогноза.

Неопределенность также обуславливают параметры, определяемые вне численной модели. Степень влияния на результаты моделирования начальных и граничных условий, данных о внешних параметрах, часто принимаемых постоянными в процессе интегрирования модели, определяется их точностью и пространственно-временным разрешением.

При верификации численной модели используются разнородные данные наблюдений от точечных (станционных) до пространственных – радиолокационных и спутниковых. Модельные результаты, главным образом, представлены на вычислительной сетке, пространственный шаг которой варьирует от нескольких сотен метров до нескольких километров. Соотношение масштаба прогнозируемого явления и масштаба наблюдений следует учитывать при верификации.

С учетом вышесказанного, оценка радиационного алгоритма в численной модели атмосферы должна строиться на основе, во-первых, одновременной верификации влияющих характеристик, например, потоков излучения и макро- и микрофизических характеристик облачности; во-вторых, с использованием условной верификации; и, в-третьих, с использованием пространственных методов, особенно, если речь идет об оценке радиационных характеристик в условиях несплошной облачности.

На примере модели атмосферы ICON-Ru мы рассматриваем подходы к верификации радиационного блока модели с учетом взаимосвязей с другими составляющими прогностической системы.

Работа выполнена в рамках Научно-исследовательской Работы Росгидромета АААА-А20-120021490079-3. Анализ облачно-аэрозольных связей проведен при поддержке Министерства образования и науки РФ, мегагрант № 075-15-2021-574 в рамках научно-образовательной школы МГУ «Будущее планеты и глобальные изменения окружающей среды».

Approaches to Verifying the Radiation Transfer Scheme in the ICON NWP model

M.V. Shatunova¹ (shatunova@mecom.ru), N.Ye. Chubarova^{2,1} (chubarova@geogr.msu.ru), Yu.O. Shuvalova¹, A.A. Kirsanov¹, A.Yu. Bundel¹, M.A. Tarasova^{2,1}, G.S. Rivin^{1,2}

¹Hydrometeorological Research Center of Russia, Moscow, Russia

At present, weather forecast is a product of a complex system that integrates data preparation, NWP model and processing of model results. Inaccuracies in the description of physical processes in the numerical model, the transition of errors from one process to another, the presence of compensation errors make it difficult to interpret the simulation results and assess the forecast quality.

Parameters determined outside the numerical model also increase uncertainty. An accuracy and spatiotemporal resolution determine the degree of influence of the initial and boundary conditions and of external parameters that are often taken constant in simulation.

In situ observations at meteorological stations as well as 2D or 3D data from radar and satellites are commonly used for verification purpose. Model output are usually presented on computational grid the spatial step of which varies from several hundred meters to several kilometers. Therefore, we should also take into account the ratio of the scales of predicted phenomena, when verifying a numerical model.

In light of the above, we should evaluate radiation transfer scheme of NWP model based on together verification of influencing characteristics, e.g. to assess radiation fluxes along with cloud macro- and microphysical parameters; using conditional verification and spatial methods especially when it comes to assessing the radiation characteristics in partly cloudy conditions.

We consider approaches to verifying the radiation scheme of the ICON-Ru model taking into account the relationship with other components of the forecasting system.

Researches were funded by the Research Work of Roshydromet AAAA-A20-120021490079-3. The analysis of aerosol-cloud interactions was funded by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation, megagrant No. 075-15-2021-574 within the framework of the scientific and educational school of Moscow State University "The Future of the Planet and Global Environmental Changes".

Применение измерений сети Cloudnet и спутниковых данных для анализа макрофизических и оптических характеристик облачности модели ICON-Ru

Шувалова Ю.О.¹(shuvalova@mecom.ru), Чубарова Н.Е.^{2,1}(chubarova@geogr.msu.ru),
Шатунова М.В.¹, Ривин Г.С.^{1,2}

¹*Гидрометеорологический научно-исследовательский центр РФ, Москва, Россия*

²*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия*

Верификация микро-, макрофизических и оптических характеристик облачности в гидродинамических моделях прогноза погоды до сих пор остается одной из наиболее сложных задач. В связи с возникновением данных регулярных измерений облачных характеристик в рамках крупных международных проектов появилась возможность тестирования облачных параметризаций и непрямых аэрозольных эффектов [1].

В данной работе показано применение наземных и спутниковых облачных наблюдений для оценки физических характеристик облаков в моделях численного прогноза погоды. Мы обращаем внимание на сложности, связанные с подобным анализом: инструментальные и методические ограничения [2], недостатки измерительных сетей, проблемы сопоставления разнородных данных наблюдений. В исследовании приведены оценки облачно-аэрозольных связей и их влияния на характеристики облачности по данным ICON-Ru и измерений.

Анализ облачных характеристик проводился по результатам численных экспериментов с ICON-Ru с шагом сетки 1.1 км. Была использована двухмоментная микрофизическая схема с параметризациями нуклеации облачных капель по схеме Сигала-Хаина [3] и нуклеации кристаллов согласно [4, 5]. Для анализа сеточных данных

была применена система верификации MET (Model Evaluation Tools).

Верификация физических характеристик облачности модели ICON-Ru выполнена в рамках Научно-исследовательской Работы Росгидромета АААА-А20-120021490079-3. Анализ облачно-аэрозольных связей проведен при поддержке Правительства Российской Федерации (грант № 075-15-2021-574).

1. Illingworth A.J. et.al. Cloudnet -Continuous Evaluation of Cloud Profiles in Seven Operational Models Using Ground-Based Observations, Bull. Amer. Met. Soc., 88, 883-898, 2007.
2. Roebeling R.A., Deneke H.M., Feijt A.J. Validation of cloud liquid water path retrievals from SWVIRI using one year of CloudNET observations //J. Appl. Meteorol. And Climatol. – 2007. – Vol. 47. – №. 1. – P. 206-222.
3. Segal Y., Khain A. Dependence of droplet concentration on aerosol conditions in different cloud types: Application to droplet concentration parameterization of aerosol conditions // J. Geophys. Res. 2006. V. 111, N D15204.
4. Kärcher B., Hendricks J., Lohmann U. Physically based parameterization of cirrus cloud formation for use in global atmospheric models //Journal of Geophysical Research: Atmospheres. – 2006. – Vol. 111. – №. D1.
5. Hande L.B., Hoose C., Barthlott C. Aerosol- and droplet-dependent contact freezing: parametrization development and case study //Journal of the Atmospheric Sciences. – 2017. – Vol.74. – №. 7. – P.2229-2245.

Application of Cloudnet observations and satellite data to analyze macrophysical and optical cloud characteristics of the ICON-Ru model

Yu.O. Shuvalova¹ (shuvalova@mecom.ru), N.Ye. Chubarova^{2,1} (chubarova@geogr.msu.ru), M.V. Shatunova¹, G.S. Rivin^{1,2}

¹*Hydrometeorological Research Center of Russia, Moscow, Russia*

²*M.V. Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia*

Verification of micro-, macrophysical and optical cloud characteristics in weather prediction models still remains one of the most difficult tasks. It became possible to test cloud parametrizations and indirect aerosol effects due to the formation of Cloudnet network with regular cloud observations [1].

The application of ground-based and satellite cloud observations to assess the physical characteristics of clouds in numerical weather prediction model ICON-Ru is shown here. We notice the difficulties of such an analysis: instrumental and methodological limitations [2], disadvantages of measuring networks, comparison problems of heterogeneous observational data. The research provides the assessment of aerosol-cloud interaction and its impact on cloud characteristics according to ICON-Ru results and measurements.

The analysis of cloud characteristics was carried out based on the results of numerical experiments with ICON-Ru with a grid spacing of 1.1 km. A two-moment microphysics with parametrizations of cloud droplet nucleation according to the Segal-Khain scheme [3] and ice nucleation according to [4, 5] was used. The MET (Model Evaluation Tools) verification system was used to analyze the grid data.

Verification of the cloud physical characteristics in the ICON-Ru model was funded by the Research Work of Roshydromet АААА-А20-120021490079-3. The analysis of aerosol-cloud interactions was funded by the Government of Russia (grant number 075-15-2021-574).

1. Illingworth A.J. et.al. Cloudnet -Continuous Evaluation of Cloud Profiles in Seven Operational Models Using Ground-Based Observations, Bull. Amer. Met. Soc., 88, 883-898, 2007.
2. Roebeling R.A., Deneke H.M., Feijt A.J. Validation of cloud liquid water path retrievals from SWVIRI using one year of CloudNET observations //J. Appl. Meteorol. And Climatol. – 2007. – Vol. 47. – №. 1. – P. 206-222.
3. Segal Y., Khain A. Dependence of droplet concentration on aerosol conditions in different cloud types: Application to droplet concentration parameterization of aerosol conditions // J. Geophys. Res. 2006. V. 111, N D15204.
4. Kärcher B., Hendricks J., Lohmann U. Physically based parameterization of cirrus cloud formation for use in global atmospheric models //Journal of Geophysical Research: Atmospheres. – 2006. – Vol. 111. – №. D1.
5. Hande L.B., Hoose C., Barthlott C. Aerosol- and droplet-dependent contact freezing: parametrization development and case study //Journal of the Atmospheric Sciences. – 2017. – Vol.74. – №. 7. – P.2229-2245.

Краткосрочный прогноз облачных характеристик и радиационных потоков модели ICON-Ru с радиационной схемой ecRad

Шувалова Ю.О.¹(shuvalova@mecom.ru), Чубарова Н.Е.^{2,1}(chubarova@geogr.msu.ru),
Шатунова М.В.¹, Кирсанов А.А.¹, Бундель А.Ю.¹, Тарасова М.А.^{2,1}, Ривин Г.С.^{1,2}

¹Гидрометеорологический научно-исследовательский центр РФ, Москва, Россия

²Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

Двухпоточные схемы радиационного переноса получили большое распространение в 70х годах прошлого столетия [1]. Сегодня уменьшение шага сетки моделей численного прогноза погоды и климата остро ставит вопрос шкалы радиационного сглаживания [2]. В то же время описание трехмерных радиационных процессов пока не представляется возможным в оперативной практике, поэтому большое распространение получили схемы, способные описать трехмерные радиационные эффекты неявно.

В данной работе представлено исследование схемы радиационного переноса ecRad модели численного прогноза погоды ICON-Ru (ICOsahedral Nonhydrostatic) [3,4]. Мы провели сравнительный анализ метода радиационного переноса McICA схемы ecRad, а также протестировали схемы оптических свойств кристаллической и жидкокапельной облачности. Численные эксперименты ICON-Ru проведены для домена с шагом сетки 1,1 км с использованием двухмоментной микрофизической схемы [5] для тёплого (бесснежного) периода 2021 года. Для анализа результатов численных экспериментов с ICON-Ru были привлечены данные наземных измерений характеристик облачности сети Cloudnet (<https://cloudnet.fmi.fi>), спутниковые измерения MODIS и CERES (<https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov>, <https://search.earthdata.nasa.gov>), измерения радиационных потоков сети BSRN (<https://bsrn.awi.de>) и стандартные гидрометеорологические наблюдения. В исследовании показаны эффекты облачно-радиационного взаимодействия системы ICON-Ru-ecRad и их влияние на радиационные потоки у земной поверхности, а также стандартные гидрометеорологические характеристики (температуру воздуха, атмосферное давление, скорость ветра и осадки).

Внедрение и исследование совместной системы ICON-Ru-ecRad выполнено в рамках Научно-исследовательской Работы Росгидромета АААА-А20-120021490079-3. Анализ облачно-радиационных эффектов проведен при поддержке Правительства Российской Федерации (грант № 075-15-2021-574).

1. Meador W.E., Weaver W.R. Two-stream approximations to radiative transfer in planetary atmospheres: A unified description of existing methods and a new improvement //J. Atmos. Sci. – 1980. – Vol.37. – P.630-643.

2. Marshak A., Davis A.B., Wiscombe W.J., Cahalan R.F. Radiative smoothing in fractal clouds //J. Geophys. Res. – 1995. – Vol. 100. – P. 26247-26261.

3. Hogan R. J., Bozzo A. ECRAD: A new radiation scheme for the IFS. – European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, 2016. 35 pp.

4. Zängl G., Reinert D., Ripodas P., Baldauf M. The ICON (ICOsahedral Non-hydrostatic) modelling framework of DWD and MPI-M: Description of the non-hydrostatic dynamical core //Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society. – 2015. – Vol. 141. – №. 687. – P. 563-579.

5. Seifert A., Beheng K. D. A two-moment cloud microphysics parameterization for mixed-phase clouds. Part 1: Model description //Meteorology and atmospheric physics. – 2006. – Vol. 92. – №. 1. – P. 45-66.

Short-term forecast of cloud characteristics and radiative fluxes of ICON-Ru model with the ecRad radiation scheme

Yu.O. Shuvalova¹(shuvalova@mecom.ru), N.Ye. Chubarova^{2,1}(chubarova@geogr.msu.ru), M.V. Shatunova¹, A.A. Kirsanov¹, A.Yu. Bundel¹, M.A. Tarasova^{2,1}, G.S. Rivin^{1,2}

¹Hydrometeorological Research Center of Russia, Moscow, Russia

²M.V. Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

Two-stream radiative transfer schemes became widespread in the 70s of the last century [1]. Today, the question of radiation smoothing scale is strongly raised due to the grid spacing decrease in the numerical weather and climate prediction models [2]. At the same time, the description of three-dimensional radiation processes is not yet possible in operational practice. Therefore, schemes with an implicit description of three-dimensional radiation effects have become widespread.

A study of the ecRad radiation transfer scheme with the ICON-Ru model (ICOsahedral Nonhydrostatic) is presented here [3, 4]. We carried out a comparative analysis of the McICA radiation transfer method and also tested the schemes of ice and liquid cloud optical properties. ICON-Ru numerical experiments were done for a domain with a 1.1 km grid spacing. We used two-moment microphysics [5] and considered only the warm (snowless) period of 2021. We analyzed results of ICON-Ru numerical experiments using ground-based observations of Cloudnet network (<https://cloudnet.fmi.fi>), satellite observations of MODIS and CERES systems (<https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov>, <https://search.earthdata.nasa.gov>), ground-based radiative measurements of BSRN network (<https://bsrn.awi.de>) and standard hydrometeorological observations. The effects of cloud-radiation interaction of the ICON-Ru-ecRad system and its impact on radiative fluxes at the ground, as well as standard hydrometeorological characteristics (air temperature, atmospheric pressure, wind speed and precipitation) are shown.

Implementation and research of the ICON-Ru-ecRad joint system was carried out as part of Roshydromet Research Work AAAA-A20-120021490079-3. The analysis of cloud-radiation effects was funded by the Government of Russia (grant number 075-15-2021-574).

1. Meador W.E., Weaver W.R. Two-stream approximations to radiative transfer in planetary atmospheres: A unified description of existing methods and a new improvement // *J. Atmos. Sci.* – 1980. – Vol.37. – P.630-643.
2. Marshak A., Davis A.B., Wiscombe W.J., Cahalan R.F. Radiative smoothing in fractal clouds // *J. Geophys. Res.* – 1995. – Vol. 100. – P. 26247-26261.
3. Hogan R. J., Bozzo A. ECRAD: A new radiation scheme for the IFS. – European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, 2016. 35 pp.
4. Zängl G., Reinert D., Ripodas P., Baldauf M. The ICON (ICOsahedral Non-hydrostatic) modelling framework of DWD and MPI-M: Description of the non-hydrostatic dynamical core // *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society.* – 2015. – Vol. 141. – №. 687. – P. 563-579.
5. Seifert A., Beheng K. D. A two-moment cloud microphysics parameterization for mixed-phase clouds. Part 1: Model description // *Meteorology and atmospheric physics.* – 2006. – Vol. 92. – №. 1. – P. 45-66.

Оценка радиационных эффектов за счет многолетнего изменения содержания аэрозоля в Московском регионе по данным модели COSMO-RU

Полюхов А. А.^{1,2}(aeromsu@gmail.com), Жданова Е.Ю.¹, Чубарова Н. Е.¹

¹Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

²Гидрометеорологический научно-исследовательский центр РФ, Москва, Россия

В работе оцениваются радиационные эффекты аэрозольного загрязнения Москвы и прилегающих территорий с использованием данных МАИАС, полученных по спутниковым данным MODIS с 2001 по 2020 год (Zhdanova et al., 2020). Была выбрана территория с радиусом 100 км от центра Москвы. Из данных исключались дни с пожарами, таким образом анализировалось только изменения регионального аэрозоля. Было выделено три периода: 2000-2006, 2007-2014, 2015-2021 гг. Все данные были адаптированы для расчетов в негидростатической модели прогноза погоды COSMO-Ru. Для коррекции данных дополнительно использовались данные измерений спектральных свойств аэрозоля по программе AERONET в Метеорологической обсерватории МГУ. В модель COSMO-Ru усваивались данные по спектральной аэрозольной оптической

толщине (AOT), альbedo однократного рассеяния и фактору асимметрии индикатрисы рассеяния для эффективных длин волн алгоритма радиации в модели COSMO-Ru на 500, 880 и 2000 нм (Ritter B., Geleyn J. F., 1992).

Для оценки радиационных эффектов был выбран день 19 июня 2021 г., - день близкий к летнему солнцестоянию с отсутствием облачности в течение всего дня для всей исследуемой территории как по данным наблюдений, так и в модели COSMO. Для него проведены численные эксперименты с набором аэрозольных характеристик для трех исследуемых периодов. Получено, что по данным MODIS-MAIAC в период 2000-2006 г. наблюдался максимум AOT на территории Московского мегаполиса, который достигал в среднем на всей территории 0.16. В последний период 2015–2021 AOT уменьшилось до 0.12. Такое уменьшение AOT приводит к существенному увеличению суммарной радиации (на 15-20 Вт/м²) и небольшому увеличению приземной температуры воздуха до 0.1 градуса.

Анализ результатов выполнен при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (грант номер 075-15-2021-574) и Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды тема АААА-А20-120021890120-8.

1. Zhdanova E. Y., Chubarova N. Y., Lyapustin A. I. Assessment of urban aerosol pollution over the moscow megacity by the maiaс aerosol product // *Atmospheric Measurement Techniques*. — 2020. — Vol. 13. — P. 877–891.

2. Ritter B., Geleyn J. F. A comprehensive radiation scheme for numerical weather prediction models with potential applications in climate simulations // *Monthly weather review*. – 1992. – Т. 120. – №. 2. – С. 303-325.

Assessment of radiation effects due to long-term variability of aerosol content in the Moscow region according to the COSMO-RU model

A. A. Poliukhov^{1,2}(aeromsu@gmail.com), Ye.Yu. Zhdanova¹, N.Ye. Chubarova¹

¹*M.V. Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia*

²*Hydrometeorological Research Center of Russia, Moscow, Russia*

The work evaluates the radiation effects of aerosol pollution in Moscow and adjacent territories using MAIAC data obtained from MODIS satellite data from 2001 to 2020 (Zhdanova et al., 2020). An area with a radius of 100 km from the center of Moscow was selected. Days with fires were excluded from the data, so only changes in the regional aerosol were analyzed. Three periods were allocated: 2000-2006, 2007-2014, 2015-2021. All data were adapted for calculations in the COSMO-Ru non-hydrostatic weather forecast model. The data from measurements of the spectral properties of the aerosol according to the AERONET program at the Meteorological Observatory of Moscow State University were additionally used to correct MAIAC data. The COSMO-Ru model assimilated data on the spectral aerosol optical thickness (AOT), the single scattering albedo and the asymmetry factor for the effective wavelengths of the radiation algorithm in the COSMO-Ru model at 500, 880 and 2000 nm (Ritter B., Geleyn J. F., 1992).

The assessment of radiation effects was carried out for June 19, 2021 - a day close to the summer solstice with no clouds throughout the day for the entire study area, both according to observations and in the COSMO model. Numerical experiments with a set of aerosol characteristics for three studied periods were carried out for it. It was found that according to MODIS-MAIAC data, in the period 2000-2006, the maximum AOT was observed on the territory of the Moscow megacity, which reached an average of 0.16 throughout the entire territory. In the last period 2015-2021, the AOT decreased to 0.12. Such a decrease in AOT leads to a significant increase in total radiation (by 15-20 W/m²) and a slight increase in the surface air temperature to 0.1 degrees.

The work was supported by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation (# 075-15-2021-574) and partially by the Federal Service for Hydrometeorology and Environmental Monitoring of Russia topics AAAA-A20-120021490060-1.

1. Zhdanova E. Y., Chubarova N. Y., Lyapustin A. I. Assessment of urban aerosol pollution over the Moscow megacity by the maiaC aerosol product // Atmospheric Measurement Techniques. — 2020. — Vol. 13. — P. 877–891.

2. Ritter B., Geleyn J. F. A comprehensive radiation scheme for numerical weather prediction models with potential applications in climate simulations // Monthly weather review. — 1992. — T. 120. — №. 2. — С. 303-325.

Аэрозольное воздействие на радиационные и температурные характеристики атмосферы по данным численных экспериментов с использованием модели COSMO-ART

Кирсанов А.А.^{1,2} (heu3becteh@mail.ru), Чубарова Н.Е.^{3,1} (chubarova@geogr.msu.ru),
Андросова Е.Е.³ (androsovaelizaveta@mail.ru), Варенцов М.И.³
(mikhail.varentsov@srcc.msu.ru),

Ривин Г.С.^{1,3} (gdaly.rivin@mail.ru), Ольчев А.В.³ (aoltche@gmail.com)

¹Гидрометеорологический научно-исследовательский центр РФ, Москва, Россия

²Институт физики атмосферы им. А.М.Обухова РАН, Москва, Россия

³Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

Рассмотрено влияние атмосферного аэрозоля как природного (аэрозольная климатология, дымовой аэрозоль при лесных пожарах), так и антропогенного (городское аэрозольное загрязнение) происхождения на радиационные потоки в атмосфере и на температурные характеристики с использованием численного моделирования различными конфигурациями системы COSMO-Ru-ART (COnsortium for Small-scale MOdeling – Aerosols and Reactive Trace gases).

Влияние городского аэрозольного загрязнения рассмотрено в Московском регионе на примере условий мая 2019 года, для этого использована конфигурация системы COSMO-Ru-ART с шагом сетки 2 км. В качестве начальных и граничных метеорологических условий использованы данные ERA-5 и ICON (ICOsahedral Nonhydrostatic), данные CAMS или климатологические значения для задания начальных и граничных полей концентраций загрязняющих веществ. В качестве антропогенных эмиссий использованы обработанные с учетом картографической информации OpenStreetMap инвентаризации CAMS, ECLIPSE, EMEP. Для учета влияния города на атмосферные процессы (в т.ч. воспроизведения городского острова тепла) использована параметризация городской подстилающей поверхности TERRA_URB. Проводилось сравнение с измерениями сети автоматических станций контроля загрязнения атмосферы ГПБУ «Мосэкомониторинг» и AERONET (Aerosol Robotic Network) в Метеорологической Обсерватории МГУ (МО МГУ).

Значительно большее влияние на радиационные потоки оказывает дымовой аэрозоль при интенсивных лесных пожарах. В этих условиях приземные концентрации аэрозоля превышают предельно допустимые, а значит оказывают пагубное влияние на здоровье человека и хозяйственную деятельность. Аэрозольная оптическая толщина в разы превышает климатические значения, дымовой аэрозоль сильно сокращает приходящую на земную поверхность коротковолновую солнечную радиацию, в том числе поглощая ее в приподнятых слоях атмосферы и изменяя вертикальный профиль температуры.

На примере лесных пожаров лета 2019 года в Сибири смоделировано и изучено влияние дымового аэрозоля на региональные погодные условия. Была использована конфигурация системы COSMO-Ru-ART с шагом сетки 6,6 км, в качестве начальных и граничных метеорологических условий использованы расчеты модели ICON. Информация

о локализации и интенсивности очагов лесных пожаров получена по спутниковым данным MODIS. Выявлено значительное влияние лесных пожаров на погодные условия, даже на удалении от непосредственных очагов возгорания.

Исследование проведено в рамках Научно-исследовательской работы Росгидромета АААА-А20-120021490079-3. Анализ взаимодействия аэрозоля с радиацией проведен при поддержке Министерства образования и науки РФ, мегагрант № 075-15-2021-574 в рамках научно-образовательной школы МГУ «Будущее планеты и глобальные изменения окружающей среды» (грант № 075-15-2021-574). Анализ вертикальных профилей концентраций аэрозоля проведен в рамках проекта Российского Научного фонда, проект №21-17-00210.

Aerosol impact on radiation and temperature characteristics of the atmosphere according to numerical experiments using COSMO-ART model

A.A. Kirsanov^{1,2} (heu3becteh@mail.ru), N.Ye. Chubarova^{3,1} (chubarova@geogr.msu.ru), E.E. Androsova³ (androsovaelizaveta@mail.ru), M.I. Varentsov³ (mvar91@gmail.com), G.S. Rivin^{1,3} (gdaly.rivin@mail.ru), A.V. Olchev³ (aoltche@gmail.com)

¹Hydrometeorological Research Center of RF, Moscow, Russia

²Obukhov Institute of Atmospheric Physics RAS, Moscow, Russia

³M.V. Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

The influence of atmospheric aerosol, both natural (aerosol climatology, smoke aerosol during forest fires) and anthropogenic (urban aerosol pollution) origin, on radiation fluxes in the atmosphere and on temperature characteristics is estimated using numerical simulation with various configurations of the COSMO-Ru-ART system (Consortium for Small-scale MOdeling - Aerosols and Reactive Trace gases).

The influence of urban aerosol in the Moscow region was asserted for the period of May 2019. The configuration of the COSMO-Ru-ART system with a grid step of 2 km was used. ERA-5 and ICON (ICOsahedral Nonhydrostatic) data were used as initial and boundary meteorological conditions, CAMS data or climatological values were used as initial and boundary fields of pollutant concentrations. CAMS, ECLIPSE, EMEP inventories processed with OpenStreetMap cartographic information were used as anthropogenic emissions. To reproduce the urban heat island, the parameterization TERRA_URB was used. A comparison was made with the measurements of the network of automatic air pollution control stations of the budgetary environmental protection institution «Mosecomonitoring» and AERONET (Aerosol Robotic Network) measurements at the Moscow State University Meteorological Observatory (MO MSU).

Smoke aerosol during intense forest fires has a much greater effect on radiation fluxes. Under these conditions, ground-level aerosol concentrations exceed the maximum permissible, and therefore have a detrimental effect on human health and economic activity. The aerosol optical thickness is many times greater than the climatic values, the smoke aerosol greatly reduces the short-wave solar radiation coming to the earth's surface, absorbs it in the elevated layers of the atmosphere changing the vertical temperature profile.

Using the case of summer 2019 forest fires in Siberia, the influence of smoke aerosol on regional weather conditions is modeled. The configuration of the COSMO-Ru-ART system with a grid step of 6.6 km was used; ICON model calculations were used as the initial and boundary meteorological conditions. Information about the localization and intensity of forest fires was obtained from MODIS satellite data. A significant impact of forest fires on weather conditions was revealed, even at a distance from the burnt area.

This work was supported by Federal Service for Hydrometeorology and Environmental Monitoring АААА-А20-120021490079-3. The analysis of aerosol-radiation interactions was funded by the Government of Russia (grant number 075-15-2021-574). Assessment of the atmospheric pollutant concentration profiles carried out with support by the grant of the Russian Science Foundation 21-17-00210.

Влияние метеорологического режима на вертикальное и пространственное распределение PM_{2.5} в предгорных условиях г. Кисловодска по данным результатов измерения и моделирования

Петров Н.А. (nial.03@mail.ru), Полухов А.А., Кирсанов А.А., Сенник И.А., Гвоздева А.В., Гибадуллин Р.Р., Глебов А.Ю., Лаврентьева А.И., Леонова Д.С., Масляшова А.О., Нариманидзе А.А.

Московский Государственный Университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

Город Кисловодск является одним из крупнейших рекреационных и оздоровительных центров Северного Кавказа. В последнее время в данном регионе наблюдается усиление темпов индустриализации и роста населения, что приводит к проблеме выбора между экономическим развитием и благоприятными экологическими условиями для поддержания рекреационного потенциала территории. Последствия данного процесса связаны с ухудшением качества воздуха, в частности с увеличением содержания аэрозолей различных размеров в атмосфере, которые могут оказывать неблагоприятное воздействие на организм человека [1]. Вертикальное и пространственное распределение аэрозольных частиц в городе сильно зависит от местных географических условий: особенностей рельефа, близости к автотрассам и промышленным предприятиям [2], условий застройки, а также от времени наблюдения и синоптической ситуации. Расположение г. Кисловодска в межгорной котловине и близость Главного Кавказского хребта формируют особые микроклиматические условия города. В первую очередь для него характерны горно-долинная циркуляция и частые приземные температурные инверсии. Таким образом, количественный анализ распределения аэрозолей с учётом влияния метеорологического режима и условий орографии для курортного города является необходимой задачей для прогноза и моделирования экологического состояния атмосферы.

Было оценено влияние орографических и метеорологических условий на пространственное и вертикальное распределение аэрозолей PM_{2.5}, а также роль аэрозолей на поступление солнечной радиации для территории города Кисловодск с 26 января по 3 февраля 2023 года. В ходе работы с помощью БПЛА (дрона), с установленным на нём газоанализатором, в утренние и вечерние часы были проведены измерения вертикальных концентраций аэрозолей в шести пунктах в черте города. Также были проведены однократные измерения на плато Шаджатмаз (Скалистый Хребет, Большой Кавказ). Суточный ход вертикального распределения аэрозолей был оценен на основе ежечасных измерений на базе ВНС ИФА им. А.М. Обухова РАН, расположенной в черте г. Кисловодска.

Полученные с дрона вертикальные аэрозольные профили были соотнесены с результатами расчётов химико-транспортной модели COSMO-ART [3] с использованием данных CAMS [4] для первоначальных оценок антропогенных выбросов. Первые оценки показали занижение концентраций PM_{2.5} у поверхности Земли в 10 раз. Поэтому данные эмиссий были увеличены в 10 раз. На основе таких корректировок был проведён второй запуск модели. Данные непосредственных измерений и модельных расчётов были проанализированы с учётом синоптических условий. Сравнение двух запусков модели позволило выявить прямые эффекты аэрозольного воздействия на суммарную солнечную радиацию.

Выявленные закономерности имеют важную научную и практическую ценность. Полученные данные важны для дальнейших оценок нелинейных эффектов воздействия

аэрозольного загрязнения воздуха в г. Кисловодске на метеорологические параметры и физиологическое состояние жителей.

1. Ulrich Pöschl Dr. Atmospheric Aerosols: Composition, Transformation, Climate and Health Effects. *Angewandte Chemie International Edition*. Vol.44(46). P.7520-7540. (2005).
2. Feng X., Wang S. Influence of different weather events on concentrations of particulate matter with different sizes in Lanzhou, China // *Journal of Environmental Sciences*. Vol.24(4). P.665-674. (2012).
3. Doms G. and Baldauf M. "A Description of the Non hydrostatic Regional COSMO model. Part I: Dynamics and Numerics. Consortium for Small-Scale Modelling", Deutscher Wetterdienst (DWD). (2011a).
4. Inness A. et al. The CAMS reanalysis of atmospheric composition // *Atmospheric Chemistry and Physics*. – 2019. – T. 19. – №. 6. – С. 3515-3556

The influence of the meteorological regime on the vertical and spatial distribution of PM_{2.5} in the foothill conditions of Kislovodsk according to the measurements and modeling.

N.A. Petrov (nial.03@mail.ru), A.A. Poliukhov, A.A. Kirsanov, I.A. Senik, A.V. Gvozdeva, R.R. Gibatullin, A.U. Glebov, A.I. Lavrentieva, D.S. Leonova, A.O. Masliashova, A.A. Narimanidze
M.V. Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

Kislovodsk is one of the largest recreational and wellness centers in the North Caucasus. Recently, the region has seen an increase in the pace of industrialization and population growth. This leads to the problem of choosing between economic development and favorable environmental conditions to maintain the recreational potential of the territory. The consequences of this process are associated with a deterioration in air quality, in particular with an increase in the content of aerosols of various sizes in the atmosphere, which can have an adverse effect on the human body [1]. The vertical and spatial distribution of aerosol particles in a city is highly dependent on local geographic conditions. These conditions include: features of orography, proximity to highways and industrial enterprises [2], building conditions, as well as observation time and synoptic situation. The location of Kislovodsk in the intermountain basin near the Main Caucasian Ridge forms the special microclimatic conditions of the city. First of all, it is characterized by mountain-valley circulation and frequent surface temperature inversions. Thus, a quantitative analysis of the distribution of aerosols, taking into account the influence of the meteorological regime and orographic conditions for a resort town, is a necessary task for predicting and modeling the ecological state of the atmosphere.

The influence of orographic and meteorological conditions on the spatial and vertical distribution of PM_{2.5} aerosols was assessed, as well as the role of aerosols on the influx of solar radiation for the territory of Kislovodsk from January 26 to February 3, 2023. In the course of work, using an UAV (drone), with a gas analyzer installed on it, in the morning and evening hours, vertical concentrations of aerosols were measured at six points within the city. Single measurements were also carried out on the Shadzhatmaz plateau (Rocky Range, Greater Caucasus). The daily course of the vertical distribution of aerosols was estimated on the basis of hourly measurements on the basis of the Kislovodsk high-mountain station named after A.M. Obukhov RAS, located within the city of Kislovodsk.

Vertical aerosol profiles from the drone were compared with the results of calculations of the COSMO-ART [3] chemical transport model using CAMS [4] data for initial estimates of anthropogenic emissions. The first estimates showed a 10-fold underestimation of PM_{2.5} concentrations near the Earth's surface. Therefore, the emissions data were increased by 10 times. Based on these adjustments, a second run of the model was carried out. The data of direct measurements and model calculations were analyzed taking into account synoptic conditions. A comparison of the two model launches revealed the direct effects of aerosol on the total solar radiation.

The revealed regularities have important scientific and practical value. The data obtained are important for further assessments of the non-linear effects of aerosol air pollution in Kislovodsk on meteorological parameters and the physiological state of residents.

1. Ulrich Pöschl Dr. Atmospheric Aerosols: Composition, Transformation, Climate and Health Effects. Angewandte Chemie International Edition. Vol.44(46). P.7520-7540. (2005).
2. Feng X., Wang S. Influence of different weather events on concentrations of particulate matter with different sizes in Lanzhou, China // Journal of Environmental Sciences. Vol.24(4). P.665-674. (2012).
3. Doms G. and Baldauf M. "A Description of the Non hydrostatic Regional COSMO model. Part I: Dynamics and Numerics. Consortium for Small-Scale Modelling", Deutscher Wetterdienst (DWD). (2011a).
4. Inness A. et al. The CAMS reanalysis of atmospheric composition // Atmospheric Chemistry and Physics. – 2019. – T. 19. – №. 6. – С. 3515-3556

Результаты мониторинга прозрачности атмосферы на территории России

Махоткин А.Н.¹(aktinom@mail.ru), Махоткина Е.Л.¹, Плахина И.Н.²(inna@ifaran.ru)

¹Главная геофизическая обсерватория им. А.И.Воейкова, Санкт-Петербург, Россия

²Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия

Представлены результаты систематизации и обобщения данных о пространственно-временных изменениях интегральной и аэрозольной мутности атмосферы как на территории России в целом, так и в отдельных ее регионах за период 1976–2021 гг. Объектом исследования явились ряды месячных и годовых значений фактора мутности T_2 и аэрозольной оптической толщины атмосферы АОТ для основных регионов России: север, центр, юг ЕТР, Урал, Западная Сибирь, северо-восток, центр, юг АТР, Дальний Восток. Выполнены оценки трендов T_2 и АОТ, рассмотрены изменения месячных и годовых значений T_2 и АОТ за периоды 1976-2021 гг. и 1994–2021 гг. Для периода относительно высокой прозрачности атмосферы (1994–2021 гг.) получены оценки суммарного изменения T_2 и АОТ в рядах месячных величин, которые представлены в виде гистограмм годового хода ΔT_2 и $\Delta \text{АОТ}$ (для отдельных станций или регионов).

Известно, что наиболее значительные и долговременные изменения прозрачности атмосферы происходят под воздействием вулканических извержений, относительно кратковременные – под влиянием дымной мглы от лесных и торфяных пожаров. В конце XX – начале XXI в. на земном шаре не происходили мощные вулканические извержения, в глобальном масштабе этот период характеризуется увеличением приходящей солнечной радиации и соответственно ростом прозрачности атмосферы.

Основные закономерности пространственно-временного распределения мутности на территории России могут быть сформулированы следующим образом:

В течение рассматриваемого периода наблюдается сложная картина временных изменений мутности атмосферы. Изменения T_2 и АОТ происходят как правило синхронно, но АОТ изменяется быстрее, чем T_2 .

Наиболее высокая прозрачность атмосферы характерна для северных регионов как на азиатской, так и на европейской территории России.

Несмотря на то, что рассматриваемый период (1976–2021 гг.) относительно короткий, он может быть разбит на отдельные периоды, существенно различающиеся по условиям мутности. Выделение этих периодов производится по результатам анализа годовых и месячных рядов характеристик мутности атмосферы.

Для всех рассмотренных регионов можно констатировать, что в целом на фоне существенной межгодовой изменчивости T_2 и АОТ проявляются вполне определенные тенденции долговременных изменений. На большей части территории России в последнее тридцатилетие отмечается тенденция к уменьшению T_2 и АОТ.

С 1994 г. на территории России мутность атмосферы устойчиво ниже нормы, что свидетельствует об очищении атмосферы.

В период относительно высокой прозрачности в отдельных регионах России выявлены тенденции к слабому увеличению интегральной мутности при сохранении относительно низкого уровня аэрозольной составляющей.

Results of atmospheric transparency monitoring over Russia

A.N. Makhotkin¹ (actinom@mail.ru), E.L. Makhotkina¹, I.N. Plakhina² (inna@ifaran.ru)

¹*Voeikov Main Geophysical Observatory, Saint Petersburg, Russia*

²*A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics RAS, Moscow, Russia*

The results of systematization and generalization of data on spatiotemporal changes in the integral and aerosol turbidity of the atmosphere both over the territory of Russia as a whole and over its different regions for the period 1976–2021 are presented. The objects of the study were the series of monthly and annual values of the turbidity factor (T_2) and the aerosol optical depth of the atmosphere (AOD) for the main regions of Russia: the North, the Center, the South of the European territory of Russia (ETR), the Urals, Western Siberia, the Northeast, the Center, the South of the Asian territory of Russia (ATR), the Far East. The estimates of T_2 and AOD trends are made, changes in monthly and annual values of T_2 and AOT for the periods of 1976–2021 and 1994–2021 are considered. For a period of relatively high atmospheric transparency (1994–2021) estimates of the total change in T_2 and AOD in series of monthly values were obtained; results are presented as histograms of the annual variation of ΔT_2 and ΔAOT (for individual stations or regions).

It is known that the most significant and long-term changes in the transparency of the atmosphere occur under the influence of volcanic eruptions, relatively short-term – under the influence of smoky haze from forest and peat fires. At the end of XX – beginning of XXI century. powerful volcanic eruptions did not occur, globally this period is characterized by an increase in incoming solar radiation and, accordingly, an increase in the transparency of the atmosphere.

The main regularities of spatiotemporal distribution of turbidity over the territory of Russia can be formulated as follows:

During the period under consideration, a complex pattern of temporal changes in atmospheric turbidity is observed. Changes of T_2 and AOD usually occur synchronously, but AOD changes faster than T_2 ones.

The highest transparency of the atmosphere is characteristic of the northern regions of both the Asian and European territories of Russia.

Despite the fact that the period under consideration (1976–2021) is relatively short, it can be divided into separate periods that differ significantly by turbidity conditions. These periods are identified based on the results of the analysis of annual and monthly series for atmospheric turbidity characteristics.

For all the regions considered, it can be stated that, in general, against the background of significant interannual variability of T_2 and AOD, quite definite trends of long-term changes appear. For most part of the Russia territory during last thirty years a trend towards a decrease in T_2 and AOT exist.

Since 1994, the atmosphere turbidity over Russia has been steadily below than norm, which indicates the purification of the atmosphere.

During the period of relatively high transparency in some regions of Russia, trends towards a slight increase in the integral turbidity were revealed while maintaining a relatively low level of the aerosol component.

Мониторинг естественной освещенности в МО МГУ

Горбаренко Е.В. (catgor@mail.ru), Бунина Н.А.

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

Метеорологическая обсерватория МГУ (МО МГУ) является единственной станцией на территории Российской Федерации, где проводятся световые наблюдения. Измерения естественной освещенности земной поверхности были начаты Т.В. Евневич в 1964 г, продолжены О.А. Шиловцевой и проводятся в настоящее время. До 2012 года непрерывная регистрация суммарной и рассеянной освещенности проводилась приборами, разработанными инженерами МО МГУ (регистратор естественного освещения – РЕО). В настоящее время проводятся измерения только суммарной освещенности, контрольным прибором служит фотометр LI-210SL фирмы "LI-COR". В 2012 г. в МО МГУ начались измерения естественной освещенности вертикальных поверхностей, ориентированных на север, юг, запад и восток. Наблюдения за освещенностью различно ориентированных по сторонам горизонта вертикальных поверхностей проводятся с помощью фотометра Daylight Photometer Head Model 910GV фирмы PRC Krochman GmbH. Они стали дополнением к многолетним наблюдениям за естественной освещенностью горизонтальной поверхности, что позволило получить достоверные результаты о световом климате Москвы.

Режим освещенности представлен осреднёнными значениями за период 1964-2022 гг. Приведены значения естественной освещенности за различные периоды осреднения (час, сутки, месяц, год). Они отражают световой климат Москвы и являются климатическими нормами естественной освещенности. В большинстве случаев эти величины достаточны для любых практических применений. Межгодовые изменения освещенности происходят в соответствии с изменением режима облачности, продолжительности солнечного сияния, суммарной радиации. Самым «светлым» годом был малооблачный 2018 год (124 Млк•ч), самым «темным»- 1974 год (101 Млк•ч). Аппроксимация линейной зависимостью годовых значений показывает тенденцию к увеличению освещенности за счет летнего и весеннего периодов. Заметно уменьшилась освещенность в зимний период, более «темной» стала и осень. Отмеченные тенденции незначимы и не влияют на положение Москвы в зонировании России по показателям светового климата России.

Проанализированы уровни естественной освещенности и получены эмпирические зависимости естественной освещенности в зависимости от прозрачности атмосферы, от балла и формы облаков. На основании модельных расчетов сделаны теоретические оценки изменения освещенности земной поверхности в безоблачной атмосфере и при сплошной облачности различной оптической толщины. Проведены сравнения математической и эмпирической моделей освещенности, сделаны оценки точности предложенных методов. На основе одновременных наблюдений за освещенностью и суммарной интегральной солнечной радиации определены световые эквиваленты, использование которых позволяет получить информацию по освещенности различных территорий на основе стандартных актинометрических наблюдений.

Особое внимание уделено режиму естественной освещенности с учетом его прикладного назначения. В работе проанализированы условия, приводящие к уменьшению освещенности ниже критических значений, при которых требуется использование совмещенного или искусственного освещения помещений. Учет этих факторов позволит повысить точность прогнозов энергопотребления. Показано, что в

большинстве таких случаев прогноз уровня освещенности возможно давать по прогнозу нижней облачности на основании общего прогноза погоды.

Monitoring of natural illumination in the MO MSU

E.V. Gorbarenko (catgor@mail.ru), N.A. Bunina
M.V. Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

The Meteorological Observatory of Moscow State University (MO MSU) is the only station in the Russian Federation where light observations are carried out. Measurements of the natural illumination of the earth's surface were started by T.V. Evnevich in 1964, continued by O.A. Shilovtseva and are currently underway. Until 2012, continuous registration of total and scattered illumination was carried out by devices developed by engineers of the Moscow State University (natural light recorder - REO). Currently, only total illumination is measured, the control device is the LI-210SL photometer manufactured by "LI-COR". In 2012, measurements of the natural illumination of vertical surfaces oriented to the north, south, west, and east began at the Moscow State University. Observations of the illumination of vertical surfaces differently oriented on the sides of the horizon are carried out using a Daylight Photometer Head Model 910GV from PRC Krochman GmbH. They became an addition to long-term observations of the natural illumination of a horizontal surface, which made it possible to obtain reliable results on the light climate in Moscow.

The illumination mode is presented as averaged values for the period 1964-2022. The values of natural illumination for different periods of averaging (hour, day, month, year) are given. They reflect the light climate of Moscow and are the climatic norms for natural light. In most cases, these values are sufficient for any practical application. Interannual changes in illumination occur in accordance with changes in the cloudiness regime, the duration of sunshine, and total radiation. The most "bright" year was the cloudy year 2018 (124 Mlk•h), the "darkest" year was 1974 (101 Mlk•h). Approximation by a linear dependence of annual values shows a tendency to an increase in illumination due to the summer and spring periods. Illumination noticeably decreased in winter, and autumn also became more "darker". The noted trends are insignificant and do not affect the position of Moscow in the zoning of Russia in terms of Russia's light climate.

The levels of natural illumination are analyzed and empirical dependences of natural illumination are obtained depending on the transparency of the atmosphere, on the score and shape of the clouds. On the basis of model calculations, theoretical estimates were made of the change in the illumination of the earth's surface in a cloudless atmosphere and under continuous clouds of various optical thicknesses. Comparisons of mathematical and empirical models of illumination are carried out, estimates of the accuracy of the proposed methods are made. On the basis of simultaneous observations of illumination and total integral solar radiation, light equivalents were determined, the use of which makes it possible to obtain information on the illumination of various territories based on standard actinometric observations.

Particular attention is paid to the mode of natural illumination, taking into account its applied purpose. The paper analyzes the conditions that lead to a decrease in illumination below critical values, which require the use of combined or artificial lighting of premises. Accounting for these factors will improve the accuracy of energy consumption forecasts. It is shown that in most of these cases it is possible to predict the level of illumination based on the forecast of low clouds based on the general weather forecast.

Многолетние тенденции и современные изменения радиационных параметров атмосферы по данным МО МГУ

Горбаренко Е.В. (catgor@mail.ru), Бунина Н.А.

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

Представленная работа продолжает исследование радиационного режима атмосферы и его изменений в Московском регионе на базе наблюдений Метеорологической обсерватории МГУ. Проведен анализ многолетней (1955-2022 гг.) динамики радиационных параметров атмосферы. Рассмотрены изменения 30-летних климатических норм. Оценены особенности радиационного режима в XXI веке. Выделены и оценены их экстремальные сезонные, годовые значения, многолетние изменения.

За период с 1965 по 2022 год на фоне квазипериодических изменений количества облаков наблюдается значимый линейный тренд к увеличению средних годовых значений балла общей и нижней облачности; увеличение на 15% влагосодержания атмосферы; уменьшение на 50% аэрозольной оптической толщины атмосферы; уменьшение суммарной и отраженной солнечной радиации. Сократился период со снежным покровом, бесснежные октябрь, ноябрь стали для Москвы нормой. Значительный значимый рост наблюдается в тенденциях изменения радиационного и длинноволнового баланса, температуры поверхности почвы.

В XXI веке тенденция увеличения общей облачности сохранилась, для нижней облачности в большей части года изменилась на противоположную. Это уменьшение произошло за счет существенного снижения с середины 90-х годов повторяемости пасмурного неба, а также уменьшения повторяемости слоисто-дождевой облачности. В XXI веке усилились тенденции уменьшения аэрозольной мутности атмосферы, роста прямой и уменьшения рассеянной радиации. Практически вдвое увеличилась скорость повышения длинноволнового баланса, температуры поверхности почвы. Тренды в зимний период для всех радиационных параметров имеют значения, превышающие тренды среднегодовых значений и значений в другие сезоны. На 28% произошло уменьшение основной расходной части радиационного баланса – отраженной радиации. Основная причина – сокращение на 17% числа дней со снежным покровом и уменьшение альбедо. Уменьшение отражательных свойств подстилающей поверхности в зимний период вызвано изменением структуры снега и большей повторяемости бесснежных декабрьских дней в XXI веке. В зимний период радиационный баланс увеличился на 73%, его длинноволновая часть на 41%, что привело к росту температуры поверхности почвы на 34%.

Оценки причин тенденций в изменчивости факторов, оказывающих основное влияние на формирование радиационного режима, а также проявление подобных тенденций на территории Европы позволяют предположить глобальный характер процессов, определяющих эти изменения. Основным из которых является изменение общей циркуляции атмосферы в Северном полушарии. В отсутствии значительных вулканических извержений радиационный эффект облаков существенно выше радиационного эффекта аэрозоля. Облачность уменьшает коротковолновые потоки и усиливает длинноволновые. Вклад в радиационный баланс длинноволновых потоков возрастает в зимний период, увеличение количества облачности зимой ведет к росту длинноволнового и радиационного баланса, температуры почвы и воздуха.

Косвенный показатель загрязнения - аэрозольная оптическая толщина атмосферы показывает существенное снижение антропогенной составляющей в последние годы, что

связано с рядом мер правительства Москвы по улучшению экологии в городе. Антропогенное влияние на радиационный режим в городе проявляется в усилении длинноволновых потоков, что ведет к возникновению «острова тепла», интенсивность которого возросла в XXI веке.

Long-term trends and current changes in the radiation parameters of the atmosphere according to the data of the Moscow State University

E.V. Gorbarenko (catgor@mail.ru), N.A. Bunina
M.V. Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

The presented work continues the study of the radiation regime of the atmosphere and its changes in the Moscow region on the basis of observations of the Meteorological Observatory of Moscow State University. An analysis of the long-term (1955-2022) dynamics of atmospheric radiation parameters has been carried out. Changes in 30-year climatic norms are considered. The features of the radiation regime in the 21st century are estimated. Their extreme seasonal, annual values, long-term changes are identified and evaluated.

For the period from 1965 to 2022, against the background of quasi-periodic changes in the amount of clouds, there is a significant linear trend towards an increase in the average annual values of the total and lower cloudiness; an increase of 15% in the moisture content of the atmosphere; reduction by 50% of the aerosol optical thickness of the atmosphere; reduction of total and reflected solar radiation. The period with snow cover has shortened, snowless October and November have become the norm for Moscow. A significant significant increase is observed in the trends of changes in the radiation and long-wave balance, soil surface temperature.

In the 21st century, the trend towards an increase in total cloudiness has continued; for lower cloudiness, it has reversed in most of the year. This decrease was due to a significant decrease in the frequency of cloudy skies since the mid-1990s, as well as a decrease in the frequency of nimbostratus clouds. In the 21st century, the tendencies of a decrease in aerosol turbidity of the atmosphere, an increase in direct radiation and a decrease in scattered radiation have intensified. The rate of increase in the long-wavelength balance and soil surface temperature almost doubled. Trends in winter for all radiation parameters have values that exceed the trends of average annual values and values in other seasons. By 28%, there was a decrease in the main expenditure part of the radiation balance - reflected radiation. The main reason is a 17% reduction in the number of days with snow cover and a decrease in albedo. The decrease in the reflective properties of the underlying surface in winter is caused by a change in the structure of snow and a greater frequency of snowless December days in the 21st century. In winter, the radiation balance increased by 73%, its long-wave part by 41%, which led to an increase in soil surface temperature by 34%.

Estimates of the causes of trends in the variability of the factors that have the main influence on the formation of the radiation regime, as well as the manifestation of such trends on the territory of Europe, allow us to assume the global nature of the processes that determine these changes. The main one is the change in the general circulation of the atmosphere in the Northern Hemisphere. In the absence of significant volcanic eruptions, the radiative effect of clouds is much higher than the radiative effect of aerosol. Cloudiness reduces shortwave fluxes and enhances longwave ones. The contribution of long-wave fluxes to the radiation balance increases in winter; an increase in the amount of cloudiness in winter leads to an increase in the long-wave and radiation balance, soil and air temperatures.

An indirect indicator of pollution - the aerosol optical depth of the atmosphere - shows a significant decrease in the anthropogenic component in recent years, which is associated with a number of measures taken by the Moscow government to improve the environment in the city. Anthropogenic influence on the radiation regime in the city is manifested in the enhancement of long-wave fluxes, which leads to the emergence of a "heat island", the intensity of which has increased in the 21st century.

Некоторые особенности радиационного режима Москвы по данным нового комплекса RAD-MSU (BSRN)

Пискунова Д.А. (dariapiskunova@rambler.ru), Чубарова Н.Е.
Московский Государственный Университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

В 2021 году Метеорологическая обсерватория (МО) МГУ приобрела приборы фирмы KIPP&ZONEN, рекомендованные для измерения на сети BSRN, и был образован комплекс RAD-MSU(BSRN). Приборы комплекса отличаются высокой точностью и высоким временным разрешением. Было создано ПО для автоматизированной визуализации месячных и суточных сумм параметров, измеряемых комплексом, а также для их сравнения с многолетними нормами. Более детально были проанализированы особенности длинноволнового баланса. Для объяснения причин изменчивости длинноволновой радиации использовались данные профиломера МТП-5, установленного в МО МГУ недалеко от приборов комплекса. Другим важным аспектом работы стало изучение влияния аэрозоля на коротковолновую радиацию, так как в период с августа 2021 года до апреля 2022 в МО МГУ одновременно с работой комплекса BSRN-RAD-Ru происходили измерения аэрозольной оптической толщины солнечным фотометром CIMEL. Обработка первичных данных фотометра проводилась по методике, приближенной к третьей версии алгоритма AERONET.

По результатам работы выявлено, что отличия радиационных величин, измеряемых комплексом, от многолетних норм в большинстве случаев объяснимы вариациями облачности и альбедо. Определены основные факторы, при которых наблюдаются положительные значения длинноволнового баланса. Кроме того, был получен отклик коротковолновой радиации (суммарной, прямой и рассеянной) на аэрозольную оптическую толщину, величина которого демонстрировала ощутимую зависимость от альбедо поверхности.

Работа частично выполнялась в рамках работы центра коллективного пользования МГУ (Мониторинг атмосферной радиации, номер 460191494), и частично в рамках мегагранта 075-15-2021-574.

Some features of radiation regime in Moscow according to the new RAD-MSU (BSRN) complex

D.A. Piskunova (dariapiskunova@rambler.ru), N.Ye. Chubarova
M.V. Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

In 2021, the Meteorological Observatory (MO) of Moscow State University acquired KIPP & ZONEN instruments recommended for measurement on the BSRN network, and the RAD-MSU(BSRN) complex was formed. The instruments of the complex have high accuracy and high time resolution. For automated visualization of monthly and daily sums of parameters measured by the complex, as well as for their comparison with long-term norms special software was created. The features of the longwave balance were analyzed in more detail. To explain the reasons for the variability of longwave radiation, we used data from the

meteorological temperature profiler MTP-5 installed at the Moscow State University near the instruments of the complex. Another important aspect of the work was the study of the effect of aerosol on short-wave radiation, because during the period from August 2021 to April 2022 measurements of aerosol optical thickness with a solar photometer CIMEL took place at the Moscow State University simultaneously with the operation of the BSRN-RAD-Ru complex. The processing of the primary photometer data was carried out using a technique close to the third version of the AERONET algorithm.

According to the results of the work, it was revealed that the differences in radiation values measured by the complex from long-term norms in most cases are explained by variations in cloud cover and albedo. The main factors that cause positive values of the long-wave balance were observed are determined. In addition, the response of short-wave radiation (total, direct and diffuse) to the aerosol optical thickness was obtained, and its magnitude demonstrated a noticeable dependence on the surface albedo.

The work was partially carried out within the framework of the work of the MSU Collective Use Center (Monitoring of Atmospheric Radiation, number 460191494), and partially within the framework of megagrant 075-15-2021-574.

Результаты измерений характеристик естественного излучения в обсерватории «Фоновая»

Скляднева Т.К.(tatyana@iao.ru), Ивлев Г.А., Белан Б.Д.
Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, Томск, Россия

Зафиксированное Международной группой экспертов по изменению климата (МГЭИК) глобальное потепление приводит к необходимости уточнения механизма его образования. Причину роста температуры воздуха МГЭИК связывает с изменением радиационного баланса Земли, основными составляющими которого являются суммарная радиация и альbedo подстилающей поверхности.

Сотрудниками Института оптики атмосферы им. В.Е.Зуева СО РАН в обсерватории «Фоновая» (56⁰25' с.ш., 84⁰04' в.д.) с июля 2016 г. ведутся измерения суммарной солнечной радиации в диапазоне 0,305÷2,8 мкм (пиранометр Kipp&Zonen CM3). В апреле 2019 г. начаты измерения фотосинтетической радиации (датчик Kipp&Zonen PQS1). В ходе модернизации обсерватории «Фоновая» в ноябре 2020 г. блок приборов для радиационных измерений пополнился пиранометрами SMP10 (суммарная радиация Q, $\lambda = 0,285-2,8$ мкм), SUV-B (УФ-B-радиации, $\lambda = 0,280-0,315$ мкм), SUV5 (УФ-радиация, $\lambda = 0,280-0,400$ мкм) и радиометром CNR4 производства Kipp&Zonen [1]. Все датчики установлены на высоте 1,5 м и подключены в дифференциальном режиме к устройству многофункционального ввода-вывода.

В докладе анализируются результаты измерения солнечной радиации в разных спектральных диапазонах, радиационного баланса (B) и альbedo (A) подстилающей поверхности в фоновом районе Западной Сибири.

Анализ результатов измерения солнечной радиации в разных спектральных диапазонах позволил сделать оценки изменения приходящей солнечной радиации. В зимний период, с декабря по февраль, суточное поступление солнечной радиации не превышало 7,3 ($\lambda = 0,285-2,800$ мкм); 0,4 ($\lambda = 0,280-0,400$ мкм); $1,4 \cdot 10^{-3}$ МДж/м² ($\lambda = 0,280-0,315$ мкм). В летний период суточное поступление суммарной и УФ-радиации возрастает почти в пять раз ($Q = 18,9 \pm 6,6$ МДж/м², УФ-радиация = $1,0 \pm 0,3$ МДж/м²), а УФ-B-радиации – в 10 раз ($1,7 \cdot 10^{-2} \pm 0,5 \cdot 10^{-2}$ МДж/м²).

Проведен расчет и сделаны первые оценки изменения радиационного баланса. Установлено, что с ноября по март при устойчивом снежном покрове суточный

радиационный баланс $B = -0,91 \pm 1,35 \text{ МДж/м}^2$, а при отсутствии снега с мая по октябрь $B = 7,41 \pm 5,09 \text{ МДж/м}^2$. Весной переход суточного радиационного баланса от отрицательных значений к положительным отмечен с 5 по 7 апреля, а осенью на отрицательные значения с 10 по 22 октября.

Расчитаны среднесуточные значения альbedo подстилающей поверхности. Для периода с ноябрь по март (устойчивый снежный покров) $A = 58 \div 95\%$ в зависимости от состояния снежного покрова (свежевыпавший, спрессованный или грязный снег), а с мая по октябрь (бесснежный период) $A = 13 \div 30\%$.

Работа выполнена в рамках государственного задания на оказание государственных услуг (выполнение работ) № 075-00713-22-02 от 14.10.2022, согласно распоряжению Правительства Российской Федерации от 02.09. 2022 № 2515-р.

1. Белан Б.Д., Ивлев Г.А., Козлов А.В., Пестунов Д.А., Складнева Т.К., Фофонов А.В. Радиационный блок измерительного комплекса обсерватории «Фоновая». Часть I. Методические аспекты и технические характеристики // Оптика атмосферы и океана. 2022. Т.35. №9. С.759-765.

The results of measurements of the characteristics of natural radiation at the Fonovaya observatory

T.K. Sklyadneva (tatyana@iao.ru), G.A. Ivlev, B.D. Belan
V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics of SB SO RAS, Tomsk, Russia

The global warming recorded by the International Panel of Experts on Climate Change (IPCC) leads to the need to clarify the mechanism of its formation. The IPCC associates the reason for the increase in air temperature with a change in the radiation balance of the Earth, the main components of which are the total radiation and the albedo of the underlying surface.

Employees of the V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics SB RAS conduct long-term continuous monitoring of the characteristics of natural radiation in the atmospheric surface layer at the Fonovaya observatory ($56^{\circ}25' \text{ N}$, $84^{\circ}04' \text{ E}$). Measurements of total solar radiation are carried out using a pyranometer CM3 Kipp&Zonen (measurement range 0.305–2.8 microns) since July 2016. Measurements of photosynthetic radiation were started (Kipp&Zonen PQS1 sensor) in April 2019. The installation for measurements of the solar radiation at the Fonovaya observatory was modernization in November 2020. Pyranometers Kipp&Zonen SMP10 ($\lambda = 0.285\text{--}2.8 \mu\text{m}$), SUV-B ($\lambda = 0.280\text{--}0.315 \mu\text{m}$), SUV5 ($\lambda = 0.280\text{--}0.400 \mu\text{m}$) and Kipp&Zonen CNR4 radiometer were installed at a height of 1.5 m and connected in differential mode to the multifunction I/O device [1]. Measurements of solar radiation in the wavelength ranges $\lambda = 0.285\text{--}2.8 \mu\text{m}$ (total radiation Q), $\lambda = 0.280\text{--}0.400 \mu\text{m}$ (UV radiation), $\lambda = 0.280\text{--}0,315 \mu\text{m}$ (UV-B radiation) were begin [1].

In this report, the results of measurements of solar radiation in the wavelength ranges $\lambda = 0.285\text{--}2.8 \mu\text{m}$, $\lambda = 0.280\text{--}0.400 \mu\text{m}$, $\lambda = 0.280\text{--}0,315 \mu\text{m}$ and the results of calculating the radiation balance, albedo of the underlying surface in the background region of Western Siberia are presented.

The changes in incoming solar radiation in different spectral ranges are analyzed in the paper. It is shown that daily income of solar radiation did not exceed 7.3 MJ/m^2 ($\lambda = 0.285\text{--}2.800 \mu\text{m}$); 0.4 MJ/m^2 ($\lambda = 0.280\text{--}0.400 \mu\text{m}$); $1.4 \cdot 10^{-3} \text{ MJ/m}^2$ ($\lambda = 0.280\text{--}0.315 \mu\text{m}$) during the winter period. The daily income of total and UV radiation increases almost five times ($Q = 18.9 \pm 6.6 \text{ MJ/m}^2$, UV radiation = $1.0 \pm 0.3 \text{ MJ/m}^2$) and daily income of UV-B radiation increases tenfold ($1.7 \cdot 10^{-2} \pm 0.5 \cdot 10^{-2} \text{ MJ/m}^2$) in summer.

The calculation of changes in the radiation balance was carried out. It has been established that the daily radiation balance are $B = -0.91 \pm 1.35 \text{ MJ/m}^2$ from November to March (stable snow cover) and $B = 7.41 \pm 5.09 \text{ MJ/m}^2$ from May to October (no snow). The

transition of the daily radiation balance from negative to positive values was noted from 5 to 7 April and to negative values from 10 to 22 October.

Average daily albedo (A) values of the underlying surface are calculated. For the period from November to March (steady snow cover) $A = 58 - 95\%$ depending on the state of the snow cover (freshly fallen, compressed or dirty snow) and from May to October $A = 13 - 30\%$ (snowless period).

The work was carried out within the framework of the state task for the provision of public services (performance of work) No. 075-00713-22-02 dated 10/14/2022, in accordance with the order of the Government of the Russian Federation dated 02.09. 2022 No. 2515-r.

1. Белан Б.Д., Ивлев Г.А., Козлов А.В., Пестунов Д.А., Складнева Т.К., Фофонов А.В. Радиационный блок измерительного комплекса обсерватории «Фоновая». Часть I. Методические аспекты и технические характеристики // Оптика атмосферы и океана. 2022. Т.35. №9. С.759-765.

Результаты измерений температуры почвы в обсерватории «Фоновая»

Складнева Т.К. (tatyana@iao.ru), Ивлев Г.А., Белан Б.Д.
Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, Томск, Россия

Сотрудниками лаборатории климатологии атмосферного состава ИОА СО РАН на территории обсерватории «Фоновая» в мае 2020 года начаты измерения температуры на разных уровнях по глубине почвы. Обсерватория «Фоновая» расположена на восточном берегу реки Оби, в 60 км к западу от Томска ($56^{\circ}25'$ с.ш., $84^{\circ}04'$ в.д.) [1]. Измерения ведутся с помощью зонда профиля температуры, содержащего цифровые датчики на разных уровнях по глубине. Зонд разработан в ИМКЭС СО РАН. Измерительная площадка под естественным покровом расположена на открытом, хорошо освещенном пространстве. Измерение температуры на всех уровнях осуществляется каждые пять минут. Результаты записываются в базу данных измерительного комплекса обсерватории «Фоновая».

В докладе приводятся результаты анализа рядов наблюдений температуры почвы (t_n) на разных глубинах (0, 2, 5, 10, 15, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100, 120, 160, 200, 240, 280, 320 см) за три года измерений с учетом характеристик естественного излучения.

В обсерватории «Фоновая» авторами впервые получен годовой ход температуры почвы до глубины 320 см. Установлены даты смены температуры почвы с положительной на отрицательную и обратно (по шкале Цельсия) на разных глубинах до уровня 60 см.

Территория обсерватории «Фоновая» относится к району с большой продолжительностью сохранения снежного покрова. Период с устойчивым снежным покровом с *ноября по март*. В верхнем 20-ти сантиметровом слое отрицательные температуры были с *третьей декады ноября по апрель*. Процесс остывания почвы достаточно медленный. Если на глубине 2 см почва начинает промерзать в ноябре, то отрицательные t_n на глубине 50 см отмечены только в начале февраля (4.02.21–10.03.21 и 1.02.22–10.04.22). В конце ноября 2022 г. из-за небольшой высоты снежного покрова и низких температур воздуха ($-25\div-30^{\circ}\text{C}$) процесс остывания почвы ниже 20 см протекал быстрее. Так 28 ноября 2022 г. почвы промерзла до глубины 30 см, 9 декабря до 50 см, а 16 декабря до 60 см.

Положительные температуры почвы на всех уровнях в измеряемом слое зарегистрированы с мая по октябрь. До глубины 30 см почва начинает постепенно прогреваться с конца апреля.

Выделены 4 типа вертикальных профилей температуры почвы: зимний (ноябрь–март), весенний (апрель), летний (май–август) и осенний (сентябрь–октябрь). В период с зимним типом в верхнем 20-ти сантиметровом слое температура почвы изменяется в

диапазоне от $-1,48 \pm 0,81^{\circ}\text{C}$ (0см) до $-0,25 \pm 0,98^{\circ}\text{C}$ (20см), в период с летним типом от $14,06 \pm 3,56^{\circ}\text{C}$ (0см) до $12,64 \pm 3,96^{\circ}\text{C}$ (20см).

Работа выполнена в рамках государственного задания на оказание государственных услуг (выполнение работ) № 075-00713-22-02 от 14.10.2022, согласно распоряжению Правительства Российской Федерации от 02.09. 2022 № 2515-р.

1. Antonovich V.V., Antokhin P.N., Arshinov M.Yu., Belan B.D., Balin Yu.S., Davydov D.K., Ivlev G.A., Kozlov A.V., Kozlov V.S., Kokhanenko G.P., Novoselov M.M., Panchenko M.V., Penner I.E., Pestunov D.A., Savkin D.E., Simonenkov D.V., Tolmachev G.N., Fofonov A.V., Chernov D.G., Smargunov V.P., Yausheva E.P., Paris J.-D., Ancellet G., Law K.S., Pelon J., Machida T., Sasakawa M. Station for the comprehensive monitoring of the atmosphere at Fonovaya Observatory, West Siberia: current status and future needs // **Proceedings of SPIE**. 2018. V.10833. CID: 10833 7Z. [10833-189]. doi: 10.1117/12.2504388.

The results of soil temperature measurements at the Fonovaya observatory

T.K. Sklyadneva (tatyana@iao.ru), G.A. Ivlev, B.D. Belan
V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics of SB SO RAS, Tomsk, Russia

Employees of the Laboratory of Climatology of Atmospheric Composition of the IAO SB RAS began measuring temperature at different levels along the depth of the soil on the territory of the Fonovaya observatory since May 2020. The Fonovaya observatory is located on the eastern bank of the Ob River, 60 km west of Tomsk ($56^{\circ}25' \text{ N}$, $84^{\circ}04' \text{ E}$) [1]. Measurements of the soil temperature are carried out using a temperature profile probe containing digital sensors at different depth levels. The probe was developed at IMCES SB RAS. The measuring site under natural cover is located in an open, well-lit area. Temperature measurements at all levels are carried out every five minutes. The results are recorded in the database of the measuring complex of the Fonovaya observatory.

In this report, the results of measurements of soil temperature at different depths (0, 2, 5, 10, 15, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100, 120, 160, 200, 240, 280, 320 cm) during three years, taking into account the characteristics of natural radiation are presented.

The authors for the first time obtained the annual variation in soil temperature down to a depth of 320 cm at the Fonovaya observatory. The dates of the change in soil temperature from positive to negative and back (on the Celsius scale) at different depths up to a level of 60 cm were established.

The territory of the Fonovaya observatory refers to an area with a long duration of snow cover. Period with stable snow cover is from November to March. Negative temperatures for the upper 20 cm layer were from the third decade of November to April. The process of cooling the soil is quite slow. If at a depth of 2 cm the soil begins to freeze in November, then negative temperature at a depth of 50 cm was noted only in early February (02.04.21–03.10.21 and 02.01.22–10.04.22). At the end of November 2022, due to the low snow depth and low air temperatures (-25°C – -30°C), the process of soil cooling below 20 cm proceeded faster. So on November 28, 2022, the soil was frozen to a depth of 30 cm, on December 9 was to 50 cm, and on December 16 was to 60 cm.

Positive soil temperatures at all levels in the measured layer were recorded from May to October. The soil to a depth of 30 cm begins to gradually warm up from the end of April.

Four types of vertical soil temperature profiles have been identified: winter (November–March), spring (April), summer (May–August), and autumn (September–October). In the period with the winter type in the upper 20 cm layer, the soil temperature varies in the range from $-1.48 \pm 0.81^{\circ}\text{C}$ (0 cm) to $-0.25 \pm 0.98^{\circ}\text{C}$ (20 cm); in the period with the summer type it varies from $14.06 \pm 3.56^{\circ}\text{C}$ (0cm) up to $12.64 \pm 3.96^{\circ}\text{C}$ (20cm).

The work was carried out within the framework of the state task for the provision of public services (performance of work) No. 075-00713-22-02 dated 10/14/2022, in accordance with the order of the Government of the Russian Federation dated 02.09. 2022 No. 2515-р.

1. Antonovich V.V., Antokhin P.N., Arshinov M.Yu., Belan B.D., Balin Yu.S., Davydov D.K., Ivlev G.A., Kozlov A.V., Kozlov V.S., Kokhanenko G.P., Novoselov M.M., Panchenko M.V., Penner I.E., Pestunov D.A., Savkin D.E., Simonenkov D.V., Tolmachev G.N., Fofonov A.V., Chernov D.G., Smargunov V.P., Yausheva E.P., Paris J.-D., Ancellet G., Law K.S., Pelon J., Machida T., Sasakawa M. Station for the comprehensive monitoring of the atmosphere at Fonovaya Observatory, West Siberia: current status and future needs // **Proceedings of SPIE**. 2018. V.10833. CID: 10833 7Z. [10833-189]. doi: 10.1117/12.2504388.

Постерная сессия

Анализ влияния колебаний АМО на изменение климата в Арктике

Башкиров Л.Н. (lev.bashkirov@gmail.com), Покровский О.М. (pokrov_06@mail.ru)
Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург, Россия

В статье исследуется влияние колебаний средней температуры поверхности северной части Атлантического океана (индекс АМО — Atlantic Multidecadal Oscillation), на изменения температуры поверхности Северного Ледовитого океана (СЛО) и концентрацию льда в Арктике. Для выявления статистических связей применялся аппарат эмпирических ортогональных функций (ЭОФ) и кросс-корреляционный анализ.

Исследование климатических процессов, происходящих в Арктике, - очень актуальный вопрос современности как для развития дальнейшего использования северных регионов в народном хозяйстве, так и для изучения глобальных изменений климатических условий на Земле в долгосрочной перспективе.

Последние несколько десятилетий все внимание учёных было сосредоточено на проблеме глобального потепления, основной причиной которого считалось негативное антропогенное воздействие. Однако, климат планеты зависит не только от деятельности человечества. Потепления климата происходили и в доиндустриальную эпоху. Нетрудно предположить, что на климат влияют и другие факторы - естественные, в том числе изменения температуры поверхности Мирового океана (ТПО).

В этой работе в качестве предиктора были выбраны временные ряды АМО и изучена их кросс-корреляция с ТПО СЛО в летний сезон (июнь - август) и за сезон зима - начало весны (январь - март), а также концентрацией льда в период январь - март.

По результатам работы было получено поле коэффициентов кросс-корреляции между АМО и ТПО Арктической области в летний период по данным с 1980 по 2020 годы, где наблюдается обширная зона с прямой связью между исследуемыми величинами, причём коэффициент корреляции в среднем составляет 0,78 и локально достигает 0,89.

В период зимы - начала весны (январь - март) также имеется широкая полоса прямого влияния предиктора на ТПО СЛО с коэффициентом корреляции около 0,8.

Проанализировав кросс-корреляцию концентрации льда от аномалии АМО в период январь - март по данным с 1983 по 2020 год, можно сделать вывод об обратной зависимости этих климатических параметров, так как коэффициент корреляции отрицательный. При этом зависимость величин достигает -0,7. Уровень статистической значимости всех полученных кросс-корреляционных величин составляет 90%.

Приведённые в данной работе три примера с полным основанием подтверждают предположение о связи температуры поверхности Северного Ледовитого океана и

концентрации льда в Арктике с колебаниями АМО, причём выявленные статистические связи оказались довольно значительными, коэффициент корреляции достигал 0,9. При этом максимальная корреляция наблюдалась в субарктическом регионе.

Таким образом, оправдано рассматривать продолжение исследований в области применения статистических методов в прогнозировании изменения климата в долгосрочной перспективе.

Analysis of the impact of AMO oscillations on climate change in the Arctic

L.N. Bashkirov, O.M. Pokrovsky

Russian State Hydrometeorological University, Saint Petersburg, Russia

The article discusses the impact of changes in the average surface temperature of the northern part of the Atlantic Ocean (AMO index - Atlantic Multidecadal Oscillation) on changes in the surface temperature of the Arctic Ocean (AO) and ice density in the Arctic. To check the register of links, the apparatus of empirical orthogonal functions (EOF) and cross-correlation analysis are used.

The study of climatic processes occurring in the Arctic is a very topical issue of our time both for the development of the further use of the northern regions in the economy, and for the study of global changes in climatic conditions on Earth in the long term.

Over the past few decades, all the attention of scientists has been focused on the problem of global warming, the main cause of which was considered to be negative anthropogenic impact. However, the climate of the planet depends not only on the activities of mankind. Climate warming also existed in the pre-industrial era. It is not difficult to assume that other factors also influence the climate - natural ones, including changes in the temperature of the surface of the World Ocean (SST).

In this work, AMO SST time series were chosen as a predictor and their cross-correlation with the surface temperature of the Arctic Ocean in the summer season (June - August) and winter season - early spring (January - March), as well as ice concentration in the period January - March.

Based on the results of the work, a field of cross-correlation coefficients was obtained between AMO and SST of the Arctic region in the summer period according to data from 1980 to 2020, where there is a vast zone with a direct relationship between the studied values, and the correlation coefficient reaches 0.9.

In the period of winter - early spring (January - March) there is also a wide band of direct influence of the predictor on with a correlation coefficient of 0.8.

After analyzing the cross-correlation of ice concentration from the AMO anomaly in the period January - March according to data from 1983 to 2020, we can conclude that these climatic parameters are inversely related, since the correlation coefficient is negative. In this case, the dependence of the values reaches -0.7. The significance level of all received fields is 90%.

The three examples given in this paper justifiably confirm the assumption that the temperature of the surface of the Arctic Ocean and the concentration of ice in the Arctic are related to the AMO anomaly, and the revealed statistical relationships turned out to be quite significant, the correlation coefficient reached 0.9. At the same time, the maximum correlation was observed in the subarctic region.

Thus, it is justified to consider the continuation of research in the field of application of statistical methods in predicting climate change in the long term.

Анализ изменений рассеянной солнечной радиации и современное изменение климата

Гудошникова О. А. (guggopo@gmail.com)

Главная геофизическая обсерватория им. А.И. Воейкова, Санкт-Петербург, Россия

В последнее время климатологи стали пристальнее изучать взаимосвязи между энергиями солнечной радиации: прямым лучевым потоком и рассеянным излучением неба. Наши знания об этих актинометрических компонентах все еще недостаточно глубоки, несмотря на текущие достижения. Понятно, что солнечная радиация является важной составляющей энергетического баланса Земли и, следовательно, понимание процессов, вызывающих её изменения имеет приоритетное значение для исследования глобального изменения климата. Важность темы очевидна и с точки зрения необходимости решать задачи использования возобновляемых источников энергии.

Целью данного исследования было проведение анализа данных наземных наблюдений рассеянной солнечной радиации (DSR, J/m^2). Источником данных стал архив Мирового центра радиационных данных (МЦРД, ФГБУ «ГГО» Санкт Петербург).

Имеется весьма небольшое пространственное количество станций, измеряющих DSR с высоким качеством наблюдений. Этому требованию удовлетворяют станции Глобальной Службы Атмосферы ГСА (GAW). Автор остановил выбор на станциях Европы. Метеорологическая обсерватория в Хоэнпайсенберге (Германии) - старейшая горная станция в мире, со статусом «глобальная» с 1995г. Тарту (Эстония) и Кишинев (Молдова) – станции регионального уровня. Дополнительно изучены эмпирические данные ст. Брауншвейг (Германия) и станций сети АЕМЕГ (Испания). Массив наблюдений с 1955 по 2022 гг.

В работе применялся метод анализа нормализованных средних межгодовых аномалий DSR. Была рассмотрена сезонная изменчивость DSR по 30, 10 и 5-летним периодам. Мы обратили внимание на климатические особенности изучаемых регионов. Отмечается взаимосвязь DSR со среднегодовой температурой воздуха, количеством осадков в этих регионах. Анализ актинометрических рядов во времени позволил оценить тенденции DSR.

Результаты исследования подтверждают факт, ранее обнаруженный испанскими учеными, о снижении диффузного компонента в последнее 30-летие, из-за чего прямая радиация имеет положительный тренд.

Увеличение числа актинометрических станций с измерениями DSR позволило бы включить этот параметр в состав репрезентативных дополнительных индикаторов глобального изменения климата, хотя и имеются неопределённости.

Analysis of changes in diffuse solar radiation under the conditions of modern climate change

O. Gudoshnikova (guggopo@gmail.com)

Voeikov Main Geophysical Observatory, Saint Petersburg, Russia

Recently, climatologists have begun to actively study the relationship between the energies of solar radiation: the flow of direct rays and scattered radiation. Our knowledge of the relationship between these actinometric components is still insufficient despite modern advances. It is clear that solar radiation is an important component of the Earth's energy balance and, therefore, understanding the processes that cause its changes is of priority importance for the study of global climate change. The importance of this topic is also obvious from the point of view of the need to solve the problems of using renewable energy sources.

Our research shows analyzes from ground observations diffuse solar radiation (DSR) data archived at the World Center for Radiation Data (WRDC, FGBU “MGO”, St. Petersburg) for stations with a long series of observations (the data collected between 1955-2022). The author focused on the geographical locations of Europe. The complexity of site selection lies in the small spatial number of ground-based actinometric stations that measure DSR with a high quality of observations. These requirements are met by Global Atmosphere Watch (GAW) stations: Tartu (Estonia), Hohenpassenberg (Germany), Chisinau (Moldova). In addition, we present empirical data from station Braunschweig (Germany) and AEMET (Spain).

We used the method of analysis of the interannual variability of the normalized DSR anomalies (%). The seasonal variability of DSR was also considered taking into account the climatic features of these regions. An analysis of the actinometric series over the historical period made it possible to assess the trends in the average annual variation of DSR. Data observations for 30-year, 10-year and 5-year periods were considered. The relationship between DSR and the mean annual of air temperature, precipitation at these stations is noted.

A significant increase in the number of actinometric stations measuring DSR would make it possible to include this parameter in additional representative indicators of global climate change, although there are uncertainties here as well.

Научно-методические аспекты модернизации актинометрических наблюдений на сети Росгидромета

Махоткин А.Н. (actinom@mail.ru), Махоткина Е.Л., Ерохина А.Е.

Главная геофизическая обсерватория им. А.И. Воейкова, Санкт-Петербург, Россия

Актинометрические наблюдения организуются исключительно на базе действующих метеорологических климатических станций, которые в соответствии с приказом Росгидромета № 128 от 23.03.2016 не подлежат закрытию и сокращению объемов и программ наблюдений. Острая необходимость в переоснащении актинометрической сети новыми приборами и автоматизированными измерительными системами обусловлена тем, что для проведения наблюдений до последнего времени использовалось (и продолжает использоваться) морально устаревшее оборудование, многократно выработавшее свой ресурс.

Модернизация сети осуществлялась поэтапно. На 1-м этапе было проведено переоснащение пунктов, работающих по программе непрерывной регистрации составляющих радиационного баланса, которая является наиболее информативной по сравнению с сокращенной и срочными наблюдениями, как в плане состава информации, так и по их временному разрешению. Автоматизированные комплексы (ААК и АИК) обеспечивают получение дополнительной информации: в ААК — это входящая (Е_а) и уходящая (Е_з) длинноволновая радиация и ультрафиолетовая радиация в областях спектра А и В (измеряется ААК расширенной комплектации), продолжительность солнечного сияния, в АИК — продолжительность солнечного сияния. По проекту «Модернизация-1» и по плану реализации ФЦП «Геофизика» автоматизированными актинометрическими комплексами были оснащены 28 станций.

На 2-м этапе модернизации, завершившемся в 2022 г., на актинометрической наблюдательной сети было оснащено новым оборудованием 98 актинометрических станций, что позволило заменить рабочие средства измерения для срочных наблюдений и интегрирования суммарной радиации. В результате на 43-х станциях было восстановлено выполнение программ актинометрических наблюдений в полном объеме, а на ряде станций наблюдения были возобновлены после продолжительного перерыва.

Внедрение нового оборудования потребовало пересмотра требований к размещению СИ на площадке, определения нового порядка выполнения наблюдений, модернизации методики обработки, представления и обобщения результатов актинометрических измерений. Эти вопросы были решены в процессе подготовки новых методических документов, в которых были регламентированы правила установки и эксплуатации нового актинометрического оборудования и определены методика проведения наблюдений, обработка их результатов и передача месячных массивов, данных со станции в УГМС/ЦГМС и ГГО.

На всех этапах модернизации замена оборудования сопровождалась проведением сравнительных наблюдений, анализ которых показал, что при условии соблюдения методики выполнения наблюдений и надежности переводных множителей (чувствительности) датчиков сходимость, получаемых данных не выходит за пределы основной погрешности датчиков.

После ввода в постоянную эксплуатацию новых комплектов актинометрического оборудования на сети Росгидромета общее количество станций, проводящих актинометрические наблюдения должно составить около двухсот.

Scientific and methodological aspects of the modernization of actinometric observations on the network of Roshydromet

A.N. Makhotkin (actinom@mail.ru), E.L. Makhotkina, A.E. Erokhina
Voeikov Main Geophysical Observatory, Saint Petersburg, Russia

Actinometric observations are organized on the basis of meteorological stations of the climate network of Roshydromet. The climate network is not subject to the closure and reduction of observation programs in accordance with the Roshydromet order No. 128 of 03/23/2016. The need to equip the actinometric network with new instruments and automated measuring systems is due to the fact that obsolete, outdated equipment was used for observations.

The network upgrade was carried out in stages. At the 1st stage, re-equipment of the stations operating under the program of continuous registration of the radiation balance components, the most informative both in terms of the information content and temporal resolution, was carried out.

Automated complexes provide additional information on downward and upward longwave radiation and ultraviolet radiation in the spectral regions A and B and the duration of sunshine. 28 stations were equipped with automated actinometric complexes in accordance to the projects «Modernization-1» and «Geophysics».

At the 2nd stage of modernization, which ended in 2022, 98 actinometric stations were equipped with new instruments for scheduled observations and integration of total radiation. As a result, at 43 stations, the programs of actinometric observations were fully resumed, and at a number of stations observations were resumed after a long break.

The use of new equipment demanded a revision of the requirements for placement of measuring instruments on meteorological sites, development of a new procedure for performing observations, modernization of the processing technique, presentation and generalization of the results of actinometric measurements.

These issues were resolved in new methodological documents, which regulate the rules for installing and operating new actinometric equipment and determine the methodology for conducting observations, processing the results and transferring monthly arrays of data from the station to the Regional Roshydromet Departments and MGO.

At all stages of modernization the replacement of equipment was accompanied by comparative observations.

The analysis showed that the reproducibility of the obtained data does not go beyond the basic error of the sensors if the methodology of performed observations is kept and the conversion factors (sensitivity) of the sensors are reliable.

The total number of stations conducting actinometric observations on the Roshydromet network should be about two hundred after the commissioning of new actinometric equipment.

Об оценке влияния радиационно активных газов и аэрозолей на межгодовые изменения климата и возможности управлять им

Солдатенко С.А. (soldatenko@aari.ru)

Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, Россия

Исследование климата, его изменений и изменчивости, как результат воздействия природных и антропогенных факторов, осуществляется с помощью математических моделей земной климатической системы (ЗКС), а в последнее время, моделей земной системы, имеющих различную степень сложности. Спектр проблем, которые решаются с помощью моделей ЗКС достаточно широк и разнообразен, включая исследование влияния на климат радиационно активных газов и аэрозолей (ААГ), как природных, так и продуцируемых деятельностью человека. Обычно сценарии внешнего воздействия на ЗКС определенным образом задаются. Это может быть, например, параметризованный радиационный форсинг на верхней границе атмосферы. В докладе рассматриваются климатические модели низкого порядка, позволяющие не только оценить влияние естественных и антропогенных ААГ на ЗКС, но и сформировать оптимальные сценарии управления климатом Земли посредством контролируемого изменения радиационного баланса на верхней границе земной атмосферы (ВГА), что может быть обеспечено, например, введением в верхнюю атмосферу Земли аэрозоля, частично отражающего солнечную радиацию. Отметим, что климатические модели низкого порядка являются очень эффективным инструментом исследования, позволяющим с минимальными вычислительными затратами получить реалистичные оценки возможного влияния внешнего радиационного воздействия на ЗКС.

В простых климатических моделях радиационный форсинг, обусловленный ААГ, описывается элементарными функциями некоторых детерминирующих параметров. В наиболее простых (однофакторных) схемах параметризации детерминирующим параметром для атмосферного аэрозоля служит оптическая толщина, а для радиационно-активного газа – его концентрация в атмосфере. Отклик ЗКС на радиационный форсинг, генерируемый изменением содержания ААГ в атмосфере согласно заданному сценарию, в простых климатических моделях вычисляется численно, или, если это возможно, аналитически. Однако, если мы используем линеаризованную относительно некоторого равновесного климатического состояния модель ЗКС, то тогда реакция ЗКС на радиационный форсинг, обусловленный ААГ, может быть оценена с помощью импульсной переходной функции (ИПФ). Если модель ЗКС представляет собой совокупность линейных дифференциальных уравнений, то ИПФ $h(t)$ может быть определена аналитически или численно при заданных начальных условиях. Реакция ЗКС на внешнее произвольное радиационное воздействие $F(t)$, приложенное в момент времени $t = 0$, определяется как свертка двух функций – функции, описывающей радиационный форсинг $F(t)$, и ИПФ $h(t)$:

$$T(t) = (h * F)(t) = \int_0^t h(\tau)F(t - \tau)dt, \quad (1)$$

Здесь через T обозначена, для определенности, глобально-осредненная аномалия (отклонение от некоторой нормы) приповерхностной температуры воздуха.

Импульсная характеристика $h(t)$ описывает реакцию динамической системы на внешнее воздействие, заданное в виде дельта-функции Дирака $\delta(t)$ при нулевых начальных условиях. Один из методов нахождения $h(t)$ основывается на применении обратного преобразования Лапласа к передаточной функции системы. Если $H(p)$ – передаточная функция, где p – оператор передаточной функции, то тогда $h(t) = L^{-1}\{H(p)\}$. Итак, чтобы найти $h(t)$ нам необходимо определить $H(p)$. Для ряда простых моделей ЗКС нами получены соответствующие передаточные функции и, затем, ИПФ:

$$h(t) = L^{-1}\{H(p)\} = \frac{1}{2\pi i} \int_{\sigma-i\infty}^{\sigma+i\infty} H(p)e^{pt} dp = \sum_{j=1}^n \text{Res } H(p)e^{pt} \Big|_{p=p_j}, \quad (2)$$

где p_j – полюсы передаточной функции (корни полинома в знаменателе передаточной функции). Интегрирование в (2) производится вдоль прямой $Re(p) = \sigma, \sigma > p_j (j = 1, n)$.

Задавая сценарии радиационного воздействия на ЗКС, мы легко можем оценить по формуле (1), как это воздействие скажется на аномалии среднеглобальной приповерхностной температуры.

Поскольку современное изменение климата, проявляющееся как глобальное потепление, имеет практически неуправляемый характер, нами разработан подход, основанный на теории оптимального управления (ОУ), обеспечивающий разработку сценариев стабилизации климата. Задача ОУ решена аналитически с помощью классического метода – метода максимума Понтрягина. Рассмотренный подход может быть использован при проектировании систем управления климатическими процессами.

On estimating the effects of radiatively active gases and aerosols on interannual climate changes

S.A. Soldatenko (soldatenko@aari.ru)

Arctic and Antarctic Research Institute, Saint-Petersburg, Russia

The study of climate, its change and variability due to the effects of natural and anthropogenic factors is implemented using mathematical models of the Earth's climate system (ECS), and more recently, models of the Earth's system with varying degrees of complexity. The range of problems that are solved with ECS models is quite wide and varied, including the study of the influence of radiatively active aerosols and gases (AAG), both natural and produced by human activities, on the climate. Usually, scenarios of external forcing are specified in a certain way. For example, it can be a parameterized radiative forcing at the top of the atmosphere (TOA). Here we present low-order climate models that allow not only to estimate the effects of natural and anthropogenic AAG on the ECS, but also to design optimal scenarios for manipulating the Earth's climate via a controlled change in the radiation balance at the TOA, which can be ensured, for example, by injecting aerosol, partly reflecting solar radiation, into the Earth's upper atmosphere. Note that low-order climate models are a very effective research tool that allows one to obtain realistic estimates of the possible effects of radiative forcing on the ECS with minimal computational costs.

In simple climate models, AAG-induced radiative forcing is described by elementary functions of some determining parameters. In the simplest (one-factor) parametrization schemes, the determining parameter for atmospheric aerosol is the optical thickness, and for a radiation-active gas, its concentration in the atmosphere. The response of the ECS to radiative

forcing, generated by the change in the AAG content in the atmosphere according to a given scenario, in simple climate models is calculated numerically or, if possible, analytically. However, if we apply the ECS model linearized with respect to some equilibrium climatic state, then the ECS response to AAG-induced radiative forcing can be estimated using the impulse response function (IRF). If the ECS model is a set of linear differential equations, then the IRF $h(t)$ can be determined analytically or numerically under given initial conditions. The response of the ECS to an arbitrary radiative forcing $F(t)$, applied at the time $t = 0$, is defined as the convolution of two functions – the function describing the radiative forcing $F(t)$ and the IRF $h(t)$:

$$T(t) = (h * F)(t) = \int_0^t h(\tau)F(t - \tau)dt, \quad (1)$$

Here, T denotes, for definiteness, the globally averaged anomaly (deviation from a certain norm) of the air surface temperature.

The impulse response $h(t)$ describes the response of dynamic system to an external perturbation given as the Dirac delta function $\delta(t)$ with zero initial conditions. One of the methods for finding $h(t)$ is based on applying the inverse Laplace transform to the system transfer function.

If $H(p)$ is the transfer function, where p is the transfer function operator, then $h(t) = L^{-1}\{H(p)\}$. So, to find $h(t)$ we need to determine $H(p)$. For a number of simple ECS models, we obtained the corresponding transfer functions and, then, the IRF:

$$h(t) = L^{-1}\{H(p)\} = \frac{1}{2\pi i} \int_{\sigma-i\infty}^{\sigma+i\infty} H(p)e^{pt} dp = \sum_{j=1}^n \text{Res } H(p)e^{p_j t} \Big|_{p=p_j}, \quad (2)$$

where p_j are the poles of the transfer function (the roots of the polynomial in the denominator of the transfer function). Integration in (2) is performed along the straight line $Re(p) = \sigma, \sigma > p_j (j = 1, n)$.

By setting the scenarios of the radiation forcing, we can easily estimate, using formula (1), how this forcing will affect the anomalies of the global mean surface temperature.

Since the current climate change, which manifests itself as global warming, is practically uncontrollable, we have developed an approach based on the theory of optimal control (OC) that ensures the development of climate stabilization scenarios. The OC problem is solved analytically using the classical method, the Pontryagin maximum principle. The considered approach can be used in the design of climate control systems.

Использование эмпирических моделей для оценки суммарной солнечной радиации по данным метеорологической сети России

Задворных В.А. (sun@main.mgo.rssi.ru), Стадник В.В., Трофимова О.В.
 Главная геофизическая обсерватория им. А.И. Воейкова, Санкт-Петербург, Россия

При исследованиях радиационного режима, касающихся изменения климата и решении многих прикладных задач, в том числе связанных с оценкой солнечной радиации как энергетического ресурса, имеющийся материал прямых измерений элементов радиационного баланса, опубликованный в климатических справочниках, ограничен и практически недостаточен для решения многих вопросов. В связи с этим большое значение имеет уточнение косвенных методов расчета с использованием современных данных наблюдений.

В актинометрических исследованиях было предложено и применялось большое число эмпирических и полуэмпирических формул для расчета коротковолновой солнечной радиации, приходящей на земную поверхность. Эти формулы основывались на

закономерностях и связях, существующих между характеристиками радиационного и метеорологического режима.

Результаты выполненной работы показывают, что для территории России, где имеются обширные территории с отсутствием актинометрических наблюдений, оценку суммарной солнечной радиации при действительных условиях облачности целесообразно производить по уточненным эмпирическим формулам с использованием данных продолжительности солнечного сияния и общего количества облаков.

Особое внимание уделено оценке возможных сумм радиации при среднем состоянии прозрачности атмосферы и полном отсутствии облачности, поскольку от их достоверности зависит ошибка косвенного расчета суммарной радиации. При оценке возможных сумм суммарной радиации с использованием данных за 60 лет актинометрических наблюдений учитывались изменения прозрачности атмосферы, связанные с влиянием вулканических извержений, а также сокращением антропогенных выбросов из-за спада промышленного производства.

Выполненное уточнение основных параметров, входящих в эмпирические формулы – возможных сумм радиации и эмпирических коэффициентов, по современным актинометрическим данным, и обобщение их по территории позволяют с достаточной точностью рассчитывать месячные суммы суммарной радиации для любой точки, где имеется информация о продолжительности солнечного сияния и общем количестве облаков.

Use of empirical models to estimate total solar radiation according to the data of the Russian meteorological network

V.A. Zadvornykh (sun@main.mgo.rssi.ru), V.V. Stadnik, O.V. Trofimova
Voeikov Main Geophysical Observatory, Saint Petersburg, Russia

When studying the radiation regime related to climate change and solving many applied problems, including those related to the assessment of solar radiation as an energy resource, the available material for direct measurements of the elements of the radiation balance, published in climate reference books, is limited and practically insufficient to solve many problems. In this regard, it is of great importance to refine indirect calculation methods using modern observational data.

In actinometric studies, a large number of empirical and semi-empirical formulas have been proposed and applied to calculate the short-wave solar radiation coming to the earth's surface. These formulas were based on the regularities and relationships that exist between the characteristics of the radiation and meteorological regimes.

The results of the work performed show that for the territory of Russia, where there are vast territories with no actinometric observations, it is advisable to estimate the total solar radiation under actual cloudiness conditions using refined empirical formulas using data on the duration of sunshine and the total amount of clouds.

Particular attention is paid to estimating the possible amounts of radiation at an average state of atmospheric transparency and the complete absence of cloudiness, since the error in the indirect calculation of the total radiation depends on their reliability. When assessing the possible amounts of total radiation using data for 60 years of actinometric observations, changes in atmospheric transparency associated with the influence of volcanic eruptions, as well as a reduction in anthropogenic emissions due to a decline in industrial production, were taken into account.

The clarification of the main parameters included in the empirical formulas - the possible amounts of radiation and empirical coefficients, according to modern actinometric data, and their generalization through the territory make it possible to calculate with sufficient accuracy the monthly sums of the total radiation for any point where there is information on the duration of sunshine and the total amount clouds.

**СЕКЦИЯ 7. ХАРАКТЕРИСТИКИ ВОЛН, МАКРОЦИРКУЛЯЦИЯ и ДИНАМИЧЕСКИЕ
ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ в АТМОСФЕРАХ ЗЕМЛИ и ДРУГИХ ПЛАНЕТ**

Председатель: д.ф.-м.н. **Гаврилов Н.М.** (СПбГУ, Санкт-Петербург, Россия)

Сопредседатели: д.ф.-м.н. **Коваль А.В.** (СПбГУ, Санкт-Петербург, Россия), д.т.н. **Кулешов Ю.В.** (ВКА, Санкт-Петербург, Россия)

**SESSION 7. WAVE CHARACTERISTICS, MACROCIRCULATION and DYNAMICS INTERACTIONS IN
ATMOSPHERES of the EARTH and OTHER PLANETS**

Chairman: Dr. **N.M. Gavrilov** (SPbSU, Saint Petersburg, Russia)

Co-chairmen: Dr. **A.V. Koval** (SPbSU, Saint Petersburg, Russia), Dr. **Yu.V. Kuleshov** (Mozhaisky
MAA, Saint Petersburg, Russia)

Устные доклады

Акустическое зондирование неоднородной структуры верхней атмосферы

Куличков С.Н. (snk@ifaran.ru), Чунчuzов И.П., Попов О.Е., Чуличков А.И., Закиров М.Н.,
Мишенин А.А., Буш Г.А., Цыбульская Н.Д., Голикова Е.В.
Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия

Представлен метод декомпозиции (разложение на N и U-волны) инфразвуковых сигналов, соответствующих частичному отражению зондирующих импульсов N – волны от тонких анизотропных слоев атмосферы, и регистрируемых в областях геометрической тени на больших расстояниях от взрывов и извержений вулканов. Метод позволяет выделять из сигнала компоненты известной формы и определять их параметры (амплитуду, сдвиг, ширину). Предложенный метод может использоваться для поиска в сигнале компонент произвольной известной формы. Применение метода к реальным сигналам, зарегистрированным в области геометрической тени, показывает его высокую эффективность. Метод декомпозиции позволяет определять недоступные для определения другими методами вертикальные градиенты эффективной скорости звука (скорость звука плюс скорость ветра в направлении распространения).

Работа была выполнена при частичной финансовой поддержке гранта РФФИ No 21-17-00021.

Acoustic probing of the anisotropic structure of the upper atmosphere

S.N. Kulichkov (snk@ifaran.ru), I.P. Chunchuzov, O.E. Popov, A.I. Chulichkov, M.N. Zakirov, A.A.
Mishenin, G.A. Bush, N.D. Tsybulskaya, E.V. Golikova
A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics RAS, Moscow, Russia

A decomposition method (decomposition into N and U- waves) of infrasonic signals corresponding to partial reflection of N-wave sounding pulses from thin anisotropic atmospheric layers and recorded in areas of geometric shadow at large distances from explosions and volcanic eruptions is presented. The method allows you to isolate components of a known shape from the signal and determine their parameters (amplitude, shift, width). The proposed method can be used to search for components of arbitrary known shape in the signal. The application of the method to real signals registered in the geometric shadow region shows its high efficiency. The decomposition method makes it possible to determine the vertical

gradients of the effective sound speed (sound speed plus wind speed in the direction of propagation) that are not available for determination by other methods.

This investigation work was carried out with partial financial support from the RSF grant No. 21-17-00021.

Взаимодействие тропосферы и стратосферы до и после усиления Арктики 2000-х: изменчивость нелинейных процессов и корреляционные паттерны.

Зоркальцева О.С.¹(meteorologist-ka@yandex.ru), Антохина О.Ю.², Антохин П.Н.²,
Артамонов М.Ф.¹

¹*Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия*

²*Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, Томск, Россия*

Данные мониторинга показывают рост глобальной температуры тропосферы с середины XX века, а глобальная температура стратосферы, наоборот, снижается. Эти изменения в первую очередь связаны с увеличением концентрации парниковых газов и истощением стратосферного озона. На фоне глобальных изменений остается открытым вопрос об изменчивости нелинейных процессов, таких как блокирующие антициклоны в тропосфере и внезапные стратосферные потепления в стратосфере (ВСП). В данной работе рассмотрены корреляционные паттерны (КП) температуры в стратосфере (10 и 1 гПа) и индекса мгновенных блокингов (500 гПа) в различных долготных секторах по данным ERA5. КП свидетельствуют об увеличении линейных связей между повторяемостью блокингов и температурой в стратосфере после 2000г., что может свидетельствовать об усилении тропосферно-стратосферных взаимодействий в период «Усиления Арктики». Усиление взаимодействий между тропосферой и стратосферой, вероятно, является одной из причин более ранних сроков начала ВСП в последние десятилетия.

Работа выполнена при поддержке проекта РФФ № 22-77-10008.

Troposphere-stratosphere interaction before and after the Arctic Amplification in the 2000s: variability of nonlinear processes and correlation patterns

O.S. Zorkaltseva¹(meteorologist-ka@yandex.ru), O.Yu. Antokhina², P.N. Antokhin², M.F. Artamonov¹

¹*Institute of Solar Terrestrial Physics SB RAS, Irkutsk, Russia*

²*V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics of Siberian Branch of the RAS, Tomsk, Russia*

Monitoring data show an increase in the global temperature of the troposphere since the middle of the 20th century, while the global temperature of the stratosphere, on the contrary, is decreasing. These changes are primarily associated with increased concentrations of greenhouse gases and stratospheric ozone depletion. Against the background of global changes, the question of the variability of nonlinear processes, such as blocking anticyclones in the troposphere and sudden stratospheric warmings in the stratosphere (SSW), remains open. In this paper, correlation patterns (CPs) of temperature in the stratosphere (10 and 1 hPa) and the index of instantaneous blockings (500 hPa) in various longitude sectors according to ERA5 data are considered. The CPs indicate an increase in linear relationships between the frequency of blockings and temperature in the stratosphere after 2000, which may indicate an increase in tropospheric-stratospheric interactions during the period of the “Arctic Amplification”. The strengthening of interactions between the troposphere and stratosphere is probably one of the reasons for the earlier start of the SSW in recent decades.

This work was supported by the Russian Science Foundation project no. 22-77-10008.

Оценка атмосферных характеристик в приложении к астрономическим телескопам наземного базирования

Шиховцев А.Ю.¹(Ashikhovtsev@iszf.irk.ru), Ковадло П.Г.¹, Леженин А.А.²
(lezhenin@ommfao.sccc.ru), Градов В.С.³ (v.gradov@g.nsu.ru), Зайко П.О.⁴ (polly_lo@tut.by),
Хитриков М.А.⁴, Кириченко К.Е.¹, Дрига М.Б.¹, Киселев А.В.¹, Русских И.В.¹, Оболкин В.А.⁵
(obolkin@lin.irk.ru), Шиховцев М.Ю.⁵

¹Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия

²Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, Новосибирск, Россия

³Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

⁴Институт Природопользования НАН Беларуси, Минск, Беларусь

⁵Лимнологический Институт СО РАН, Иркутск, Россия

В настоящей работе демонстрируются возможности применения мезомасштабной модели WRF к описанию метеорологических характеристик в месте расположения Большого Солнечного Вакуумного Телескопа (БСВТ). Моделирование охватывало Байкальский регион, внешний домен имел размеры 1600 на 1600 км с горизонтальным разрешением 8 на 8 км. Размеры двух внутренних доменов соответственно 400 на 400 км и 100 на 100 км. Горизонтальное разрешение внутреннего домена составляло 500 на 500 м. Моделирование выполнено для условий низких приземных средних скоростей ветра (1 – 3 м/с) и визуальной оценки облачности до 3 баллов. Показано, что выбранные схемы параметризации атмосферного пограничного слоя (Yonsei University scheme) и приземного слоя (MM5-similarity scheme) в модели WRF позволяют удовлетворительно восстанавливать временные вариации скорости воздушных течений. С целью верификации данных моделирования вертикальных градиентов температуры воздуха и вертикальных сдвигов скорости ветра синхронно с мезомасштабным моделированием воздушных течений были выполнены измерения центров тяжести солнечных субизображений. Анализ центров тяжести солнечных субизображений проводился с использованием широко известной дифференциальной методики для устранения влияния механических вибраций конструкции телескопа. Амплитуда временных изменений центров тяжести солнечных субизображений определяется эволюцией турбулентных флуктуаций показателя преломления воздуха в направлении распространения излучения. Показано, что модель WRF, хотя и хорошо описывает временные вариации характеристики интегрального значения энергии турбулентности (с коэффициентом корреляции 0.9), но существенно занижает амплитудное значение интеграла по высоте. Различие по амплитуде ассоциируется с достаточно грубой моделью рельефа. Как показано, в работе С.А. Лысенко и П.О. Зайко актуализация цифровой модели пространственной структуры землепользования и биофизических характеристик (с более высоким разрешением), включая альбедо поверхности, позволяет существенно повысить качество диагностики и прогнозирования атмосферных характеристик. Мы считаем, что этот факт подтверждается сравнительно большей устойчивостью формы вертикальных профилей оптической турбулентности над гладкой водной поверхностью озера Байкал, определённых с привлечением данных модели WRF. В нашем случае учет «локальных» данных мачтовых измерений над местом расположения телескопа позволил уточнить зависимость между средними градиентами метеорологических характеристик и турбулентными флуктуациями. С учетом уточненных зависимостей оценены вариации характеристики интегрального значения энергии турбулентности: средняя абсолютная ошибка между измеренными и модельными значениями не превышает 0.5 угл.сек. Восстановленные интегральные оценки характеристик т.н. оптической турбулентности с

применением модели WRF хорошо согласуются с усреднёнными измеренными вариациями характеристики разрешающей способности телескопа в турбулентной атмосфере.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-29-01137, <https://rscf.ru/project/22-29-01137/>.

Estimation of atmospheric characteristics in application to ground-based astronomical telescopes

A.Yu. Shikhovtsev¹(Ashikhovtsev@iszf.irk.ru), P.G. Kovadlo¹, A.A. Lezhenin²(lezhenin@ommfao.sccc.ru), V.S. Gradov³(v.gradov@g.nsu.ru), P.O. Zaiko⁴(polly_lo@tut.by), M.A. Khitrykau⁴, K.E. Kirichenko¹, M.B. Driga¹, A.V. Kiselev¹, I.V. Russkikh¹, V.A. Obolkin⁵ (obolkin@lin.irk.ru), M.Yu. Shikhovtsev⁵

¹*Institute of Solar Terrestrial Physics SB RAS, Irkutsk, Russia*

²*Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS, Novosibirsk, Russia*

³*Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russia*

⁴*Institute of Nature Management of the National academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus*

⁵*Limnological Institute SB RAS, Irkutsk, Russia*

Possibilities of applying the WRF mesoscale model for description of meteorological characteristics at the Large Solar Vacuum Telescope (LSVT) site are demonstrated. Simulation are performed within the Baikal region. The largest domain have sizes of 1600 x 1600 km with a horizontal resolution 8 x 8 km. The sizes of the two internal domains are 400 x 400 km and 100 x 100 km, respectively. The horizontal resolution of the inner domain is 500 x 500 m. The simulations were performed for conditions of low surface average wind speeds (1–3 m/s), and for total cloud cover < 30%. It is shown that the chosen schemes of parametrization of the atmospheric boundary layer (Yonsei University scheme) and the surface layer (MM5-similarity scheme) in the WRF model make it possible to satisfactorily restore temporal variations in the wind velocities. In order to verify the simulation data (vertical air temperature gradients and vertical shears of wind speed) measurements of the gravity centers of solar subimages were performed synchronously with the mesoscale simulations. The analysis of the gravity centers of solar subimages was carried out using a well-known differential technique. Differential technique give possibility to eliminate the influence of mechanical vibrations of the telescope on image motion. The amplitude of temporal changes in the gravity centers of solar subimages is determined by the evolution of turbulent fluctuations in the air refractive index in the direction of radiation propagation. It is shown that the WRF model well describes the temporal variations in the characteristic of the integral turbulence energy (with a correlation coefficient of 0.9), but significantly underestimates the amplitude of the integral over height. The difference in amplitude is associated with a rather rough relief model. As shown by S.A. Lysenko and P.O. Zaiko, updating the digital model of the spatial structure of land use and biophysical characteristics (with a higher resolution), including surface albedo, can significantly improve the quality of diagnostics and forecasting of atmospheric characteristics. We believe that this fact is confirmed by the relatively greater stability of the shape of the vertical profiles of optical turbulence over the water surface of Lake Baikal, determined using WRF model data. In our case, taking into account the “local” mast measurement data above the telescope location made it possible to refine the relationship between the mean gradients of meteorological characteristics and turbulent fluctuations. Taking into account the refined dependences, the variations of the total turbulence energy are estimated: the mean absolute error between the measured and model values does not exceed 0.5 arcsec. Restored integral estimates of the

characteristics of optical turbulence using the WRF model are in good agreement with the averaged measured variations of resolution of the telescope in a turbulent atmosphere.

Численное моделирование влияния фазы КДК и ЭНЮК на распространение планетарных волн и формирование внезапного стратосферного потепления

Диденко К.А.^{1,2}(didenko.xeniya@yandex.ru), Коваль А.В.^{2,1}, Ермакова Т.С.^{1,2}

¹ *Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург, Россия*

² *Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия*

С использованием модели общей циркуляции средней и верхней атмосферы МСВА были получены ансамбли решений с целью исследования влияния фазы квазидвухлетнего колебания зонального ветра в экваториальной стратосфере (КДК) и Эль-Ниньо – Южного колебания (ЭНЮК) на структуру планетарных волн, а также на формирование и развитие внезапного стратосферного потепления (ВСП). Выполнены 4 ансамблевые расчёта (с учетом различных комбинаций восточной/западной фазы КДК и теплой Эль-Ниньо/холодной Ла-Нинья фазы ЭНЮК) для условий зимы Северного полушария (январь–февраль), каждый из которых состоит из 10 прогонов модели. Моделирование показало наличие ВСП, в том числе мажорных, почти во всех прогонах для условий Эль-Ниньо, восточная и Эль-Ниньо западная фаза КДК; и в половине прогонов Ла-Нинья, восточная фаза КДК. ВСП не моделировалось МСВА при условиях Ла-Нинья, западная фаза КДК. Шесть прогонов из ансамблей, в которых моделировалось ВСП, были усреднены относительно даты потепления, и полученные данные о температуре, зональном ветре и геопотенциале были обработаны. Результаты показали, что наибольшие амплитуды волн в геопотенциальной высоте, наибольшие увеличения стратосферной температуры и уменьшения мезосферной температуры наблюдаются при Эль-Ниньо, восточной фазе КДК. Наименьшие скорости западного ветра во время развития ВСП моделируются при Эль-Ниньо, западной фазе КДК.

Numerical modeling of QBO and ENSO phase impact on the propagation of planetary waves and the evolvment of sudden stratospheric warming

К.А. Didenko^{1,2}(didenko.xeniya@yandex.ru), A.V. Koval^{2,1}, T.S. Ermakova^{1,2}

¹ *Russian State Hydrometeorological University, Saint Petersburg, Russia*

² *Saint Petersburg State University, Russia, Saint Petersburg, Russia*

Using the general circulation model of the middle and upper atmosphere (MUAM), a number of numerical scenarios were implemented to study the impact of the phase of the Quasi- Biennial Oscillation of the zonal wind in the equatorial stratosphere (QBO) and the El Nino–Southern Oscillation (ENSO) on the structure of planetary waves, as well as on the formation and development of sudden stratospheric warming (SSW). The 4 ensemble calculations were performed (taking into account various combinations of the eastern/western phase of the QBO and the warm El Nino/cold La Nina phase of ENSO) for the winter conditions of the Northern hemisphere (January–February), each of which consists of 10 runs of the model. The simulation showed the occurrence of SSW, including major ones, in almost all runs for the conditions of El Nino, eastern and El Nino western QBO phase; and in half of the runs of La Nina, eastern QBO phase. The SSW was not simulated by the MUAM under the conditions of La Nina, the western QBO phase. Six runs from ensembles with the simulated SSW were averaged relative to the date of warming, and the obtained data on temperature, zonal wind and geopotential were processed. The results showed the greatest wave amplitudes in

geopotential height, the greatest positive anomalies of stratospheric temperature and negative anomalies of mesospheric temperature while El Nino, the eastern QBO phase. The lowest speeds of the westerly wind during the development of the SSW are simulated at El Nino, the western QBO phase.

Динамическое и тепловое воздействие орографических гравитационных волн: новая схема параметризации для ХКМ SOCOL_3

Коваль А.В.^{1,2,3} (a.v.koval@spbu.ru), Гаврилов Н.М.^{1,3}, В.А. Зубов^{3,4}, Е.В. Розанов^{3,5}

¹Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

²Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург, Россия

³Лаборатория исследования озонового слоя и верхней атмосферы, Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

⁴Главная геофизическая обсерватория имени А.И. Воейкова, Санкт-Петербург, Россия

⁵Давосская физико-метеорологическая обсерватория/Всемирный радиационный центр (PMOD/WRC), Давос, Швейцария

Распространение в атмосферу внутренних гравитационных волн (ВГВ) орографического происхождения играет важнейшую роль в формировании динамического и теплового режима атмосферы. Модели глобальной атмосферной циркуляции с достаточно низким разрешением (от 100 км) не способны прямо воспроизводить ВГВ, вследствие этого, для адекватного описания ускорений и притоков тепла, создаваемых диссипирующими ВГВ в атмосфере, используются различные схемы параметризации или задания их источников. В данном исследовании уточнены поляризационные соотношения для мезомасштабных стационарных орографических гравитационных волн (ОГВ) с учетом вращения Земли и получены новые выражения для расчета вертикальных профилей амплитуд ОГВ, волновых ускорений и притоков тепла. На базе новых уравнений разработана новая схема параметризации динамического и теплового воздействия ОГВ подсеточного масштаба для включения в модели глобальной атмосферной циркуляции.

Параметризация была включена в химико-климатическую модель SOCOL 3-й версии (ХКМ SOCOL_3), с которой далее был проведен ряд численных экспериментов. Сопоставление расчетов с данными реанализа MERRA2 показали, в частности, что применение новой параметризации позволило улучшить качество воспроизводимых модельных параметров, включая скорости ветра и температурный режим, по сравнению с ранее использовавшейся схемой. Кроме этого, новая параметризация в составе ХКМ SOCOL_3 является важным исследовательским инструментом, позволяющим впоследствии провести ряд исследований влияния ОГВ на динамический режим модельной атмосферы, ее температуру и состав.

Dynamical and thermal effects of orographic gravity waves: a new parametrization scheme for CCM SOCOL_3

A.V. Koval^{1,2,3} (a.v.koval@spbu.ru), N.M. Gavrilo^{1,3}, V.A. Zubov^{3,4}, E.V. Rozanov^{3,5}

¹Saint-Petersburg State University, Saint Petersburg, Russia

²Russian State Hydrometeorological University, Saint Petersburg, Russia

³Ozone layer and upper atmosphere research laboratory, Saint Petersburg State University, Saint Petersburg, Russia

⁴Voeikov Main Geophysical Observatory, Saint Petersburg, Russia

⁵Physikalisch-Meteorologisches Observatorium Davos/World Radiation Center (PMOD/WRC), Davos, Switzerland

The propagation of internal gravity waves (IGWs) of orographic origin into the atmosphere plays an important role in the formation of the dynamic and thermal regime of the atmosphere. Models of global atmospheric circulation with a relatively low resolution (100 km and more) are not capable of directly reproducing IGWs; therefore, to describe reasonably the accelerations and heat inflows created by dissipating IGWs in the atmosphere, various parameterization schemes or setting their sources are used. In this study, polarization relations for mesoscale stationary orographic gravity waves (OGWs) are refined taking into account the Earth's rotation and new equations are obtained for calculating the vertical profiles of OGW amplitudes, wave accelerations, and heat influxes. Based on the new equations, a new scheme for parameterization of the subgrid-scale dynamic and thermal effects of OGW was developed to be included in global atmospheric circulation models.

The parametrization was implemented into Chemistry Climate model SOCOL, ver.3 (CCM SOCOL_3) and further a number of numerical runs were carried out with the model. Comparison of the results of the calculations with the reanalysis data (MERRA_2) showed, in particular, that the use of the new parametrization made it possible to improve the quality of the reproduced model parameters, including wind speeds and temperature conditions, against the previously used scheme. In addition, the new parametrization as part of CCM SOCOL 3 is an important research tool that makes it possible to carry out in the future a number of studies of the OGW effect on the dynamic regime of the model atmosphere, its temperature and composition.

Характеристики внезапных стратосферных потеплений на разных высотах по данным метеорологического реанализа JRA-55

Ефимов М.М.(matvey.efimov.96@mail.ru), Гаврилов Н.М.(n.gavrilov@spbu.ru)
Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

Для автоматического определения внезапных стратосферных потеплений (ВСП), в качестве дат их начала и окончания предложено считать моменты экстремумов скорости изменений температуры и зональной скорости ветра, соответствующих экстремумам первой производной и нулевым значениям второй производной указанных величин по времени. Найдены даты ВСП на 30 и 40 км по базе данных JRA-55 за 59 лет. Показано, что даты максимальных скоростей изменения температуры и ветра отличаются не более, чем на два дня. Данные даты ВСП лежат в пределах неопределенностей других общепринятых методов нахождения дат ВСП. Были проанализированы различные типы ВСП и предложен способ их классификации. Были определены и учтены финальные потепления и ранние зимние потепления. Развитию ВСП предшествуют увеличения потоков тепла, направленных в сторону полюса, которые могут способствовать нагреванию полярной стратосферы. Финальные ВСП связаны с перестройкой циркуляции атмосферы.

Работа выполнена в Лаборатории исследований озонового слоя и верхней атмосферы СПбГУ при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (соглашение 075-15-2021-583).

Characteristics of sudden stratospheric warmings at different heights according to meteorological reanalysis data JRA-55

M.M. Efimov(matvey.efimov.96@mail.ru), N.M. Gavrilov(n.gavrilov@spbu.ru)
Saint-Petersburg State University, Saint Petersburg, Russia

For automatic searches for sudden stratospheric warming (SSW) events, their beginning/ending dates are defined as extrema of the first-order derivative simultaneous with zero values of the second derivative of temperature and zonal wind in time. A search for SSW dates for 30 and 40 km was performed, using the JRA-55 database for 59 years. The dates of the fastest change in temperature and zonal wind differ not more than two days for SSW searching the JRA-55 database. The SSW dates correspond, within the limits of the uncertainties, to those obtained with other standard methods. Various types of SSW were analyzed. An alternative SSW classification was proposed. Frequently, before SSW developments, increases in the heat fluxes directed to the North Pole occur, which can heat the polar stratosphere.

This study was made in the SPbSU Ozone Layer and Upper Atmosphere Research Laboratory supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (agreement 075-15-2021-583).

Исследование проявлений волновых возмущений в излучении атмосферной эмиссии 630.0 нм, стимулированных мощным КВ-радиоизлучением стенда СУРА

Белецкий А.Б.¹, Насыров И.А.², Подлесный С.В.¹, Емельянов В.В.², Сыренова Т.Е.¹

¹ ИСЗФ СО РАН, Иркутск, Россия

² ФГАОУ ВО «КФУ», Казань, Россия

В настоящее время можно считать, что экспериментально установлен факт генерации перемещающихся ионосферных возмущений (ПИБ) при воздействии на ионосферу мощным наземным радиоизлучением стенда СУРА [Nasyrov et al., 2016, Kogogin et al., 2017]. Установлено, что эти ПИБ могут распространяться на значительные (до 1000 км) расстояния как вдоль, так и поперёк силовых линий магнитного поля Земли. Очевидно, что из-за разности коэффициентов амбиполярной диффузии вдоль и поперек магнитного поля в ионосфере распространение искусственных возмущений заряженной компоненты на столь большие расстояния невозможно. Следовательно, передача подобных возмущений может осуществляться только за счет нейтральной компоненты верхней атмосферы. При этом концентрация заряженных частиц, на которые мощное коротковолновое излучение оказывает непосредственное воздействие, на высотах F-области ионосферы по сравнению с нейтральными атомами достаточно мала. Таким образом, вопрос о механизмах генерации перемещающихся волновых возмущений при воздействии мощной электромагнитной волны на верхнюю атмосферу остаётся открытым.

В работе представлен анализ большого массива данных экспериментальных кампаний 2012-2022 годов по регистрации свечения ионосферы, стимулированного мощным коротковолновым излучением стенда СУРА. Измерения проводились с помощью широкоугольной оптической системы КЕО Sentinel, устанавливаемой в разные годы как непосредственно рядом со стендом СУРА (п. Васильсурск, Нижегородская область, 56.10° с.ш. и 46.10° в.д., 2012 - 2015 гг), так и в 170 км к востоку от стенда (Магнитная обсерватория КФУ, п. Бело-Безводное, Республика Татарстан, 55.56° с.ш., 48.45° в.д. 2016 - 2022 гг). Оптическая система КЕО Sentinel предназначена для регистрации пространственного распределения интенсивности атмосферной эмиссии 630 нм и имеет следующие основные характеристики: поле зрения 145°, полуширина интерференционного фильтра 2 нм, время экспозиции 30 - 60 с. Оптические измерения в основном проводились во время работы стенда СУРА. Кроме того, при благоприятных погодных условиях, оптическая система работала вплоть до рассвета после выключения стенда. В ряде сеансов наблюдений для исследования естественной волновой активности оптическая система запускалась в дни, когда стенд СУРА не включался. В результате

детального анализа данных 79 сеансов наблюдения была получена статистика частоты регистрации перемещающихся волновых возмущений с периодами 15 - 60 минут, их пространственные характеристики, скорости и направление распространения для временных периодов с воздействием радиоизлучения стенда СУРА на ионосферу и без его воздействия.

Исследование выполнено за счет гранта РФФИ № 23-27-00323, <https://rscf.ru/project/23-27-00323/> на основе экспериментальных данных, полученных с использованием оборудования Центра коллективного пользования «Ангара» <http://ckp-rf.ru/ckp/3056/>.

1. Nasyrov I.A., Kogogin D.A., Shindin A.V., Zagretdinov R.V. The measurement of the ionospheric total content variations caused by a powerful radio emission of «Sura» facility on a network of GNSS-receivers//Advances in Space Research. 57 (2016). 1015 - 1020.

2. Kogogin D.A., Nasyrov I.A., Zagretdinov R.V., Grach S.M., Shindin A.V. Dynamics of large-scale ionospheric inhomogeneities caused by a powerful radio emission of the Sura facility from the data collected onto ground-based GNSS network // Geomagnetism and Aeronomy. – 2017. – Vol. 57, No. 1. – P. 93-106. – DOI 10.1134/S0016793217010054. – EDN YVJKKF

Study of the manifestations of wave disturbances in the 630.0 nm airglow caused by powerful radio emission of the SURA facility

A.B. Beletsky¹, I.A. Nasyrov², S.V. Podlesniy¹, V.V. Emelianov², T.E. Syrenova¹

¹ *Institute of Solar–Terrestrial Physics SB RAS, Irkutsk, Russia*

² *Institute of Physics, Kazan Federal University, Kazan, Russia*

It was experimentally proved that a powerful radio emission of the SURA facility can generate TIDs [Nasyrov et al., 2016, Kogogin et al., 2017]. In this case TIDs can propagate over long distances (up to 1000 km) both along and across the Earth's magnetic field components. Obviously, such long-distance propagation of the charged component disturbances transversely the magnetic field is impossible because of the differences of ambipolar diffusion coefficients in the ionosphere along and across the Earth's magnetic field. So, the transfer of those disturbances should be due to the neutral component of the upper atmosphere, i.e. the influence of powerful radio waves leads to the generation of wave disturbances in the upper atmosphere. The complexity of this problem results from the fact that the concentration of charged particles at the heights of the F-region of the ionosphere is quite small in comparison with concentration of neutral atoms and molecules. Thus, the question about the mechanism of perturbation transfer from charged particles heated by a powerful radio emission of SURA facility to the neutral particles of the ionosphere is still open.

The paper presents an analysis of a large data array of experimental campaigns of 2012-2022 on the registration of the ionospheric glow stimulated by powerful short-wave radiation from the SURA facility. The measurements were carried out using a wide-angle optical system KEO Sentinel, installed in different years both directly next to the SURA stand (Vasilsursk settlement, Nizhny Novgorod region, 56.10° N and 46.10° E, 2012 - 2015) and in 170 km east of the stand (KFU Magnetic Observatory, Belo-Bezvodnoe village, Republic of Tatarstan, 55.56° N, 48.45° E 2016 - 2022). The KEO Sentinel optical system is designed to register the spatial distribution of the atmospheric emission intensity of 630 nm and has the following main characteristics: field of view 145°, interference filter half-width 2 nm, exposure time 30 - 60 s. Optical measurements were mainly carried out during the operation of the SURA facility. In addition, under favorable weather conditions, the optical system worked until dawn after the stand was turned off. In a number of observation sessions to study natural wave activity, the optical system was launched on days when the SURA facility was not turned on. As a result of a detailed analysis of the data of 79 observation sessions, the statistics of the frequency of registration of moving wave disturbances with periods of 15 - 60 minutes, their spatial

characteristics, speeds and direction of propagation, for time periods with and without the impact of the SURA radio emission on the ionosphere, were obtained.

The study was funded by the RSF grant No. 23-27-00323, <https://rscf.ru/project/23-27-00323/> based on experimental data obtained using the Angara Multi-access Center facilities at the ISTP SB RAS <http://ckp-rf.ru/ckp/3056/>.

1. Nasyrov I.A, Kogogin D.A, Shindin A.V, Zagretdinov R.V. The measurement of the ionospheric total content variations caused by a powerful radio emission of «Sura» facility on a network of GNSS-receivers//Advances in Space Research. 57 (2016). 1015 - 1020.

2. Kogogin D.A., Nasyrov I.A., Zagretdinov R.V., Grach S.M., Shindin A.V. Dynamics of large-scale ionospheric inhomogeneities caused by a powerful radio emission of the Sura facility from the data collected onto ground-based GNSS network // Geomagnetism and Aeronomy. – 2017. – Vol. 57, No. 1. – P. 93-106. – DOI 10.1134/S0016793217010054. – EDN YVJKKF

Сопоставление вращательных температур ОН(6-2) и ОН(3-1), измеренных на станции Маймага (63.04° N, 129.51° E), с изменением солнечной и геомагнитной активности

Гаврильева Г. А.^{1,2} (gagavrilyeva@ikfia.ysn.ru), Аммосов П. П.¹, Колтовской И. И.¹

¹Институт космических исследований и аэронавтики им. Ю. Г. Шафера СО РАН, Якутск, Россия

²Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия

Представлено исследование долговременного изменения температуры области мезопаузы на высоте ночного излучения молекулы гидроксила ОН во время фазы спада 23 цикла, полностью 24 цикла и начала 25 цикла солнечной активности. Измерения ведутся инфракрасным спектрографом на станции Маймага (63°N, 129.5°E). Вращательная температура гидроксила принимается равной температуре нейтральной атмосферы на высоте ~ 87 км. С начала регулярных измерений в январе 1999 года по 2015 год регистрировались Р-ветви полосы ОН(6-2) в области длин волн 830-855 нм. Начиная с 2013 по настоящее время измеряется полоса ОН(3-1) в области длин волн 1510-1550 нм. Вращательная температура (ТОН) определяется подгонкой модельного спектра, рассчитанного для заранее заданной температуры, к измеренному спектру методом наименьших квадратов. В опубликованной ранее работе по данным, полученным с 1999 по 2015 годы, было показано, что максимум среднегодовых значений температуры запаздывает примерно на 2 года относительно максимума среднегодового потока радиоизлучения Солнца с длиной волны 10.7 см (F10.7) и коррелирует с изменением геомагнитной активности. В качестве меры геомагнитной активности был взят индекс Ap. При разделении средненочных ТОН(6-2) на две группы в соответствии с уровнем геомагнитной активности было обнаружено, что в годы с высокой активностью (Ap>8) температура мезопаузы с октября по март примерно на 10 К выше, чем в годы с низкой активностью (Ap<=8) (Gavrilyeva, Ammosov, Atmos Chem. Phys., V.18, P. 3363–3367, 2018 <https://doi.org/10.5194/acp-18-3363-2018>).

Аналогичный анализ проведен и для вращательных температур полосы ОН(3-1). Сопоставление среднегодовых значений ОН(3-1) с индексами F10.7 и Ap, которые измерялись на фазе спада солнечной активности 24 цикла и начала 25-го, не выявило явной связи ни с одним из них. Разделение средненочных значений ТОН(3-1) в соответствии с уровнем индекса Ap также не выявил различия температур. Следует отметить, что ряд ТОН(3-1) состоит из 9 среднегодовых значений, тогда как измерения ТОН(6-2) проводились в течение 16 сезонов. К тому же 24 цикл имел меньшую активность по сравнению с предыдущим циклом. Возможно дальнейшие наблюдения позволят более достоверно оценить влияние изменения солнечной активности на температуру атмосферы на высоте излучения ОН.

Comparison of OH(6-2) and OH(3-1) rotational temperatures measured at Maimaga station (63.04° N, 129.51° E) with variations in solar and geomagnetic activity

G.A. Gavrilyeva^{1,2}(gagavrilyeva@ikfia.ysn.ru), P.P. Ammosov¹, I.I. Koltovskoy¹

¹*Yu. G. Shafer Institute of Cosmophysical Research and Aeronomy of SB RAS, Yakutsk, Russia*

²*Institute of Solar Terrestrial Physics SB RAS, Irkutsk, Russia*

We present a study of the long-term temperature change of the mesopause region at the height of the night emission of the hydroxyl OH molecule during the declining phase of cycle 23, the fully 24th cycle and the beginning of cycle 25 of solar activity. Measurements are taken with an infrared spectrograph at Maimaga station (63°N, 129.5°E). The rotational hydroxyl temperature is assumed to be equal to that of the neutral atmosphere at an altitude of ~ 87 km. From the start of regular measurements in January 1999 to 2015, the P-branch of the OH(6-2) band was recorded in the 830-855 nm wavelength region. From 2013 onwards, the OH(3-1) band has been measured in the 1510-1550 nm wavelength region. The rotational temperature (TOH) is determined by fitting a model spectrum calculated for a predetermined temperature to the measured spectrum using the method of least squares. In a previously published paper using data from 1999 to 2015, it was shown that the maximum of the annual mean temperature values is delayed by about 2 years relative to the maximum of the annual mean solar radio emission flux at 10.7 cm (F10.7) and correlates with changes in geomagnetic activity. The Ap index was taken as a proxy of geomagnetic activity. When dividing mean TOH(6-2) into two groups according to the level of geomagnetic activity, it was found that in years with high activity (Ap>8) the mesopause temperature from October to March is about 10 K higher than in years with low activity (Ap<=8) [1]

A similar analysis has been carried out for the rotational temperatures of the OH(3-1) band. A comparison of the annual mean values of the F10.7 and Ap indices during the declining phase of solar activity with changes in TOH(3-1) reveals no clear relationship with either of them. Comparison of the annual mean values of TOH(3-1) with the F10.7 and Ap indices, which were measured at the solar decline phase of cycle 24 and the beginning of cycle 25, showed no apparent relationship with either of them. Dividing the average TOH(3-1) values according to the level of the Ap index also revealed no difference in temperature. It should be noted that the TOH(3-1) series consists of 9 annual averages, whereas the TOH(6-2) measurements were carried out over 16 seasons. In addition, cycle 24 had less activity than the previous cycle. Perhaps further observations will make it possible to assess more reliably the influence of changing solar activity on atmospheric temperature at OH altitude.

1. Gavrilyeva, Ammosov, Atmos Chem. Phys., V.18, P. 3363–3367, 2018 <https://doi.org/10.5194/acp-18-3363-2018>).

Особенности генерации акустических и внутренних гравитационных волн тепловым тропосферным источником

Курдяева Ю.А.^{1,3}(yakurdyeva@gmail.com), Кшевецкий С.П.^{2,3}

¹*Калининградский филиал Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН, Калининград, Россия*

²*Балтийский Федеральный университет И. Канта, Калининград, Россия*

³*Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия*

Процессы выделения/поглощения тепла при фазовых переходах воды в атмосфере при образовании и эволюции облаков и при других метеорологических явлениях являются энергетически мощными источниками акустико-гравитационных волн. Акустико-

гравитационные волны влияют на динамические процессы и тепловой баланс атмосферы. Физика процесса генерации атмосферных волн тепловым источником и особенности их распространения все еще мало изучены. Именно эти особенности могут быть критическими при формировании волновой картины в атмосфере и проявлении различных эффектов. Эти детали распространения волн важны как для интерпретации экспериментальных результатов наблюдения атмосферных волн в атмосфере и ионосфере, так для более точного и детального моделирования волновых процессов.

В работе аналитически рассмотрена общая проблема генерации акустико-гравитационных волн в изотермической атмосфере локальным источником тепла на тропосферных высотах. Показано, что генерация внутренних гравитационных волн источником тепла не может происходить без генерации инфразвуковых волн тем же источником, и наоборот. Выведены соотношения, связывающие гидродинамические переменные u волн каждого типа. Выведенные соотношения позволяют в произвольно заданном источнике волн выделить вклады, ответственные за генерацию акустических и гравитационных волн по отдельности.

Выведенные соотношения были применены к модельному источнику тепла для численного расчета отдельной генерации акустических и гравитационных волн. Для этого расчета была применена DNS-модель атмосферных процессов высокого разрешения «AtmoSym», основанная на решении системы нелинейных гидродинамических уравнений для атмосферного газа в поле тяжести. Полученные результаты позволили изучить характер и геометрию волновой картины, создаваемой низкочастотными и компенсаторными акустическими волнами.

С помощью численных экспериментов получены некоторые оценки амплитуд генерируемых волн. Показано, что амплитуда генерируемых компенсаторных инфразвуковых волн меньше амплитуды гравитационных волн. При этом генерируемые акустические волны быстро распространяются во всех направлениях и могут занимать большой объем пространства и, следовательно, энергетически сравнимы с гравитационными волнами.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (договор 075-15-2021-583).

Features of the generation of acoustic and internal gravity waves by a heat tropospheric source

Y.A. Kurdyeva^{1,3} (yakurdyeva@gmail.com), S.P. Kshevetskii^{2,3}

¹*Kaliningrad Branch of Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation RAS, Kaliningrad, Russia*

²*Immanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad, Russia*

³*Saint-Petersburg State University, Saint-Petersburg, Russia*

The processes of heat release/absorption during phase transitions of water in the atmosphere during the formation and evolution of clouds and other meteorological phenomena are energetically powerful sources of acoustic-gravity waves. Acoustic-gravity waves affect the dynamic processes and the heat balance of the atmosphere. The physics of the process of generating atmospheric waves by a heat source and the features of their propagation are still poorly understood. It is these features that can be critical in the formation of a wave pattern in the atmosphere and the manifestation of various effects. These details of wave propagation are important both for interpreting the experimental results of observing atmospheric waves in the atmosphere and ionosphere and for more accurate and detailed modeling of wave processes.

In the work analyzes analytically the general problem of generating acoustic-gravity waves in an isothermal atmosphere by a local heat source at tropospheric heights. It is shown that the generation of internal gravity waves by a heat source cannot occur without the generation of infrasonic waves by the same source, and vice versa. Relations are derived that relate hydrodynamic variables for waves of each type. The derived relations make it possible to single out the contributions responsible for the generation of acoustic and gravity waves separately in an arbitrarily given source of waves.

The derived relations were applied to a model heat source for numerical calculation of separate generation of acoustic and gravity waves by such a source. For this calculation the high-resolution DNS model of atmospheric processes "AtmoSym" was used. Model is based on the solution of a system of nonlinear hydrodynamic equations for atmospheric gas in a gravitational field. The results obtained made it possible to study the nature and geometry of the wave pattern created by low-frequency and compensatory acoustic waves. The propagation of compensatory waves is determined by the scale and period of the low-frequency source. It is shown that the pair generation of waves, acoustic and gravity, by a heat source reduces the time of penetration of internal gravity waves from the heat source to high altitudes.

Numerical experiments made it possible to obtain some estimates of the amplitudes of the generated waves. It is shown that the amplitude of generated compensatory infrasonic waves is less than the amplitude of gravity waves. In this case, the generated acoustic waves propagate rapidly in all directions and can occupy a larger volume of space and, therefore, are energetically comparable to gravity waves.

The work was supported by the Ministry of Science and High Education of the Russian Federation (agreement 075-15-2021-583)

Расчет дальнего распространения волн от взрыва, основанный на решении уравнения типа Бюргерса на луче, и сравнение с экспериментом

Кшевецкий С.П.^{1,2} (spkshev@gmail.com), Куличков С.Н.^{2,3},
Чунчuzов И.², Закиров М.², Голикова Е.²

¹Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград, Россия

²Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия

³Московский государственный университет, Москва, Россия

Представлена теория и пример решение задачи j дальнем распространении в атмосфере импульсных акустических сигналов с учетом нелинейных и диссипативных эффектов на основе нелинейного уравнения типа Бюргерса, записанного на луче. Для заданных азимута и угла выхода согласно лучевой теории вычисляется луч, вдоль которого распространяются акустические волны, и вычисляются переменные коэффициенты нелинейного типа Бюргерса на луче. Затем решается нелинейное уравнение типа Бюргерса. Представлены результаты вычисления изменения формы волнового профиля при распространении акустических импульсов от взрыва. При атмосферных условиях, бывших во время взрыва, реализуется стратосферное и термосферное отражение акустической волны. После отражения волна достигает поверхности Земли примерно на расстоянии 300 км от источника. Волны экспериментально регистрируются в нескольких пунктах наблюдения. Результаты расчетов удовлетворительно согласуются с экспериментальными наблюдениями.

Simulation of far propagation of waves from an explosion based on the solution of the Burgers-type equation on an acoustic wave beam and comparison with experiment

S.P. Kshevetskii (spkshev@gmail.com), S.N. Kulichkov, I. Chunchuzov, M. Zakirov, E. Golikova

¹*I. Kant Baltic Federal University, Kaliningrad, Russia*

²*A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics, RAS, Moscow, Russia*

³*Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia*

The theory and an example of solution of the problem of long-range propagation of pulsed acoustic signals in the atmosphere is presented, taking into account nonlinear and dissipative effects, based on a Burgers-type nonlinear equation written on an acoustic wave beam. For a given azimuth and starting angle, according to the wave ray theory, the wave beam along which the acoustic waves propagate is calculated, and the variable coefficients of the nonlinear Burgers type on the wave beam are calculated. Then a nonlinear Burgers-type equation is solved. The results of calculating the change in the shape of the wave profile during the propagation of acoustic pulses from the explosion are presented. Under the atmospheric conditions at the time of the explosion, the stratospheric and thermospheric reflection of the acoustic wave is realized. After wave reflection, the wave reaches the Earth's surface at a distance of about 300 km from the source. Waves are experimentally recorded at several observation points. The calculation results agree satisfactorily with experimental observations.

Моделирование скорости вертикального распространения плоского акустического возмущения, вызванного импульсом на нижней границе атмосферы

E.S. Smirnova (smirnova.ekaterina.serg@gmail.com)

Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград, Россия

В работе рассматривается задача распространения плоских акустических волн, которые вызваны импульсом на нижней границе атмосферы. Эта задача формулируется как начально-краевая задача для одномерной системы уравнений гидротермодинамики, которая описывает вертикальное движение атмосферного газа. Гидротермодинамическая система сводится к одномерному уравнению Клейна-Гордона, для которого аналитически решается поставленная начально-краевая задача для семейства граничных условий, представляющих импульсы с разной длительностью, и строятся асимптотики для решений.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Балтийского федерального университета им. Иммануила Канта, проект №122051300013-8.

Modeling the velocity of vertical propagation of a plane acoustic perturbation caused by an impulse at the lower boundary of the atmosphere

E.S. Smirnova (smirnova.ekaterina.serg@gmail.com)

Immanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad, Russia

The work considers the problem of propagation of plane acoustic waves, which are caused by an impulse at the lower boundary of the atmosphere. This problem is formulated as an initial-boundary value problem for a one-dimensional system of hydrothermodynamic equations, which describes the vertical motion of atmospheric gas. The hydrothermodynamic system is reduced to a one-dimensional Klein-Gordon equation, for which the stated initial-boundary value problem is analytically solved for a family of boundary conditions representing impulses different durations, and asymptotics for the solutions are constructed.

The reported study was funded by Immanuel Kant Baltic Federal University, project №122051300013-8.

Эволюция спектра вторичных акустико-гравитационных волн после включения волнового источника в модели высокого разрешения

Гаврилов Н.М.¹(n.gavrilov@spbu.ru), Кшевецкий С.П.²(renger@mail.ru), Коваль А.В.¹

¹Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

²Балтийский федеральный университет им. И. Канта, г. Калининград, Россия

Выполнено численное моделирование спектра первичных акустико-гравитационных волн (АГВ), возбуждаемых волновым источником на земной поверхности, и спектр вторичных волновых мод, которые создаются на разных высотных уровнях этими первичными волнами. Использована численная трехмерная модель высокого разрешения АтмоСим, описывающая нелинейные атмосферные АГВ. Модель использует плоскую геометрию и полные гидродинамические трехмерные уравнения. Учитываются диссипативные и нелинейные процессы, влияющие на распространение АГВ, включая молекулярную и турбулентную вязкость и теплопроводность. Фоновые профили температуры берутся из полуэмпирической атмосферной модели NRLMSISE-00. Нижние граничные условия задаются на земной поверхности и служат источником плоских АГВ в модели.

Представлены примеры, которые показывают постепенное формирование спектра вторичных волн после включения волнового источника в модели. Проиллюстрировано постепенное развитие горизонтального пространственного спектра первичных и вторичных АГВ на фиксированных высотных уровнях в средней и верхней атмосфере. Волны рассчитываются с помощью трехмерной нелинейной модели высокого разрешения. Показано, что после включения источника плоских волн на земной поверхности на малых высотах спектр состоит в основном из пика, соответствующего первичной АГВ. В более поздние моменты времени и на больших высотах в спектрах появляются пики вторичных волн на горизонтальных волновых числах кратных волновым числам первичной АГВ и их комбинациям. По мере увеличения количества пиков спектр вторичных АГВ становится квази-непрерывным.

Работа поддержана Российским научным фондом (грант № 22-27-00171).

Evolution of the spectrum of secondary acoustic-gravity waves after wave source triggering in a high-resolution model

Gavrilov N.M.¹(n.gavrilov@spbu.ru), Kshevetski S.P.²(renger@mail.ru), Koval A.V.¹

¹Saint-Petersburg State University, Saint Petersburg, Russia

²Immanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad, Russia

A numerical simulation of the spectrum of primary acoustic-gravity waves (AGWs) excited by a wave source on the Earth's surface, and the spectrum of secondary wave modes that are created at different altitude levels by these primary waves is performed. A numerical three-dimensional high-resolution AtmoSym model describing nonlinear atmospheric AGW is used. The model uses plane geometry and primitive hydrodynamic three-dimensional equations. The model takes into account dissipative and nonlinear processes affecting AGW propagation, including molecular and turbulent viscosity and heat conduction. Background temperature profiles are taken from the semi-empirical atmospheric model NRLMSISE-00. The lower boundary conditions are set on the earth's surface and serve as a source of flat AGV in the model.

Examples are presented that show the gradual formation of the spectrum of secondary waves after the triggering on a wave source in the model. The gradual development of the horizontal spatial spectrum of primary and secondary AGW at fixed altitude levels in the middle and upper atmosphere is illustrated. It is shown that after switching on the source of plane waves on the Earth's surface at low altitudes, the spectrum consists mainly of a peak corresponding to the primary AGW. At later times and at high altitudes, peaks of secondary waves appear in the spectra on horizontal wave numbers that are multiples of the wave numbers of the primary AGW and their combinations. As the number of peaks increases, the spectrum of secondary AGWs becomes quasi-continuous.

This study was funded by the Russian Science Foundation (grant № 22-27-00171).

Внутренние гравитационные волны вблизи мезопаузы по наблюдениям ночных эмиссий гидроксила и кислорода в Японии

А.А. Попов¹(andrew.popovix@gmail.com), Н.М. Гаврилов¹

¹Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

Метод цифровых разностных фильтров применен к анализу данных наблюдений вращательной температуры OH и O₂ на высотах 85 – 90 км фотометрами установленными в Rikubetsu (43.5N, 143.8E) Shigaraki (34.8N, 136.1E) и Sata (31.0N, 130.7E) в Японии в 2010 – 2018 гг. Исследованы сезонные изменения среднемесячных значений вращательной температуры и дисперсий вариаций с периодами 0.7 – 11 ч., которые могут быть связаны с внутренними гравитационными волнами в области мезопаузы. Среднемесячная температура вблизи мезопаузы имеет максимум зимой и минимум летом. Детали междугодовых изменений для вращательной температуры OH и O₂ могут отличаться. Это может быть связано с разными высотами светящихся слоев.

Internal gravity waves near the mesopause according to measurements of nightglow hydroxyl and oxygen emissions from photometric data in Japan

A.A. Popov¹(andrew.popovix@gmail.com), N.M. Gavrilov¹

¹Saint-Petersburg State University, Saint Petersburg, Russia

The method of digital difference filters is applied to the data analysis of the observations of rotational temperature of hydroxyl nightglow at altitudes 85 – 90 km with the airglow temperature photometers in Rikubetsu (43.5N, 143.8E) Shigaraki (34.8N, 136.1E) and Sata (31.0N, 130.7E) Japan in years 2010 – 2018. Seasonal changes in the monthly-average values and standard deviations of variations with the periods 0.7 – 11 h are studied, which can be connected with internal gravity waves in the mesopause region. Monthly-averaged temperature near the mesopause has a maximum in winter and a minimum in June. Multi-year trends correspond to strengthening the mesoscale disturbance intensity near the mesopause. Details of interannual changes and multi-year trends of the rotational temperature OH emission intensity can be different. This is connected with the seasonal and long-lived changes in the complex system of the photochemical processes, which lead to the OH nightglow.

Два года наблюдений гравитационных волн в атмосфере Марса по данным эксперимента ACS с борта аппарата ExoMars/TGO

Стариченко Е.Д.¹ (starichenko.ed@phystech.edu), Медведев А.С.², Беляев Д.А.¹, Фёдорова А.А.¹, Кораблев О.И.¹, Трохимовский А.Ю.¹

¹Институт космических исследований Российской академии наук, Москва, Россия

²Max Planck Institute for Solar System Research, Göttingen, Germany

Внутренние гравитационные волны (ГВ) - распространение волновых колебаний в атмосфере, возникающих вследствие смещения равновесия между силой тяжести и силой Архимеда (плавучести). ГВ переносят энергию и импульс, влияя на общую динамику атмосферы планеты. В нашей работе мы рассматриваем параметры ГВ [1] и их высотное распределение в атмосфере Марса. ГВ выявляются из высотных профилей температуры, полученных из эксперимента по солнечному просвечиванию, выполняемым российским комплексом спектрометров АЦС (ACS - Atmospheric Chemistry Suite) [2] на борту аппарата Trace Gas Orbiter (TGO). В эксперименте исследуются такие параметры, как амплитуда, потенциальная энергия и ускорение ГВ. Наблюдается симметричное распределение активности волн в сезоны равноденствий на Марсе, а также смещение максимума активности в зимнее полушарие в периоды солнцестояний. Максимум ускорения ГВ совпадает с зонами слабого зонального ветра на краях сезонных зональных потоков, смоделированных с помощью модели MAOAM Martian general circulation model (MGCM) [3]. Кроме того, увеличенная активность ГВ наблюдалась во время глобальной пылевой бури на Марсе в регионе полярных широт. Также, статистика солнечных затмений ACS в утренние и вечерние терминаторы позволила выявить модуляцию ГВ дневными и полудневыми приливами.

ACS находится на орбитальном аппарате TGO, который является частью европейско-российской миссии ExoMars 2016. Он состоит из трех спектрометров ближнего – NIR (0.73-1.6 мкм), среднего – MIR (2.3-4.2 мкм) и теплового – TIRVIM (1.7-17 мкм) инфракрасного диапазона. В данной работе используются данные каналов MIR и NIR. Оба прибора позволяют восстанавливать вертикальные профили температуры и плотности по спектрам пропускания в полосах поглощения углекислого газа CO₂ в диапазоне высот – 10-180 км (MIR) [4], 10-100 км (NIR) [5] с вертикальным разрешением ~ 0.5 – 2.5 км. Представленный объем данных охватывает наблюдения за два Марсианских года (MY) с середины MY34 (апрель 2018) по середину MY36 (февраль 2022). Объем данных насчитывает около 760 сеансов солнечных затмений для канала MIR и около 8550 сеансов для NIR.

1. Starichenko E. et al., 2021. Gravity wave activity in the Martian atmosphere at altitudes 20–160 km from ACS/TGO occultation measurements. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 126, e2021JE006899. DOI: 10.1029/2021JE006899

2. Korablev O., Montmessin F., and ACS Team, 2018. The Atmospheric Chemistry Suite (ACS) of three spectrometers for the ExoMars 2016 Trace Gas Orbiter. *Space Sci. Rev.*, 214:7. DOI 10.1007/s11214-017-0437-6.

3. Medvedev, A. S., & Hartogh, P. (2007). Winter polar warmings and the meridional transport on Mars simulated with a general circulation model. *Icarus*, 186, 97– 110.

4. Belyaev D. et al., 2022. Thermal Structure of the Middle and Upper Atmosphere of Mars from ACS/TGO CO₂ Spectroscopy. *Journal of Geophysical Research: Planets*. 127, e2022JE007286. doi: 10.1029/2022JE007286

5. Fedorova A. et al., 2022. A two-Martian year survey of the water vapor saturation state on Mars based on ACS NIR/TGO occultations. Submitted to *Journal of Geophysical Research: Planets*. 128, e2022JE007348. doi: 10.1029/2022JE007348

Two years of Gravity Waves observation in the Martian Atmosphere from the data of ACS experiment on board the ExoMars/TGO

E.D. Starichenko¹(starichenko.ed@phystech.edu), A.S. Medvedev², D.A. Belyaev¹, A.A. Fedorova¹, O.I. Korablev¹, A. Trokhimovskiy¹

Internal Gravity waves (GWs) represent the oscillations of air in the atmosphere that originate from the displacement of balance between gravity and buoyancy forces. Since they redistribute energy and momentum between atmospheric layers, GWs greatly affect atmospheric dynamics. In this work, we study the parameters of GWs [1] and their various distributions. These parameters are retrieved from the vertical profiles of Martian atmosphere temperature, which is obtained from the solar occultation experiments conducted by the infrared spectrometers of Atmospheric Chemistry Suite (ACS) [2] on board the Trace Gas Orbiter (TGO). In this study we analyze waves' amplitude, potential energy and the GW drag. It is found that the activity of GWs is symmetrically distributed around the equator during the seasons of equinoxes, while during solstices periods the maxima of activity is shifted towards the winter hemisphere. Maxima of GW drag is aligned with the weak zonal wind areas along the border of seasonally varying zonal jets modeled with the MAOAM Martian general circulation model (MGCM) [3]. The increased GW activity in the polar regions during the Global Dust Storm event of 34 Martian Year (MY34) is seen. A diurnal and semidiurnal modulation of the GW activity and drag is found in both equinoctial seasons.

ACS is a part of the TGO, which represents the ESA-Roscosmos ExoMars 2016 collaborative mission. The instrument consists of three infrared channels [1]: near-IR (NIR, 0.73-1.6 μm), middle-IR (MIR, 2.3-4.2 μm) and thermal-IR (TIRVIM, 1.7-17 μm). In this work, we use the data obtained from the MIR and NIR instruments. Both spectrometers can retrieve temperature and density vertical profiles in the absorption bands of CO₂ transmission spectra covering the broad altitude range of 10-180 km (MIR) [4] and 10-100 km (NIR) [5] with the vertical resolution $\sim 0.5 - 2.5$ km. Presently, we report the observations for 2 Martian years (MY), from the middle of MY34 (April 2018) to the middle of MY36 (February 2022), counting ~ 760 occultations of MIR and ~ 8550 occultations of NIR.

1. Starichenko E. et al., 2021. Gravity wave activity in the Martian atmosphere at altitudes 20–160 km from ACS/TGO occultation measurements. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 126, e2021JE006899. DOI: 10.1029/2021JE006899

2. Korablev O., Montmessin F., and ACS Team, 2018. The Atmospheric Chemistry Suite (ACS) of three spectrometers for the ExoMars 2016 Trace Gas Orbiter. *Space Sci. Rev.*, 214:7. DOI 10.1007/s11214-017-0437-6.

3. Medvedev, A. S., & Hartogh, P. (2007). Winter polar warmings and the meridional transport on Mars simulated with a general circulation model. *Icarus*, 186, 97–110.

4. Belyaev D. et al., 2022. Thermal Structure of the Middle and Upper Atmosphere of Mars from ACS/TGO CO₂ Spectroscopy. *Journal of Geophysical Research: Planets*. 127, e2022JE007286. doi: 10.1029/2022JE007286

5. Fedorova A. et al., 2022. A two-Martian year survey of the water vapor saturation state on Mars based on ACS NIR/TGO occultations. Submitted to *Journal of Geophysical Research: Planets*. 128, e2022JE007348. doi: 10.1029/2022JE007348

Регистрация внутренних гравитационных волн во время свечения STEVE 1 марта 2017 года

Тыщук О.В.^{1,2} (oleSmile@mail.ru), Колтовской И.И.¹ (koltigor@mail.ru), Парников С.Г.¹ (parnikov@ikfia.ysn.ru)

¹Институт космических исследований и аэронавтики им. Ю. Г. Шафера СО РАН, Якутск, Россия

²Северо-Восточный федеральный университет имени М. К. Аммосова, Якутск, Россия

В настоящее время открытым остается вопрос о возникновении такого атмосферного явления как STEVE (Strong Thermal Emission Velocity Enhancement), что переводится как «Сильное повышение скорости теплового излучения». Это явление проявляется в виде отдельной полосы свечения бледно-фиолетового или розового цвета,

чаще всего происходящей во время полярных сияний. В данном исследовании мы хотим изучить влияет ли STEVE на движение внутренних гравитационных волн (ВГВ) и наоборот.

В данном исследовании использовались данные с двух различных камер, установленных на оптической станции Маймага ИКФИА СО РАН расположенной в 130 км к северу от г. Якутска (63° N, 129.5° E). Первым прибором является CCD камера «СТ-6» настроенная на регистрацию излучения интенсивной полосы молекулы гидроксила OH. Вторым прибором является CCD камера всего неба «Keo Sentry» у которой были использованы данные фильтра центрированного на длину волны 557.7 нм, где излучаются полосы атомарного кислорода.

Была выбрана ночь 1 марта 2017 года. Образование явления STEVE началось в 13:16 UT. В общей сложности с момента начала регистрации STEVE просуществовал 1 ч 11 мин.

До появления и во время свечения STEVE наблюдались две группы ВГВ: первая группа распространялась в северном направлении, а вторая группа – распространялась в западном направлении. После окончания свечения STEVE была обнаружена третья группа волн, которая распространялась в восточном направлении. По результатам данной ночи мы приходим к выводу, что явной прямой зависимости ВГВ до, во время и после свечения STEVE не наблюдается.

Registration of internal gravitational waves during the glow of STEVE on march 1, 2017

O.V. Tyschuk^{1,2} (oleSmile@mail.ru), I.I. Koltovskoi¹ (koltigor@mail.ru), S.G. Parnikov¹
(parnikov@ikfia.ysn.ru)

*Yu. G. Shafer Institute of Cosmophysical Research and Aeronomy of SB RAS, Yakutsk, Russia
M. K. Ammosov North-Eastern Federal University, Yakutsk, Russia*

Currently, the question remains open about the occurrence of such an atmospheric phenomenon as STEVE (Strong Thermal Emission Velocity Enhancement), which translates as "A strong increase in the rate of thermal radiation". This phenomenon manifests itself in the form of a separate band of pale purple or pink glow, most often occurring during auroras. In this study, we want to study whether STEVE affects the movement of internal gravitational waves (IGW) and vice versa.

This study used data from two different cameras installed at the optical station of the Maymaga ICFIA SB RAS located 130 km north of Yakutsk (63° N, 129.5° E). The first device is a CCD camera "ST-6" configured to register the radiation of the intense band of the hydroxyl molecule OH. The second device is a CCD camera of the whole sky "Keo Sentry", which used data from a filter centered at a wavelength of 557.7 nm, where bands of atomic oxygen are emitted.

The night of March 1, 2017 was chosen. The formation of the STEVE phenomenon began at 13:16 UT. In total, since the start of registration, STEVE has existed for 1 hour 11 minutes.

Before the appearance and during the glow of STEVE, two groups of HBV were observed: the first group spread in a northerly direction, and the second group spread in a westerly direction. After the end of the glow of STEVE, a third group of waves was detected, which propagated in an easterly direction. Based on the results of this night, we come to the conclusion that there is no obvious direct dependence of HBV before, during and after the glow of STEVE.

Исследование гравитационных волн средней атмосферы с помощью рэлеевского лидара в Якутии

Титов С.В. (stitov@ikfia.ysn.ru), Николашкин С.В. (nikolashkins@ikfia.ysn.ru)
Институт космофизических исследований и аэронауки им. Ю.Г. Шафера СО РАН, Якутск, Россия

Начиная с 2004 г. проводятся лидарные измерения температуры от 20 до 60 км в полигонах Института космофизических исследований и аэронауки им. Ю.Г. Шафера СО РАН, на полигоне «ШАЛ» с 2004 года по 2017 год и на оптическом полигоне «Маймага» с 2018 по сей день. Наблюдения проводились с конца августа до середины мая, т.к. в летнее время на широтах наблюдений идут так называемые «белые ночи». Выявлены преобладающие ВГВ с длинами волн 2-4 км, 5-7 км и 10-15 км. Локальные флуктуационные минимумы часто наблюдаются на высотах стратопазы в течение ВСП.

Работа выполнена в рамках государственного задания (номер госрегистрации № 122011700172-2).

Rayleigh lidar investigation of middle atmosphere gravity waves in Yakutia

S.V. Titov (stitov@ikfia.ysn.ru), S.V. Nikolashkin (nikolashkins@ikfia.ysn.ru)
Yu. G. Shafer Institute of Cosmophysical Research and Aeronomy of SB RAS, Yakutsk, Russia

Since 2004, lidar measurements of temperature from 20 to 60 km have been carried out at the polygons of the Yu.G. Shafer Institute of Cosmophysical Research and Aeronomy of the SB RAS, at the “EAS” from 2004 to 2017 and at the “Maymaga” from 2018 till now. Observations were carried out from late August to mid-May. Dominant IGWs with wavelengths 2–4 km, 5–7 km, and 10–15 km was identified. Local fluctuation minima are often observed at stratopause heights during SSWs.

This work was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation and Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (registration number 122011700172-2).

Постерная сессия

Циркуляция стратосферы и её влияние на сильные аномалии температуры на Европейской части России

Алексеева Е.Г. (E.Alekseeva-rshu@yandex.ru), Анискина О.Г.
Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург, Россия

В настоящее время изучению динамического взаимодействия стратосферы и тропосферы в зимний период уделяется особое внимание. Одним из факторов стратосферно-тропосферной связи является квазидвухлетнее колебание (КДК).

По данным о максимальной температуре воздуха на 40 метеорологических станциях, расположенных на Европейской территории России, для холодного периода года декабрь-март с 1979 по 2016 гг. [3] выявлены положительные аномалии продолжительностью более пяти дней с фиксированием дня начала потепления и максимального значения наблюдавшейся аномалии [1].

Проанализирована связь периодов аномалий температуры с фазами КДК, представленными в работе [2]. Для каждой станции были соотнесены года с аномалиями температуры и наблюдавшейся фазой КДК.

В результате проведенного анализа выявлено, что на большинстве метеостанций, сильные и продолжительные аномалии температуры у поверхности земли при западной фазе КДК наблюдались в 1995, 2002, 2008, а при восточной фазе КДК в 1989, 2005, 2007 г.

При сравнении аномалий температуры при восточной и западной фазах КДК следует отметить, что фаза КДК не влияет на направление распространения положительных аномалий температуры воздуха у поверхности, как правило, преобладает западно-восточное распространение.

Можно сделать вывод о том, что в большинстве случаев потепление распространялось с запада на восток. Реже отмечались ситуации распространения с востока на запад (март 1983, февраль 1997, январь-февраль 2008 и декабрь 2013), но даже и тогда в некоторых случаях имела незначительная западная составляющая – примером может служить февраль 2008 года. Только в одном из рассмотренных случаев – март 2008 года – температурная аномалия распространялась с юга. Также в большинстве ситуаций наименее продолжительные и наименее сильные аномалии отмечались в северных районах.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект FSZU-2023-0002).

1. Алексеева О.Г., Анискина О.Г. Влияние циркуляции атмосферы на экстремальную температуру воздуха на Северо-Западе России // Материалы Международной конференции «Климатические риски и космическая погода» – Иркутск.: ИГУ. – 2021. – С. 238 – 242.
2. Диденко К. А., Ермакова Т. С., Погорельцев А. И., Ракушина Е. В. Климатическая изменчивость стратосферно-тропосферных взаимодействий, наблюдаемая в последние десятилетия // Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки. – 2021. – Т. 37. № 4. С. 159 – 170.
3. URL: <https://www.ecad.eu/> (дата обращения 18.02.2023 г.)

Stratospheric circulation and its influence on strong temperature anomalies in the European part of Russia

E.G. Alekseeva (E.Alekseeva-rshu@yandex.ru), O.G. Aniskina
Russian State Hydrometeorological University, Saint Petersburg, Russia

At present, special attention is paid to the study of the dynamic interaction of the stratosphere and troposphere in winter. One of the factors of the stratospheric-tropospheric connection is the quasi-biennial oscillation (QBO).

According to the data on the maximum air temperature at 40 meteorological stations located on the European territory of Russia, for the cold period of the year December-March from 1979 to 2016. [3] revealed positive anomalies lasting more than five days, fixing the day of the start of warming and the maximum value of the observed anomaly [1].

The relationship between the periods of temperature anomalies and the QBO phases presented in [2] was analyzed. For each station, years were correlated with temperature anomalies and the observed QBO phase.

As a result of the analysis, it was revealed that at most weather stations, strong and prolonged temperature anomalies near the earth's surface during the western phase of the QBO were observed in 1995, 2002, 2008, and during the eastern phase of the QBO in 1989, 2005, 2007.

When comparing temperature anomalies during the eastern and western phases of the QBO, it should be noted that the QBO phase does not affect the direction of propagation of positive air temperature anomalies near the surface; as a rule, the west-east propagation prevails.

It can be concluded that in most cases warming spread from west to east. There were less east-west propagation situations (March 1983, February 1997, January-February 2008 and

December 2013), but even then in some cases there was a slight western component - an example is February 2008. Only in one of the considered cases - March 2008 - the temperature anomaly spread from the south. Also, in most situations, the least prolonged and least severe anomalies were noted in the northern regions.

The work was carried out within the framework of the state task of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (project FSZU-2023-0002).

1. Alekseeva O.G., Aniskina O.G. Influence of atmospheric circulation on extreme air temperature in the North-West of Russia // Proceedings of the International Conference "Climate Risks and Space Weather" - Irkutsk: IGU. - 2021. - S. 238 - 242.

2. Didenko K. A., Ermakova T. S., Pogoreltsev A. I., Rakushina E. V. Climatic variability of stratospheric-tropospheric interactions observed in recent decades // Vestnik KRAUNC. Phys.-Math. Sciences. - 2021. - T. 37. No. 4. C. 159 - 170.

3. URL: <https://www.ecad.eu/> (accessed 18.02.2023)

Модельное исследование возмущений термосферы в Московской области в мае 2017 г.

Борчевкина О.П.¹ (olga.borchevkina@mail.ru), Курдяева Ю.А.¹, Карпов И.В.¹, Голикова Е.В.²
*Калининградский филиал Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им.
Н.В. Пушкова РАН, Калининград, Россия*
Институт физики атмосферы имени А. М. Обухова РАН, Москва, Россия

Сильные метеорологические явления являются источником атмосферных волн широкого спектрального диапазона. Процессы, связанные с распространением акустических (АВ) и внутренних гравитационных волн (ВГВ) от источников в нижних слоях атмосферы оказывают влияние на состояние системы «термосфера-ионосфера». Одним из эффективных способов изучения таких процессов является реалистичное численное моделирование с использованием экспериментально зарегистрированных вариаций давления у поверхности Земли в качестве источника возмущений на нижней границе. Этот подход к моделированию АВ и ВГВ физически и математически обоснован.

В работе численно исследуются волновые возмущения в термосфере, вызванные сильным штормом в Московском регионе 29 мая 2017 года. В качестве источника волн на нижней границе использовались вариации атмосферного давления, полученные на сети микробарографов Института физики атмосферы имени А.М. Обухова Российской академии наук (ИФА РАН) в исследуемый период. Численный эксперимент проводился с использованием региональной численной модели нейтральной атмосферы «Atmosym».

Для исследования спектральных характеристик возмущений в верхней атмосфере в течение времени моделирования использовалось оконное преобразование Фурье. Результаты спектрального анализа показали, что уже через 30 минут после начала работы источника на высоте 100 км над источником наблюдаются волны с периодами 10-15 минут, через 120 минут после начала работы источника волны с периодами 15-30 минут наблюдаются на расстоянии 500 км от источника. Полученные спектральные характеристики согласуются с теоретическими представлениями о распространении АВ и ВГВ.

Для определения характерных длин волн, распространяющихся от метеорологического источника, был проведен вейвлет-анализ на основе полученных результатов моделирования. Результаты показали, что исследуемый метеорологический источник генерирует преимущественно АВ и мелкомасштабные ВГВ. Однако с высотой и они могут распространяться как инфразвуковые волны. Со временем в верхней атмосфере формируются локальные области нагрева, что также влияет на распространение волн и может усложнить интерпретацию возможных экспериментальных результатов по исследованию атмосферных волн.

Демонстрируемая сложная волновая картина, требует необходимость улучшения существующих параметризаций атмосферных волн или разработки новых подходов для учета этих волн в глобальных численных моделях. Полученные характеристики волновых возмущений, создаваемых метеорологическим источником, могут быть использованы в крупномасштабных моделях верхней атмосферы.

Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда № 21-17-00208.

Model study of thermospheric disturbances in the Moscow region in May 2017

O.P. Borchevkina¹(olga.borchevkina@mail.ru), Y.A. Kurdyeva¹, I.V. Karpov¹, E.V. Golikova²
¹*Kaliningrad Branch of Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation RAS, Kaliningrad, Russia*

²*Obukhov Institute of Atmospheric Physics, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

Strong meteorological phenomena are the source of atmospheric waves of wide spectral range. Processes related to propagation of acoustic (AWs) and internal gravity waves (IGWs) from sources in the lower atmosphere affect the state of the "thermosphere-ionosphere" system. One effective way to study such processes is realistic numerical modeling using experimentally recorded pressure variations near the Earth's surface as a source of perturbations at the lower boundary. This approach to modeling AWs and IGWs is physically and mathematically justified.

This work numerically investigates wave disturbances in the thermosphere caused by a strong storm in the Moscow region on May 29, 2017. The atmospheric pressure variations obtained at the Obukhov Institute of Atmospheric Physics of the Russian Academy of Sciences (IAP RAS) microbarograph network during the study period were used as a source of waves at the lower boundary. The numerical experiment was carried out using the regional numerical model of the neutral atmosphere «Atmosym».

To study the spectral characteristics of disturbances in the upper atmosphere during the simulation time, the Fourier window transformation was used. Results of spectral analysis showed that already 30 minutes after the start of source work the waves with periods of 10-15 minutes were observed at an altitude of 100 km above the source. In 120 minutes after the start of source operation waves with periods of 15-30 minutes were observed at 500 km from the source. The obtained spectral characteristics agree with the theoretical notions of AWs and IGWs propagation.

To determine the characteristic wavelengths propagating from the meteorological source, a wavelet analysis was performed based on the obtained simulation results. The results showed that the investigated meteorological source generates predominantly AWs and small-scale IGWs. However, with altitude and they can propagate as infrasonic waves. Over time, the local heating areas form in the upper atmosphere, which also affects wave propagation and may complicate the interpretation of possible experimental results on the study of atmospheric waves.

The complex wave picture demonstrated requires the need to improve the existing parameterizations of atmospheric waves or develop new approaches to account for these waves in global numerical models. The obtained characteristics of wave disturbances created by a meteorological source can be used in large-scale models of the upper atmosphere.

This investigation was performed with the financial support of the Russian Science Foundation Grant No. 21-17-00208.

Особенности потока волновой энергии над Евразией перед событиями выпадения экстремальных осадков в июле 2010 года на юге Восточной Сибири

Збираник А. А.^{1,2} (anna24andreevna@gmail.com), Антохина О. Ю.² (antokhina@iao.ru),
Антохин П. Н.²

¹Томский государственный университет, Томск, Россия

²Институт оптики атмосферы им. В. Е. Зуева СО РАН, Томск, Россия

Увеличение числа событий экстремально высоких осадков и связанных с ними паводков в период наблюдаемых климатических изменений побуждают исследователей пристально изучать механизмы, обуславливающие экстремальные осадки в разных районах Земного шара. Юг Восточной Сибири - регион подверженный выпадению экстремальных осадков и возникновению паводков. Предыдущие исследования показывают, что выпадению осадков в бассейне оз. Байкал часто предшествует блокирование над Европой. В работе на основании данных реанализа Era-Interim и данных об атмосферных осадках архива GPCP исследованы условия формирования экстремальных осадков на юге Восточной Сибири в период аномально длительного блокирования над европейской частью России в июле 2010 года. Продемонстрировано, что блокирование над Европой способствует стационарированию тропосферной ложбины, трансформированной в отсеченную область высокой завихренности (низкой потенциальной температуры) большой амплитуды над территорией Западной Сибири. Процессы передачи волновой энергии в передней части ложбины при ее трансформации способствуют росту амплитуд волн в Восточной Сибири и их опрокидыванию с усилением блокирования над Дальним Востоком. Эти процессы на бароклинной стадии сопровождаются циклогенезом, характеризующимся высокой конвергенцией влаги и неустойчивостью в средней атмосфере, что приводит к выпадению экстремальных осадков.

Wave activity flux over Eurasia prior to the extreme precipitation events in July 2010 in southern Eastern Siberia

A.A. Zbirannik^{1,2} (anna24andreevna@gmail.com), O.Yu. Antokhina² (antokhina@iao.ru), P.N. Antokhin²

¹National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia

²V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics SB RAS, Tomsk, Russia

The increasing frequency of extreme precipitation events and associated floods due to observed climate changes has led researchers to focus their attention on the mechanisms causing extreme precipitation in different regions of the world. The southern part of Eastern Siberia is particularly prone to extreme precipitation and floods. Previous studies have shown that precipitation in the Lake Baikal basin is often preceded by blocking over Europe. In this study, we used data from the Era-Interim reanalysis and the atmospheric precipitation archive GPCP to investigate the conditions that led to extreme precipitation in the southern part of Eastern Siberia during the abnormally prolonged blocking over the European part of Russia in July 2010. Our findings indicate that the blocking over Europe contributed to the stationary position of the tropospheric trough, which transformed into a cut-off area with high vorticity (low potential temperature) of large amplitude over the territory of Western Siberia. The processes of wave energy transfer in the front part of the trough during its transformation contributed to the growth of wave amplitudes in Eastern Siberia and their breaking with the intensification of blocking over the Far East. These processes on the baroclinic stage were

accompanied by cyclogenesis, characterized by high moisture convergence and instability in the middle atmosphere, resulting in extreme precipitation events.

Эволюция атмосферных приливов во время внезапного стратосферного потепления в зависимости от крупномасштабных внешних воздействий.

Коваль^{1,2,3} А.В. (a.v.koval@spbu.ru), Диденко^{1,2,3} К.А., Ермакова^{1,2,3} Т.С., Лифарь^{1,2} В.Д.

¹Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия,

²Кафедра метеорологических прогнозов Российского государственного гидрометеорологического университета, Санкт-Петербург, Россия

³Лаборатория исследования озонового слоя и верхней атмосферы, Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

С целью изучения эволюции атмосферных приливов были проведены модельные расчеты общей атмосферной циркуляции с помощью 3-мерной нелинейной механистической модели МСВА. В качестве крупномасштабных внешних воздействий используются изменения фазы квазидвухлетнего колебания экваториального зонального ветра (КДК) и Эль-Ниньо Южного колебания (ЭНЮК). Для изучения были получены 4 ансамбля численных расчетов атмосферных параметров, соответствующих разным комбинациям КДК-ЭНЮК, и содержащих 10 реализаций. Для изучения особенностей термодинамической структуры атмосферы на разных стадиях внезапного стратосферного потепления (ВСП) были выбраны интервалы времени по 10 суток, перед, во время и после ВСП. Дата ВСП определялась для каждого модельного прогона индивидуально. Всего, для 3 из 4 комбинаций КДК и ЭНЮК было выбрано по 6 реализаций, содержащих ВСП. Гидродинамические поля для каждого из выбранных временных интервалов были разложены на зональные гармоники, и с помощью подхода на основе аппроксимации по методу наименьших квадратов, были рассчитаны амплитуды и фазы приливов. Были рассмотрены следующие приливы: мигрирующие суточный и полусуточный прилив с зональными волновыми числами, соответственно, 1 и 2, а также немигрирующие суточный и полусуточный приливы с зональными числами, соответственно, 2 и 1.

Получены следующие основные результаты: (1) Наблюдается незначительное уменьшение амплитуд приливов во время ВСП в северном полушарии и увеличение – после. Аналогичный эффект наблюдается по данным реанализа в стратосфере; (2) Во время фазы Ла-Нинья + вКДК заметно существенное увеличение амплитуды суточного немигрирующего прилива во время ВСП. Амплитуды немигрирующего суточного прилива во время Эль-Ниньо, как правило, больше, чем при Ла-Нинья, а выраженного изменения его структуры во время ВСП не наблюдается; (3) Результаты анализа полусуточного немигрирующего прилива показали его усиление во время ВСП для всех рассмотренных сценариев; (4) Относительные изменения амплитуд приливов в стратосфере больше, чем в МНТ области, т.е. эффект от ВСП, локализующегося преимущественно в стратосфере, с ростом высоты ослабевает. Проведенные расчеты амплитуд приливов на разных стадиях ВСП и при усилении стратосферного полярного вихря показали, что изменение структуры зональной циркуляции в арктической области стратосферы может оказывать существенное влияние на такие крупномасштабные возмущения. При определенных условиях, например, во время мажорного ВСП, амплитуда прилива может меняться в 2-3 раза, что связано с температурным и динамическим балансом приполярной области.

Evolution of atmospheric tides during a sudden stratospheric warming depending on large-scale external influences.

A.V. Koval^{1,2,3} (a.v.koval@spbu.ru), K.A. Didenko^{1,2,3}, T.S. Ermakova^{1,2,3}, V.D. Lifar^{1,2}

¹*Saint-Petersburg State University, Saint Petersburg, Russia*

²*Department of Meteorological Forecasts, Russian State Hydrometeorological University, Saint Petersburg, Russia*

³*Ozone layer and upper atmosphere research laboratory, Saint Petersburg State University, Saint Petersburg, Russia*

In order to study the evolution of atmospheric tides, numerical simulations of the general atmospheric circulation are carried out using a 3D non-linear mechanistic model MUAM. Changes in the phase of the quasi-biennial oscillation of the equatorial zonal wind (QBO) and the El Niño Southern Oscillation (ENSO) are understood as large-scale external forcings. For the study, 4 ensembles of numerical simulations of atmospheric parameters are obtained, corresponding to different combinations of QBO-ENSO, and containing 10 realizations. To study the features of the thermodynamic structure of the atmosphere at different stages of sudden stratospheric warming (SSW), time intervals of 10 days are chosen, before, during, and after SSW. The SSW dates are determined individually for each model run. In total, for 3 out of 4 combinations of QBO and ENSO, 6 realizations each containing SSW are selected. The hydrodynamic fields for each of the selected time intervals are decomposed into zonal harmonics, and using a least squares fitting approach, the amplitudes and phases of the tides are calculated. The following tides are considered: migrating diurnal and semidiurnal tides with zonal wave numbers 1 and 2, respectively, as well as nonmigrating diurnal and semidiurnal tides with zonal wave numbers 2 and 1, respectively.

The following main results are obtained: (1) There is a slight decrease in tide amplitudes during the SSW in the northern hemisphere and an increase after. A similar effect is observed according to reanalysis data in the stratosphere; (2) During the La Niña + eQBO phase, a significant increase in the amplitude of the diurnal non-migrating tide during the SSW is noticeable. The amplitudes of the non-migrating diurnal tide during El Niño are, as a rule, greater than during La Niña, and there is no pronounced change in its structure during the SSW; (3) The results of the analysis of the semidiurnal non-migrating tide showed its increase during the SSW for all considered scenarios; (4) Relative changes in tide amplitudes in the stratosphere are greater than in the MLT region, i.e. the effect of the SSW, which is localized mainly in the stratosphere, weakens with increasing altitude. The calculations of tidal amplitudes at different stages of the SSW and during the strengthening of the stratospheric polar vortex showed that changes in the structure of zonal circulation in the Arctic region of the stratosphere can have a significant effect on such large-scale disturbances. Under certain conditions, for example, during a major SSW, the tide amplitude can change by a factor of 2–3, which is associated with the temperature and dynamic balance of the subpolar region.

Наблюдения короткопериодических волн камерой всего неба в инфракрасном свечении ОН над Якутском

Колтовской И.И.¹ (koltigor@mail.ru), Тыщук О.В.^{1,2} (oleSmile@mail.ru), Пермякова А.И.¹ (permyakova060199@mail.ru)

¹*Институт космических исследований и аэронавтики им. Ю. Г. Шафера СО РАН, Якутск, Россия*

²*Северо-Восточный федеральный университет имени М. К. Аммосова, Якутск, Россия*

Внутренние гравитационные волны – это пространственно-временные колебания воздушных масс. Генерация этих волн в основном происходит в тропосфере или на ее границе во время активных метеорологических процессов (погодный фронт, грозы, ураганы, бури, сильный ветер), орографических особенностей местности (обтекание воздушными потоками горных массивов, граница море–суша) и от импульсных

источников (запуски ракет, землетрясения, цунами, мощные взрывы). Регистрация волн проводилась при помощи инфракрасной цифровой камеры всего неба, установленной на оптической станции Маймага (Якутия). Для каждого случая обнаруженных внутренних гравитационных волн были определены такие параметры как: период волны, длина волны, скорость распространения, направление распространения, время и продолжительность наблюдения.

Observations of short-period waves with a camera of the all-sky camera in the infrared glow over Yakutsk

I.I. Koltovskoi¹ (koltigor@mail.ru), O.V. Tyschuk^{1,2} (oleSmile@mail.ru), A.I. Permyakova¹ (permyakova060199@mail.ru)

*Yu. G. Shafer Institute of Cosmophysical Research and Aeronomy of SB RAS, Yakutsk, Russia
M. K. Ammosov North-Eastern Federal University, Yakutsk, Russia*

Internal gravity waves are spatio-temporal fluctuations of air masses. The generation of these waves mainly occurs in the troposphere or at its boundary during active meteorological processes (weather front, thunderstorms, hurricanes, storms, strong wind), orographic features of the area (airflow around mountain ranges, sea-land boundary) and from impulsive sources (missile launches, earthquakes, tsunamis, powerful explosions). The waves were recorded using an infrared digital all-sky camera installed at the Maimaga optical station (Yakutia). For each case of detected internal gravity waves, such parameters were determined as: wave period, wavelength, propagation velocity, propagation direction, time and duration of observation.

К скорости распространения внутренних гравитационных волн

Закинян П.Г. (zakinyan@mail.ru), Закинян А.Р., Смерек Ю.Л.
Северо-Кавказский федеральный университет, Ставрополь, Россия

Уравнение Тейлора – Гольдштейна является волновым уравнением для линейных гравитационных волн. В работе рассматриваются двухмерные уравнения Эйлера для не вращающегося и невязкого течения, в приближении Буссинеска [1-4]. Уравнения линеаризуются в виде суммы установившихся значений и их возмущений. Также полагается, что в невозмущенном состоянии имеет место уравнение статики. Решение ищется в виде произведения функции от вертикальной координаты и бегущей волны. В уравнение в качестве параметра входит характерная высота, на которой плотность воздуха уменьшается в e раз. В результате получается уравнение, аналогичное уравнению Тейлора – Гольдштейна (Taylor, 1931; Goldstein, 1931).

В классическом уравнении Тейлора – Гольдштейна [2] основным слагаемым является слагаемое с частотой Брента – Вайсяля. В нашем случае – это квадрат частоты волн в бесконечно протяженной по вертикали атмосфере с длиной волны, пропорциональной характерной высоте. Исследование решений уравнения Тейлора – Гольдштейна проводится для простого случая постоянной фоновой стратификации, и когда длина волны намного меньше характерной высоты.

Из дисперсионного соотношения получено, что волновой вектор составляет угол с горизонталью. Несколько важных аспектов распространения волн подразумеваются под этим простым результатом. Частота волны не может быть больше, чем некоторое критическое значение, равное частоте колебаний волн на поверхности бесконечно протяженной по вертикали атмосфере (бесконечно глубокая жидкость). Когда угол равен нулю волна распространяется горизонтально, а частицы воздуха колеблются вертикально.

Когда частота колебания очень малая величина, соответствующая длинным волнам, угол приближается к 90 градусам, волна распространяется почти вертикально, и частицы воздуха колеблются почти горизонтально. Мы видим, что спектр частоты гравитационных волн ограничен этими двумя пределами.

Таким образом, частота колебаний по вертикали частиц воздуха, смещенных от положения равновесия, в устойчиво стратифицированной атмосфере равна частоте поверхностных волн в бесконечно протяженной по вертикали атмосфере. Это резонансная (собственная) частота колебания воздуха, и даже если бы можно было вообразить некоторый процесс, который вызовет вертикальную вибрацию с частотой, большей, чем эта, то эта вибрация не будет поддержана, и амплитуда колебания уменьшилась бы быстро с расстоянием от точки принуждения. Таким образом, максимальная частота внутренних гравитационных волн в устойчиво стратифицированной атмосфере равна частоте поверхностных волн в бесконечно протяженной по вертикали атмосфере; однако, существует широкий спектр волн, частоты которых меньше этого значения.

1. Holton J.R. An Introduction to Dynamic Meteorology. Fourth edition. Elsevier, 2004, p. 540.
2. Nappo C.J. An Introduction to Atmospheric Gravity Waves. International geophysics series, vol. 85. Elsevier, 2002, p. 279.
3. Pedlosky J. Waves in the Ocean and Atmosphere. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2003, p. 260.
4. Sutherland B.R. Internal gravity waves. Cambridge, Cambridge University Press, 2010, 394 p.

To the speed of propagation of internal gravitational waves

R.G. Zakinyan (zakinyan@mail.ru), A.R. Zakinyan, Yu.L. Smerek
North Caucasian Federal University, Stavropol, Russia

The Taylor – Goldstein equation is a wave equation for linear gravitational waves. The paper considers two-dimensional Euler equations for a non-rotating and inviscid flow, in the Boussinesq approximation [1-4]. The equations are linearized as a sum of steady-state values and their perturbations. It is also assumed that the equation of statics holds in the unperturbed state. The solution is sought as a product of a function of the vertical coordinate and the traveling wave. The characteristic height, at which the air density decreases by a factor of e , enters the equation as a parameter. The result is an equation similar to the Taylor–Goldstein equation. (Taylor, 1931; Goldstein, 1931).

In the classical Taylor – Goldstein equation [2], the main term is the term with the Brent-Väisälä frequency. In our case, this is the square of the wave frequency in an infinitely vertically extended atmosphere with a wavelength proportional to the characteristic height. The study of solutions to the Taylor-Goldstein equation is carried out for the simple case of constant background stratification, and when the wavelength is much less than the characteristic height.

It is obtained from the dispersion relation that the wave vector makes an angle with the horizontal. Several important aspects of wave propagation are implied by this simple result. The wave frequency cannot be greater than a certain critical value equal to the frequency of wave oscillations on the surface of an infinitely vertically extended atmosphere (an infinitely deep liquid). When the angle is zero, the wave propagates horizontally and the air particles oscillate vertically. When the oscillation frequency is very small, corresponding to long waves, the angle approaches 90 degrees, the wave propagates almost vertically, and the air particles oscillate almost horizontally. We see that the frequency spectrum of gravitational waves is limited by these two limits.

Thus, the frequency of vertical oscillations of air particles displaced from the equilibrium position in a stably stratified atmosphere is equal to the frequency of surface waves in an infinitely vertically extended atmosphere. This is the resonant (natural) frequency of the vibration of the air, and even if one could imagine some process that would cause a vertical vibration with a frequency greater than this, this vibration would not be maintained, and the amplitude of the vibration would decrease rapidly with distance from the point of compulsion. Thus, the maximum frequency of internal gravity waves in a stably stratified atmosphere is equal to the frequency of surface waves in an infinitely vertically extended atmosphere; however, there is a wide range of waves whose frequencies are less than this value.

1. Holton J.R. *An Introduction to Dynamic Meteorology*. Fourth edition. Elsevier, 2004, p. 540.
2. Nappo C.J. *An Introduction to Atmospheric Gravity Waves*. International geophysics series, vol. 85. Elsevier, 2002, p. 279.
3. Pedlosky J. *Waves in the Ocean and Atmosphere*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2003, p. 260.
4. Sutherland B.R. *Internal gravity waves*. Cambridge, Cambridge University Press, 2010, 394 p.

СЕКЦИЯ 8. СТРУКТУРА и СОСТАВ ВЕРХНЕЙ АТМОСФЕРЫ ЗЕМЛИ и ДРУГИХ ПЛАНЕТ

Председатель: д.ф.-м.н. **Клименко М.В.** (КФ ИЗМИРАН, Калининград, Россия)

Сопредседатель: д.ф.-м.н. **Мингалев И.В.** (ПГИ, Апатиты, Россия)

SESSION 8. STRUCTURE of UPPER ATMOSPHERE of the EARTH and OTHER PLANETS

Chairman: Dr. **M.V. Klimenko** (IZMIRAN, Kaliningrad, Russia)

Co-chairman: Dr. **I.V. Mingalev** (PGI, Apatity, Russia)

Устные доклады

Высота и микрофизические свойства частиц полярных мезосферных облаков на основе фотометрии трехцветными камерами всего неба

Угольников О.С. (ougolnikov@gmail.com)

Институт космических исследований РАН, Москва, Россия

Полярные мезосферные (или серебристые) облака появляются в высоких широтах в летние месяцы и являются чувствительным маркером климатических изменений, происходящих в верхней мезосфере. Во время летнего минимума температура на высотах 80-85 км опускается к порогу замерзания льда и может опускаться еще ниже за счет прохождения акустико-гравитационных волн.

Увеличение частоты появления и яркости облаков в последние десятилетия может быть связано как с негативным трендом температуры за счет механизма радиативного выхолаживания на молекулах парниковых газов, так и с увеличением содержания водяного пара в мезосфере. Первый процесс должен сопровождаться эффектом «оседания» верхней атмосферы и, как следствие, постепенного уменьшения высоты облачного слоя. Второй эффект должен приводить к увеличению роста среднего размера частиц. Таким образом, долговременные измерения высоты и размеров смогут дать информацию о преобладающих климатических процессах в этом слое атмосферы.

В работе предлагается методика одновременного измерения высоты и размера частиц мезосферных облаков на основе трехцветной фотометрии облачных полей камерами всего неба. Измерения высоты основаны на анализе изменения их цветового индекса в процессе погружения в тень Земли, а оценка размеров частиц – на основе изменения этого индекса с углом рассеяния и сопоставления с теорией Ми. Показано, что точность измерений может быть сопоставима с лидарными и спутниковыми методами. При этом измерения камерами всего неба имеют несравнимо меньшую стоимость и могут стать основой обширного (сетевого) мониторинга облаков с большой территории. При наличии наблюдательных пунктов в 70-200 км друг от друга высота облаков может также определяться и на основе триангуляции. В докладе представляются результаты измерений, проведенных летом 2020-2022 годов.

Altitude and Microphysical Properties of Polar Mesospheric Clouds Basing on Photometry by Three-Color All-Sky Cameras

O.S. Ugolnikov (ougolnikov@gmail.com)

Space Research Institute RAS, Moscow, Russia

Polar mesospheric (or noctilucent) clouds appear in high latitudes in summer, being the sensitive marker for climate changes in upper mesosphere. During the summer minimum the temperature at 80-85 km falls to the ice frost level and can decrease below it owing to gravity waves propagation.

Increase of occurrence rate and brightness of clouds during the recent decades can be related with negative temperature trends by mesosphere radiative cooling on greenhouse gases and also with increase of mesospheric humidity. First process causes the atmospheric shrinking and decrease of mean clouds altitude. Second effect can be displayed by increase of mean particle size. Long-time series of altitude and particle size measurements can provide information about basic processes in this atmospheric layer.

In this work we suggest the method of simultaneous measurements of altitude and mean size of mesospheric ice particles basing on three-color photometry of cloud fields by all-sky cameras. Altitude estimation is based on color index analysis as the cloud immerses into the Earth's umbra, the size is measured by the angular dependence of color index according to Mie theory. We show that the accuracy of estimations is comparable with modern lidar and satellite techniques, however, all-sky camera analysis is incomparably less expensive. It can be the base of expanded net survey of noctilucent clouds. If the observational sites are in 70-200 km one from another, the altitude of clouds can be also estimated by well-known triangulation analysis. In this work we present the results of noctilucent clouds measurements in summer 2020-2022.

Роль Джоулева нагрева в формировании параметров атмосферы во время геомагнитной бури.

Бессараб Ф.С. (bessarabf@wdizmiran.ru), Суходолов Т.В., Клименко М.В., Клименко В.В., Розанов Е.В.

Калининградский Филиал института Земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова Российской Академии наук (КФ ИЗМИРАН), Калининград, Россия

В данной работе представлено исследование влияния Джоулева нагрева на параметры ионосферы и верхней атмосферы во время геомагнитной бури. Геомагнитные бури - события, оказывающие огромное влияние на нейтральные ионизированные компоненты верхней атмосферы в глобальном масштабе. В представленной работе мы рассмотрели эффекты бури Святого Патрика (17-18 марта 2015 года) в верхней атмосфере и ионосфере для проверки возможностей модели всей атмосферы EAGLE моделировать сильные геомагнитные возмущения. Исследователи неоднократно обращались к геомагнитной буре 17-18 марта 2015 года, поскольку она была одной из самых сильных в 24-м цикле солнечной активности. Особенность нашего исследования состояла в том, что мы рассмотрели роль Джоулева нагрева на параметры атмосферы/ионосферы в диапазоне высот 80 – 500 км, а также сравнили два подхода к расчету Джоулева источника в модели всей атмосферы.

Модель всей атмосферы EAGLE создана путем объединения модели нижней и средней атмосферы HAMMONIA и модели верхней атмосферы GSM TIP. В модели EAGLE мы использовали следующую схему связи HAMMONIA и GSM TIP. В расчетах в модели HAMMONIA использовался "стандартный" волновой форсинг и ассимилировались наблюдаемые распределения ветра и температуры с уровнями давления от 850 гПа до 1 гПа. Результаты глобальных распределений нейтральной температуры, скорости ветра и нейтральной плотности на высоте 80 км, полученные в модели HAMMONIA, были использованы в качестве нижних граничных условий в модели GSM TIP. Обмен данными между моделями осуществлялся с шагом в 3 мин путем пространственно-временной

интерполяции данных из модели HAMMONIA в координатную систему GSM TIP. По аналогичной схеме из GSM TIP в HAMMONIA передается источник Джоулева нагрева. Поскольку высотные области моделей HAMMONIA и GSM TIP перекрываются, мы смогли сравнить температуру и горизонтальные скорости в этих двух моделях с данными наблюдений. Оказалось, что для улучшения результатов расчетов модели EAGLE в спокойных геомагнитных условиях необходимо использовать температуру и горизонтальные скорости из HAMMONIA, вплоть до высот 120 км.

Модельное исследование проводилось для периода с 1 по 31 марта 2015 года, который включает в себя бурю Святого Патрика. В качестве параметров, определяющих влияние геомагнитных возмущений на верхнюю атмосферу, в модели GSM TIP используются разность потенциала через полярную шапку и токи второй зоны, а также высыпания высокоэнергетических частиц в авроральной области. Мы провели несколько модельных расчетов. В первой симуляции Джоулев диссипативный нагрев, рассчитанный в GSM TIP, не передавался в HAMMONIA и, соответственно, не нагревал нейтральную атмосферу ниже 120 км, а во второй этот источник нагрева был учтен. Джоулев нагрев оказывает максимальное влияние на тепловой баланс нейтрального газа на высотах E-региона, но также заметен и на меньших высотах. Также мы сравнили Джоулев нагрев, рассчитываемый самосогласованным образом в GSM TIP с аппроксимацией этого источника в HAMMONIA. Показано, что Джоулев нагрев влияет на параметры нейтрального и ионизированного газа не только в высоких, но и низких широтах и на экваторе.

The role of Joule heating in the formation of atmospheric parameters during a geomagnetic storm.

F.S. Bessarab (bessarabf@wdizmiran.ru), T.V. Sukhodolov, M.V. Klimenko, V.V. Klimenko, E.V. Rozanov

West Department of Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation Russian Academy of Sciences (WD IZMIRAN), Kaliningrad, Russia

This paper presents an investigation of Joule heating influence on ionospheric and upper atmosphere parameters during a geomagnetic storm. Geomagnetic storms are events that have a huge impact on the neutral ionized components of the upper atmosphere on a global scale. In this paper, we examined the effects of the St. Patrick storm (March 17-18, 2015) in the upper atmosphere and ionosphere to test the ability of the EAGLE whole-atmosphere model to simulate strong geomagnetic perturbations. Researchers repeatedly addressed the March 17-18, 2015 geomagnetic storm because it was one of the strongest in the 24th solar cycle. The specific feature of our study was that we considered the role of Joule heating on atmospheric/ionospheric parameters in the altitude range of 80 to 500 km, and we compared two approaches to calculating the Joule source in the whole-atmosphere model.

The whole atmosphere model EAGLE is created by coupling the lower and middle atmosphere model HAMMONIA and the upper atmosphere model GSM TIP. In the EAGLE model we used the following scheme of linking HAMMONIA and GSM TIP.

The calculations in the HAMMONIA model used "standard" wave forcing and assimilated the observed wind and temperature distributions with pressure levels from 850 hPa to 1 hPa. The results of the global distributions of neutral temperature, wind speed and neutral density at 80 km altitude obtained in the HAMMONIA model were used as the lower boundary conditions in the GSM TIP model. The data exchange between the models was carried out with a step of 3 min by spatiotemporal interpolation of the data from the HAMMONIA model into

the GSM TIP coordinate system. The Joule heating source is transferred to HAMMONIA from the GSM TIP by a similar scheme. Since the altitude areas of the HAMMONIA and GSM TIP models overlap, we were able to compare the temperature and horizontal velocities in these two models with the observational data. It turned out that to improve the results of the EAGLE model calculations under quiet geomagnetic conditions, it is necessary to use the temperature and horizontal velocities from HAMMONIA, up to altitudes of 120 km.

Model simulations were made for the period from March 1 to 31, 2015, which includes St. Patrick's Storm. As parameters determining the effect of geomagnetic disturbances on the upper atmosphere, the GSM TIP model uses the cross-polar cap potential, Region 2 field-aligned currents, and precipitation of high-energy particles in the auroral region.

We performed several model calculations. In the first simulation, the Joule dissipative heating calculated in the GSM TIP was not transferred to HAMMONIA and, accordingly, did not heat the neutral atmosphere below 120 km, while in the second one this heating source was taken into account. Joule heating has the maximum effect on the heat balance of the neutral gas at E-region altitudes, but is also noticeable at lower altitudes. We also compared the Joule heating calculated in a self-consistent way in the GSM TIP with the approximation of this source in HAMMONIA. It is shown that the Joule heating affects the neutral and ionized gas parameters not only at high, but also at low latitudes and at the equator.

Долготная зависимость ионосферного эффекта последействия геомагнитных бурь

Белюченко К.В.¹(kdei@list.ru), Клименко М. В.³, Клименко В. В.³, Ратовский К. Г.²

¹Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

²Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия

³Калининградский филиал Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН, Калининград, Россия

Ранее на основе Глобальной Самосогласованной Модели Термосферы, Ионосферы и Протоносферы (ГСМ ТИП) были выявлены ионосферные эффекты последействия геомагнитной бури. Результаты статистических исследований по данным наземных наблюдений ГНСС приемников и ионозондов указывают на то, что ионосферные эффекты последействия геомагнитных бурь действительно существуют. Было показано, что ионосферные эффекты последействия зависят от сезона и от интенсивности геомагнитной бури. В данной работе речь пойдет о долготной зависимости эффектов последействия. Нами были проведены расчеты бурь с разными моментами начала и было показано, что долготная зависимость возмущений не зависит от времени начала бури. Будет осуществлена попытка интерпретации долготной зависимости эффекта последействия.

Работа выполнена в Лаборатории исследований озонового слоя и верхних слоев атмосферы СПбГУ при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (соглашение № 075-15-2021-583).

Longitudinal dependence of the ionospheric after-effect of geomagnetic storms

Belyuchenko K.V.¹ (kdei@list.ru), Klimenko M.V.³, Klimenko V.V.³, Ratovsky K.G.²

¹Saint Petersburg State University, Saint Petersburg, Russia

²Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS, Irkutsk, Russia

³West Department of Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation RAS, Kaliningrad, Russia

Earlier, using the Global Self-Consistent Model of the Thermosphere, Ionosphere and Protonosphere (GSM TIP) we revealed ionospheric after-effects of a geomagnetic storm. The

results of statistical studies based on ground-based observations of GNSS receivers and ionosondes proofed the existence of ionospheric aftereffects of geomagnetic storms. It was shown that the ionospheric aftereffects depend on the season and on the intensity of the geomagnetic storm. In this report, we will focus on the longitudinal dependence of ionospheric storm aftereffects. We have carried out calculations of storms with different onset epochs and have shown that the longitudinal dependence of disturbances does not depend on the storm commencement. In addition we attempted to interpret the longitudinal dependence of the ionospheric storm aftereffect.

The work was carried out at the Laboratory for Research on the Ozone Layer and Upper Atmosphere of St. Petersburg State University with the support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (agreement No. 075-15-2021-583).

Вклад высокоширотных ионосферных возмущений в рост сцинтилляций сигналов ГНСС

Белаховский В.Б.¹ (belakhov@mail.ru), Джин Я.², Васильев А.Е.³, Калишин А.С.⁴, Милош В.²,
Ролдугин А.В.¹

¹Полярный геофизический институт, Апатиты, Россия

²Университет Осло, Осло, Норвегия

³Институт прикладной геофизики имени академика Е.К. Федорова, Москва, Россия

⁴Арктический и антарктический НИИ, Санкт-Петербург, Россия

С использованием GPS приемника NovAtel на станции Skibotn (Норвегия) и приемника ГНСС Septentrio PolaRx5 (г. Апатиты, Россия), работающего под управлением ФГБУ "ИПГ", исследован вклад ионосферных возмущений в рост сцинтилляций ГНСС сигналов (на частотах L1, L2). Для идентификации ионосферных возмущений использованы данные радара EISCAT UHF (г. Тромсе), данные ионозонда вертикального зондирования CADI, установленного на гидрометеорологической станции «Ловозеро». Использованы оптические наблюдения за полярными сияниями на станциях Skibotn и в обсерватории ПГИ «Ловозеро».

Сравнение фазовых GPS сцинтилляций по данным приемника на станции Skibotn с данными радара UHF EISCAT за 2015-2022 г.г. показывает, что основной вклад в рост фазовых сцинтилляций вносят возмущения в E-слое ионосферы. При этом возмущения в F-слое ионосферы не вносят заметного вклада в фазовые сцинтилляции. Не обнаружено роста амплитудных GPS сцинтилляций во время рассмотренных событий.

Сравнение ГНСС сцинтилляций на станции Апатиты с данными ионозонда показывает, что в период заметного роста сцинтилляций наблюдается формирование Es-слоя. Рост сцинтилляций сопровождается появлением дискретных форм полярных сияний в зеленой линии (557.7 нм) при отсутствии сильных возмущений в красной линии (630.0 нм), что также говорит о вкладе возмущений в E-области ионосферы в рост сцинтилляций сигналов ГНСС. Обсуждаются возможные механизмы формирования ионосферных неоднородностей, приводящие к рассеянию сигналов ГНСС.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 18-77-10018-п (Белаховский В.Б.).

The contribution of high-latitude ionospheric disturbances to the growth of GNSS signal scintillations

Belakhovsky V.B.¹ (belakhov@mail.ru), Jin Y.², Vasiliev A.E.³, Kalishin A.S.⁴, Miloch V.², Roldugin A.V.¹

¹Polar Geophysical Institute, Apatity, Russia

²University of Oslo, Oslo, Norway

Using the NovAtel GPS receiver at the Skibotn station (Norway) and the Septentrio PolaRx5 GNSS receiver (Apatity, Russia) operating under the control of the IPG, the contribution of ionospheric disturbances to the growth of GNSS signal scintillations (at frequencies L1, L2) was studied. To identify ionospheric disturbances, data from the EISCAT UHF radar (Tromsø) and data from the CADI vertical sounding ionosonde installed at the Lovozero hydrometeorological station were used. Optical observations of the auroras were used at the Skibotn stations and at the Lovozero PGI observatory.

Comparison of GPS phase scintillations from receiver data at Skibotn station with UHF EISCAT radar data for 2015-2022 years shows that the main contribution to the growth of phase scintillations is made by disturbances in the E-layer of the ionosphere. In this case, disturbances in the F-layer of the ionosphere do not make a significant contribution to phase scintillations. No increase in amplitude GPS scintillations was found during the considered events.

Comparison of GNSS scintillations at the Apatity station with ionosonde data shows that during the period of a noticeable increase in scintillations, the formation of an Es-layer is observed. The growth of scintillations is accompanied by the appearance of discrete forms of auroras in the green line (557.7 nm) in the absence of strong disturbances in the red line (630.0 nm), which also indicates the contribution of disturbances in the ionospheric E-region to the growth of GNSS signal scintillations. Possible mechanisms for the formation of ionospheric irregularities leading to the scattering of GNSS signals are discussed.

The study was supported by the grant of the Russian Science Foundation No. 18-77-10018-p (Belakhovsky V.B.).

Модельные представления параметров атмосферы в контексте наземных наблюдений интерферометром Фабри-Перо

Артамонов М.Ф. (artamonov.maksim@iszf.irk.ru), Васильев Р.В.
Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия

Интерферометры Фабри-Перо (ИФП) используются для исследования атмосферы Земли посредством наблюдения собственного свечения атмосферы, имеющего слоистую структуру на различных высотах. Атомарный кислород $O(^1D)$ формирует одну из наиболее интенсивных линий с длиной волны 630 нм, высвечивающуюся на высотах 200-300 км. Неотъемлемой особенностью исследования с помощью ИФП наземного размещения является интегральный характер наблюдения свечения, т.е. камера прибора регистрирует суммарную интенсивность всей толщи слоя, в пределах которого происходит эмиссия. Поскольку в пределах толщины слоя меняется интенсивность свечения атмосферы, температура, меридиональная и зональная скорости нейтральной компоненты, интерферометр регистрирует некоторые «усреднённые» значения данных параметров области высвечивания. В виду того, что интенсивность напрямую связана с количеством частиц, несущих информацию о температуре и скорости ветра с одной стороны, и является основной величиной, измеряемой ИФП, с другой, в настоящем исследовании предполагается, что значения интенсивности на отдельных высотах можно рассматривать в качестве весовых факторов для оценки вкладов температур и скоростей ветра на соответствующих высотах. При этом «усредненные» значения температур и скоростей нейтральной атмосферы, наблюдаемые ИФП, можно определить, как интеграл реальных значений, взвешенный по высотному профилю интенсивности и нормализованный по суммарной интенсивности.

В рамках настоящего исследования было проведено моделирование интенсивности свечения для линии 630 нм с применением данных моделей IRI-2016 и NRLMSIS 2.0 на высотах 150-300 км. Объемная плотность интенсивности как функция высоты рассчитывалась в соответствии с работой [Link et al.]. Концентрации ионизованных и нейтральных компонент, а также электронов рассчитывались на основе данных атмосферных моделей и усреднялись для периода 2017-2020 гг. С использованием полученного высотного профиля интенсивности были рассчитаны средневзвешенные значения температуры (профиль из NRLMSIS 2.0.), скоростей меридионального и зонального ветра (профиль из HWM14) в пределах светящегося слоя, т.е. смоделированы значения параметров, наиболее близкие к реальным наблюдениям.

На следующем этапе сравнивались данные полученной расчётной модели с данными наблюдений ИФП за 2017-2020 гг. Построены разностные карты данных ИФП и модели, вычислены коэффициенты корреляции между данными ИФП и модели в разрезе времени.

В ходе сравнения оказалось, что высокую степень корреляции между ИФП и моделью показывают температура и скорость зональной компоненты нейтральной атмосферы. Следует отметить ярко выраженную особенность предрассветной температуры зимой, значительно большую прогнозируемой моделью. Возможно, это связано с тем, что модель не учитывает влияние магнитно-сопряженных точек на динамику температуры.

Результаты наблюдений получены с использованием оборудования Центра коллективного пользования «Ангара» <http://ckp-rf.ru/ckp/3056/>. Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России.

Link, R., and Cogger, L. L. (1988), A reexamination of the O I 6300-Å nightglow, *J. Geophys. Res.*, 93(A9), 9883– 9892, doi:10.1029/JA093iA09p09883

Atmospheric parameters modeling in the context of ground-based observations by Fabry-Perot interferometer

Artamonov M.F. (artamonov.maksim@iszf.irk.ru), Vasilyev R.V.
Institute of Solar Terrestrial Physics SB RAS, Irkutsk, Russia

Fabry-Perot interferometers (FPIs) are used to study the Earth's atmosphere by observing airglow of the atmosphere at various altitudes. Atomic oxygen O(1D) is one of the most intense emission source with a wavelength of 630 nm at 200-300 km. Ground-based FPI accumulates integral value of the glow, i.e. FPI's cam registers the total intensity of the entire thickness of the emission layer. Since the atmospheric glow intensity, temperature, meridional and zonal velocities of the neutral component undergo changes within the layer thickness, the interferometer allows us to calculate some "averaged" values of these parameters. On one hand, intensity is directly related to the number of particles that carry information about temperature and wind speed, on the other hand, it is the main quantity measured by FPI. This study assumes that intensity values at individual heights can be considered as weight factors for estimating the contributions of temperatures and wind speeds at the corresponding heights. So, the "averaged" values of temperatures and velocities of the neutral atmosphere, observed by FPI, can be determined as an integral sum of real values, weighted by intensity height profile and normalized by total intensity.

In this study, we simulated the glow intensity for the 630 nm line using the data of the IRI-2016 and NRLMSIS 2.0 models at altitudes of 150–300 km. Volumetric intensity density as a function of height was calculated according to [Link et al.]. The concentrations of all needed components, were calculated based on atmospheric model data and averaged over 2017–2020.

We calculated the average weighted by intensity values of temperature (NRLMSIS 2.0.), meridional and zonal wind velocities (HWM14) within the luminous layer.

Next stage, the model data were compared with the observational FPI data for 2017-2020. Difference maps of FPI data and model were built, correlation coefficients between FPI data and model were calculated over time.

It turned out that model and FPI's temperature and velocity of the zonal speed component of neutral atmosphere are well correlated. It should be noted that there is a pronounced feature of the predawn FPI temperature in winter. It was much higher than one predicted by the model. Possibly the model does not take into account the influence of magnetically conjugated points on the temperature dynamics.

The observation results were obtained using the equipment of Shared Equipment Center «Angara» <http://ckp-rf.ru/ckp/3056/>. The work was financially supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation.

Link, R., and Cogger, L. L. (1988), A reexamination of the O I 6300-Å nightglow, *J. Geophys. Res.*, 93(A9), 9883– 9892, doi:10.1029/JA093iA09p09883

Ионосферные возмущения ассоциированные с Mw7.8 землетрясением в Турции 6 февраля 2023 г.

Салихов Н.М (N1_Nazyf@mail.ru), Пак Г.Д., Нуракинов С.М.
ДТОО Институт ионосферы АО НЦКИТ, Алматы, Казахстан

В работе приведены результаты наблюдений и анализ временной сопряженности появления возмущений в доплеровском сдвиге частоты (ДСЧ) сигнала, отраженного от ионосферы, с процессами подготовки и во время Mw=7.8 землетрясения в Турции 6 февраля 2023 г в 1:17:34 UTC. Наблюдения выполнены на двухскачковой радиотрассе «Кувейт – Институт ионосферы» (г.Алматы) протяженностью 3010 км. Расстояние от эпицентра землетрясения до подионосферной точки первого скачка радиотрассы равнялось 1591 км. Высокий уровень автоматизации доплеровского ионозонда Института ионосферы обеспечивает круглосуточный режим измерений ДСЧ и точность измерения доплеровских частот не хуже 0,01 Гц, что на 1,5-2 порядка меньше фоновых вариаций ДСЧ в F-области ионосферы. В 01:34:12 UTC примерно через 17 минут (998с) после основного толчка в вариациях доплеровской частоты было зарегистрировано характерное возмущение длительностью 60-80 секунд. Подобный эффект в ионосфере был зарегистрирован ранее доплеровским ионозондом при Mw=7.8 землетрясении 25.04.2015 г. в Непале на расстоянии 1731км от эпицентра. Расчеты показали, что время отклика на доплеровской записи складывается из времени распространения поверхностной сейсмической волны до подионосферной точки (430,5 с) и времени распространения акустической волны (567,5 с) от поверхности земли до высоты точки отражения радиоволны, равной 232 км. Согласно выполненным расчетам, время появления отклика в доплеровской частоте соответствует моменту прихода акустической волны на высоты F2-слоя ионосферы.

Учитывая катастрофические последствия крупных землетрясений, особое внимание уделяется обнаружению ионосферных аномалий - прекурсоров сейсмических событий. Акустический механизм появления ионосферных возмущений наиболее хорошо изучен при проведении промышленных и подземных ядерных взрывов и применим для объяснения ко-сейсмических возмущений, но не позволяет объяснить эффекты в ионосфере, связанные с процессами подготовки землетрясения. Нами был проведен анализ вариаций ДСЧ ионосферного сигнала за период с 17 января по 17 февраля 2023 г. Установлено значительное повышение доплеровской частоты в осредненных

среднесуточных показателях за 8 и 3 дня до основного толчка, соответственно 29 января и 3 февраля. Вероятный механизм передачи возмущения от литосферы до высот ионосферы можно рассматривать в рамках концепции литосферно-атмосферно-ионосферных связей, что широко обсуждается в современной научной литературе. Отметим, что сейсмо-ионосферные возмущения были зарегистрированы в период спокойной геомагнитной обстановки.

Выводы.

Доплеровским методом зарегистрированы два типа возмущений в ионосфере, возникшие накануне и во время катастрофического М7.8 землетрясения в Турции 6 февраля 2023:

– возмущение в доплеровской частоте, возникшее в результате последовательного распространения поверхностных сейсмических волн от эпицентра землетрясения до подионосферной точки, которые в свою очередь порождают акустические волны, способные достигать область отражения зондирующей радиоволны в ионосфере.

– возмущения в доплеровском сдвиге частоты ионосферного сигнала, возникшие примерно за 8 и 3 дня до основного толчка. Перспективы исследований в этом направлении связаны с изучением механизмов литосферно-атмосферно-ионосферных связей при землетрясениях и выявлением возможных прекурсоров крупных землетрясений.

Ionospheric disturbances associated with the 6 February 2023 Mw7.8 Turkey earthquake

N.M. Salikhov (N1_Nazyf@mail.ru), G.D. Pak, S.M. Nurakynov

Institute of the Ionosphere, JSC National center of space research and technology, Almaty, Kazakhstan

The paper presents the results of observations and analysis of the time contingency of the appearance the disturbances in the Doppler frequency shift (DFS) of the ionospheric signal on the eve and during the Mw=7.8 earthquake in Turkey on February 6, 2023 at 1:17:34 UTC. Observations were made on a two-hop radio path "Kuwait - Institute Ionosphere" (Almaty) with a length of 3010 km. The distance from the epicenter of the earthquake to the subionospheric point of the first hop of the radio path was 1591 km. The high level of automation of the Doppler ionozond ensures a round-the-clock mode of measurement and accuracy of the Doppler frequency measurement at least 0.01 Hz, which is 1. 5-2 orders less than the background variations in the F-region of the ionosphere. At 01:34:12 UTC, approximately 17 minutes (998s) after the main shock, a characteristic disturbance lasting 60-80 seconds was registered in the Doppler frequency variations. A similar effect in the ionosphere was previously recorded by a Doppler ionosonde at Mw=7.8 earthquake on April 25, 2015 in Nepal at a distance of 1731 km from the epicenter. Calculations have shown that the response time on the Doppler record consists of the time of the surface seismic wave propagation to the subionospheric point (430.5 s) and the time of the acoustic wave propagation (567.5 s) from the ground to the altitude of the radio wave reflection point, of 232 km. According to the performed calculations, the time of appearance of the response in the Doppler frequency corresponds to the moment of arrival of the acoustic wave at the heights of the F2-layer of the ionosphere.

Considering the catastrophic consequences of large earthquakes, a special attention is paid to the detection of ionospheric anomalies as precursors of seismic events. The acoustic mechanism of the appearance of ionospheric disturbances is best studied during industrial and underground nuclear explosions and is applicable to explain co-seismic disturbances, but does

not allow one to explain the effects in the ionosphere associated with earthquake preparation processes. We have analyzed the variations in the DFS of the ionospheric signal for the period from January 17 to February 17, 2023. A significant increase in the Doppler frequency was found in the average daily values for 8 and 3 days before the main shock, on January 29 and February 3, respectively. The probable mechanism of disturbance transmission from the lithosphere to the heights of the ionosphere can be considered within the framework of the concept of Lithosphere-Atmosphere-Ionosphere coupling, which is widely discussed in modern scientific literature. Note that seismo-ionospheric disturbances were recorded during a period of calm geomagnetic conditions.

Conclusions.

Doppler method recorded two types of disturbances in the ionosphere that arose on the eve of and during the catastrophic M7.8 earthquake in Turkey on February 6, 2023:

– A distinct disturbance in the Doppler frequency resulting from the successive propagation of surface seismic waves from the epicenter of an earthquake to the subionospheric point, which in turn generate acoustic waves

–The disturbances in the Doppler frequency shift of ionospheric signal that arose about 8 and 3 days before the main shock. Prospects for research in this direction are related to the study of the mechanisms of Lithosphere-Atmosphere-Ionosphere coupling during earthquakes and the identification of possible precursors of large earthquakes.

Оценка воздействия спрайтов с GHOST на ионосферу по данным ионозонда «DPS-4» и грозопеленгационной сети «Веря-МР»

Васильев Р.В. (roman_vasilyev@iszf.irk.ru), Ратовский К.Г.
Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия

В настоящее время известно большое количество быстрых транзиентных оптических событий в верхней атмосфере сопровождающихся приземными грозами. Одним из событий, развивающихся в верхней атмосфере является GHOST (Green emissions from excited Oxygen in Sprite Tops). GHOST это верхняя часть спрайта (80-90 км) - молниевое разряда в мезосфере, возникающего одновременно с мощным тропосферным молниевым разрядом. Поскольку физика стримерного разряда молнии подразумевает создание лавины свободных электронов, это значит, что на высоте 80-90 км, в области мезопаузы, или в D-области ионосферы, во время развития спрайта сопровождающегося GHOST, возникает дополнительная ионизация среды. Время жизни свободных электронов в D-области достаточно велико, поэтому над регионами с грозами могут образовываться спорадические слои, изменяться прозрачность среды для коротких радиоволн. В докладе приводятся статистическое исследование характеристик ионосферы получаемых ионозондом «DPS-4» расположенном в Иркутске (Россия) в присутствии гроз действующих вблизи ионозонда полученных при помощи базы данных грозопеленгационной сети «Веря-МР».

Estimation of the impact from sprites with GHOSTs on the ionosphere according to the data of the DPS-4 ionosonde and the Vereya-MR lightning detection network

R.V. Vasilyev (roman_vasilyev@iszf.irk.ru), K.G. Ratovsky
Institute of Solar Terrestrial Physics SB RAS, Irkutsk, Russia

At the moment we are know a lot of fast optical transients in upper atmosphere accompanied by the thunderstorms. One of the events developing in the upper atmosphere is the GHOST (Green emissions from excited Oxygen in Sprite Tops). GHOST is an upper part of sprite (80-90 km). Sprite is the lightning discharge in the mesosphere appearing simultaneously with the powerful tropospheric lightning. As the physic of strimmer discharge assume developing the avalanche of free electrons this mean additional ionization near mesopause or in D-region of ionosphere when the sprite with GHOST appear. The lifetime of free electrons in the D-region rather long therefore over the regions with thunderstorms one can appear sporadic layers or the transparency for HF radiowaves changes. The work describe statistic research the ionospheric characteristics obtained by the DPS-4 ionosonde placed in Irkutsk (Russia) at the action of thunderstorms nearby obtained by the Vereya-MR lightning detection network.

Температурная структура и климатология водяного пара в средней и верхней атмосфере Марса по данным эксперимента ACS миссии ExoMars/TGO

Беляев Д.А. (dbelyaev@cosmos.ru), Федорова А.А., Трохимовский А., Стариченко Е.Д.,
Кораблев О.И.

Институт космических исследований РАН, Москва, Россия

Температура и плотность средней (50-100 км) и верхней (>100 км) атмосферы Марса являются ключевыми параметрами при исследовании процессов диссипации частиц, например водяного пара, с планеты. Наблюдения мезосферы и термосферы Марса российским прибором АЦС (ACS - Atmospheric Chemistry Suite) [1] на космическом аппарате ExoMars TGO (Trace Gas Orbiter) позволили исследовать вертикальное распределение плотности и температуры в рекордно широком диапазоне высот, от 10 до 180 км с разрешением 1 км. Измерения проводятся спектрометрическим каналом MIR (middle infrared) прибора ACS с высокой разрешающей способностью по спектру, $\lambda/\Delta\lambda \sim 25000$, в полосах поглощения CO_2 и H_2O около 2.65-2.7 мкм в режиме солнечного просвечивания атмосферы.

В настоящей работе представлены результаты наблюдений за два Марсианских года (MY): с середины MY 34 (Май 2018 года) до середины MY 36 (Февраль 2022 года), включая глобальную пылевую бурю 34го MY. По полученным высотным профилям температуры и плотности CO_2 были выявлены сезонные вариации мезопаузы – температурного минимума всей атмосферы, а также высоты гомопаузы – слоя, выше которого равномерно турбулентное перемешивание атмосферы меняется на молекулярное, индивидуальное для каждой компоненты. Сравнение температур между утренним и вечерним терминаторами планеты позволило выявить суточные приливные волны в атмосфере [2].

Параллельно, были выявлены всплески содержания водяного пара в периоды глобальной пылевой бури 34го MY, а также лета в южном полушарии в 34й и 35й MY. В эти сезоны наблюдался подъём относительного содержания воды до значений 10-50 ppm (частей на миллион) на крайне больших высотах, 100-120 км [3]. По восстановленным температурам было посчитано, что повышенное содержание сопровождается перенасыщением водяного пара в мезосфере, на высотах 60-120 км [4]. Здесь, в результате эффективного фотолиза молекулы H_2O под действием солнечного излучения высвобождается атомарный водород, который далее переносится в ионосферу и покидает планету. Таким образом, было показано, что в сезоны пылевой бури и лета в южном полушарии Марс усиленно теряет воду.

1. Korablev O.I. et al. (2018). The Atmospheric Chemistry Suite (ACS) of three spectrometers for the ExoMars 2016 trace gas orbiter. *Space Science Reviews*, 214(1). <https://doi.org/10.1007/s11214-017-0437-6>.
2. Belyaev D.A. et al. (2022). Thermal structure of the middle and upper atmosphere of Mars from ACS/TGO CO₂ spectroscopy. *J. Geophys. Res.-Planets* 127. <https://doi.org/10.1029/2022je007286>.
3. Belyaev D.A. et al. (2021). Revealing a high water abundance in the upper mesosphere of Mars with ACS onboard TGO. *Geophysical Research Letters*, 48, e2021GL093411. <https://doi.org/10.1029/2021GL093411>.
4. Fedorova A., et al. (2023). A two-Martian years survey of the water vapor saturation state on Mars based on ACS NIR/TGO occultations. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 128, e2022JE007348. <https://doi.org/10.1029/2022JE007348>.

Temperature structure and climatology of water vapor in the middle and upper atmosphere of Mars as measured by the ACS instrument of the ExoMars/TGO mission

D.A. Belyaev(dbelyaev@cosmos.ru), A.A. Fedorova, A.Yu. Trokhimovskiy, E.D. Starichenko, O.I. Korablev

Space Research Institute of the RAS, Moscow, Russia

The temperature and density of the middle (50-100 km) and upper (>100 km) atmosphere of Mars are key parameters to study the processes of species dissipation, such as water vapor, from the planet. Observations of the mesosphere and thermosphere of Mars by the Russian ACS instrument (ACS - Atmospheric Chemistry Suite) [1] on the ExoMars TGO spacecraft (Trace Gas Orbiter) made it possible to study the vertical distribution of density and temperature in very broad altitude range, from 10 to 180 km, with a resolution of 1 km. The measurements are performed by the MIR (middle infrared) echelle spectrometer of ACS with a high spectral resolution, $\lambda/\Delta\lambda \sim 25000$, in the absorption bands of CO₂ and H₂O around 2.65-2.7 microns in the regime of solar occultation of the atmosphere.

In this paper, we present the results of observations for two Martian years (MY): from the middle of MY 34 (May 2018) to the middle of MY 36 (February 2022), including the global dust storm MY 34. The retrieved altitude profiles of the temperature and CO₂ density made it possible to reveal seasonal variations of the mesopause – the temperature minimum of the entire atmosphere, as well as the height of the homopause – the boundary layer above which a diffusive separation of minor species occurs with individual scale heights. A comparison of temperatures between the morning and evening terminators of the planet revealed the diurnal tidal waves in the atmosphere [2].

In parallel, regular bursts water vapor abundance were detected during the global dust storm of MY 34 and at summer in the southern hemisphere of MY 34 and MY 35. During these seasons, the relative water content was observed to rise to values of 10-50 ppm (parts per million) at extremely high altitudes, 100-120 km [3]. Thanks to the retrieved temperatures, it was found that the increased content is accompanied by an over-saturation of water vapor in the mesosphere, at altitudes of 60-120 km [4]. Here, as a result of the effective photolysis of H₂O molecule, atomic hydrogen is released under the solar radiation, which is farther transferred to the ionosphere and escapes the planet. Thus, as it is shown, Mars intensively loses water during the seasons of dust storms and summer in the southern hemisphere.

1. Korablev O.I. et al. (2018). The Atmospheric Chemistry Suite (ACS) of three spectrometers for the ExoMars 2016 trace gas orbiter. *Space Science Reviews*, 214(1). <https://doi.org/10.1007/s11214-017-0437-6>.
2. Belyaev D.A. et al. (2022). Thermal structure of the middle and upper atmosphere of Mars from ACS/TGO CO₂ spectroscopy. *J. Geophys. Res.-Planets* 127. <https://doi.org/10.1029/2022je007286>.
3. Belyaev D.A. et al. (2021). Revealing a high water abundance in the upper mesosphere of Mars with ACS onboard TGO. *Geophysical Research Letters*, 48, e2021GL093411. <https://doi.org/10.1029/2021GL093411>.
4. Fedorova A., et al. (2023). A two-Martian years survey of the water vapor saturation state on Mars based on ACS NIR/TGO occultations. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 128, e2022JE007348. <https://doi.org/10.1029/2022JE007348>.

Обзор тепловой структуры атмосферы Марса и общего содержания пыли, водяного льда и водяного пара в атмосфере Марса по данным наблюдений ACS TIRVIM в надир на борту КА ExoMars TGO

Власов П.В.¹ (pavel.vlasov@phystech.edu), Игнатъев Н.И.¹, Кораблёв О.И.¹, Фёдорова А.А.¹, Григорьев А.В.², Шакун А.В.¹, Пацаев Д.В.¹, Маслов И.А.¹, Евдокимова Д.Г.¹, Засова Л.В.¹, Лугинин М.С.¹, Трохимовский А.Ю.¹, F. Montmessin³

¹ Институт космических исследований РАН, Москва, Россия

² Research School of Astronomy and Astrophysics, Australian National University, Канберра, Австралия

³ LATMOS, Гюйанкур, Франция

Российско-европейская космическая миссия ExoMars Trace Gas Orbiter (TGO) начала свою научную работу на орбите Марса в марте 2018 г. [1]. Российский приборный комплекс Atmospheric Chemistry Suite (ACS) включает в себя 3 спектрометра (NIR, MIR и TIRVIM) для исследования атмосферы Марса в надир и в режиме солнечных затмений [2]. Фурье-спектрометр Thermal InfraRed channel (TIRVIM) работает в обоих режимах в тепловом ИК диапазоне 1.7–16 мкм [3]. Основная научная задача TIRVIM – постоянный мониторинг температуры атмосферы Марса и общего содержания аэрозолей и паров воды в атмосфере в режиме наблюдений в надир в спектральном диапазоне 5–16 мкм с разрешением 1.17 см⁻¹. Спектры излучения Марса в данном спектральном диапазоне содержат 15-мкм глубокую полосу поглощения CO₂, которая несёт информацию о температуре атмосферы на высотах от поверхности до 60 км, полосы поглощения частиц пыли и облаков водяного льда, а также 6-мкм полосу поглощения H₂O, отражающую общее содержание водяного пара в атмосфере.

В данной работе мы представляем обработанные данные наблюдений TIRVIM в надир за почти полный марсианский год в период с $L_s = 142^\circ$ (MY 34) по $L_s = 116^\circ$ (MY 35). В результате был восстановлен полный суточный цикл средне-долготного температурного поля атмосферы и пространственные карты температуры поверхности в разные сезоны на Марсе. Особое внимание было уделено суточным и сезонным вариациям температуры в глобальную пылевую бурю MY 34 [4]. Также представлены сезонные вариации общего содержания частиц пыли и облаков водяного льда (оптические толщины экстинкции на 1075 и 825 см⁻¹ соответственно), включая глобальную и региональную пылевые бури MY 34 и пояс облаков водяного льда в афелий MY 35. Наконец, были исследованы дневные сезонные вариации общего содержания водяного пара (осажд. мкм) в атмосфере Марса.

Данная работа финансируется Министерством науки и высшего образования РФ.

1. Vago, J., Witasse, O., Svedhem, H., Baglioni, P., Haldemann, A., Gianfiglio, G., et al. (2015). ESA ExoMars program: The next step in exploring Mars. *Solar System Research*, 49(7), 518–528.

2. Korablev, O., Montmessin, F., Trokhimovskiy, A., Fedorova, A. A., Shakun, A. V., Grigoriev, A. V., et al. (2018). The atmospheric chemistry suite (ACS) of three spectrometers for the ExoMars 2016 trace gas orbiter. *Space Science Reviews*, 214(1), 7.

3. Shakun, A., Ignatiev, I., Luginin, M., Grigoriev, A., Moshkin, B., Grassi, D., et al. (2018). ACS/TIRVIM: Calibration and first results. In *Infrared remote sensing and instrumentation XXVI* (p. 107650E). SPIE.

4. Vlasov, P., Ignatiev, N., Guerlet, S., Grassi, D., Korablev, O., Grigoriev, A., et al. (2022). Martian atmospheric thermal structure and dust distribution during the MY 34 global dust storm from ACS TIRVIM nadir observations. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 127, e2022JE007272.

Overview of Martian atmospheric thermal structure and column dust, water ice and water vapor variability from ACS TIRVIM nadir observations onboard ExoMars TGO

P. Vlasov¹ (pavel.vlasov@phystech.edu), N. Ignatiev¹, O. Korablev¹, A. Fedorova¹,
A. Grigoriev², A. Shakun¹, D. Patsaev¹, I. Maslov¹, D. Evdokimova¹,
L. Zasova¹, M. Luginin¹, A. Trokhimovskiy¹, F. Montmessin³

¹ Space Research Institute of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

² Research School of Astronomy and Astrophysics, Australian National University, Canberra, ACT, Australia

³ LATMOS, Guyancourt, France

The ExoMars Trace Gas Orbiter (TGO) is a joint ESA-Roscosmos space mission, which started its operational scientific phase in March 2018 [1]. The Atmospheric Chemistry Suite (ACS) is a set of three spectrometers (NIR, MIR, and TIRVIM) designed to observe the Martian atmosphere in solar occultation and nadir geometry [2]. The Thermal InfraRed channel (TIRVIM) is a Fourier-transform spectrometer capable of operating both in nadir and solar occultation modes in the spectral range of 1.7–16 μm [3]. The main scientific goal of TIRVIM is long-term monitoring of temperatures, aerosols and water vapor distribution in Martian atmosphere in nadir mode of observations in the 5–16 μm spectral range with the spectral resolution 1.17 cm^{-1} . The nadir spectra of thermal radiation emitted by Mars in this spectral range contain deep 15 μm CO_2 absorption band which carries information about the temperature of the atmosphere at different altitudes from the surface up to 60 km, aerosols absorption bands which provide information about dust particles and water ice clouds loading in Martian atmosphere and 6 μm H_2O absorption band reflected atmospheric water vapor abundance.

In this work we present the processed data of nadir TIRVIM observations in the period from $L_s = 142^\circ$ of MY 34 till $L_s = 116^\circ$ of MY 35. We retrieved full diurnal cycle of zonal mean thermal structure of Martian atmosphere and spatial maps of surface temperature at various seasons with special attention to diurnal and seasonal variations of temperature during the global dust storm (GDS) of MY 34 [4]. We also present column dust and water ice seasonal spatial variability (as optical depths at 1075 and 825 cm^{-1} respectively) including the global and the regional dust storms of MY 34 and the aphelion water ice cloud belt at the daytime in MY 35. Finally, we analyzed seasonal spatial variability of atmospheric column water vapor abundance (as $\text{pr-}\mu\text{m}$) at the daytime.

This work is supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation.

1. Vago, J., Witasse, O., Svedhem, H., Baglioni, P., Haldemann, A., Gianfiglio, G., et al. (2015). ESA ExoMars program: The next step in exploring Mars. *Solar System Research*, 49(7), 518–528.

2. Korablev, O., Montmessin, F., Trokhimovskiy, A., Fedorova, A. A., Shakun, A. V., Grigoriev, A. V., et al. (2018). The atmospheric chemistry suite (ACS) of three spectrometers for the ExoMars 2016 trace gas orbiter. *Space Science Reviews*, 214(1), 7.

3. Shakun, A., Ignatiev, I., Luginin, M., Grigoriev, A., Moshkin, B., Grassi, D., et al. (2018). ACS/TIRVIM: Calibration and first results. In *Infrared remote sensing and instrumentation XXVI* (p. 107650E). SPIE.

4. Vlasov, P., Ignatiev, N., Guerlet, S., Grassi, D., Korablev, O., Grigoriev, A., et al. (2022). Martian atmospheric thermal structure and dust distribution during the MY 34 global dust storm from ACS TIRVIM nadir observations. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 127, e2022JE007272.

Хлороводород в атмосфере Марсе по данным прибора ACS миссии «ЭкзоМарс»

Трохимовский А.Ю.¹ (trokh@iki.rssi.ru), Фёдорова А.А.¹, Лугинин М.С.¹, Ф. Montmessin²,
Кораблёв О.И.¹

¹ Институт космических исследований РАН, Москва, Россия

² LATMOS-UVSQ, Гьянкур, Франция

Спектрометрический комплекс Atmospheric Chemistry Suite (ACS) на орбитальном аппарате ExoMars Trace Gas Orbiter (TGO) проводит атмосферные измерения на орбите Марса с 2018 года. Одной из основных целей миссии является поиск еще не

обнаруженных газовых примесей, которые могут свидетельствовать о современном вулканизме на Марсе или о его настоящей и прошлой обитаемости. По данным АЦС был впервые обнаружен хлороводород (HCl) [1]. Наличие HCl в атмосфере Марса является сезонным явлением, во время лета в южном полушарии (перигелий) в атмосфере обнаруживаются счетные концентрации этого газа порядка нескольких частей на миллиард (ppb) [2,3]. Этот сезон также характеризуется большими температурами, значительным количеством аэрозоля и водяного пара в атмосфере. Считалось, что HCl может являться признаком современного вулканизма, но его широкое распространение в обоих полушариях и повторяющаяся сезонность наводят на мысль о фотохимическом источнике. Интересно, что в отличие от большинства летучих на Марсе, изотопное отношение $H^{37}Cl/H^{35}Cl$ практически не отличается от Земного [4]. В данной работе мы представляем климатологию HCl после наблюдений трех периодов марсианского перигелия, а также сравнение с другими параметрами атмосферы, измеренными с помощью ACS, такими как вода, температура и аэрозоли. Содержание хлороводорода сильно коррелирует с водяным паром, концентрация и распределение которого в свою очередь зависит от атмосферных температур. Исчезновение HCl ближе к осеннему равноденствию также может быть связано с изменениями температуры атмосферы. Охлаждение уменьшает концентрацию паров воды, необходимых для образования хлороводорода, и способствует образованию ледяных частиц, которыми может быть захвачен HCl.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФ 23-12-00207.

1. O. Korablev et al. (2021). Transient HCl in the atmosphere of Mars. *Sci. Adv.* 7, eabe4386, <https://doi.org/10.1126/sciadv.abe4386>
2. K. S. Olsen et al. (2021). Reappearance of HCl in the atmosphere of Mars. *Astron. Astrophys.* 167, A161, <https://dx.doi.org/10.1051/0004-6361/202140329>
3. S. Aoki et al. (2021). Annual appearance of hydrogen chloride on Mars and its correlation with water vapor from TGO/NOMAD observations. *Geophys. Res. Lett.* 48, <https://doi.org/10.1029/2021GL092506>
4. A. Trokhimovskiy et al. (2021). The chlorine isotope Composition of HCl in the atmosphere of Mars. *Astron. Astrophys.* 651 A32, <https://doi.org/10.1051/0004-6361/202140916>

Hydrogen chloride in the atmosphere of Mars as observed by ACS instrument within EXOMARS mission

A. Trokhimovskiy¹ (trokh@iki.rssi.ru), A. Fedorova¹, M. Luginin¹, F. Montmessin², O. Korablev¹

¹Space Research Institute, Moscow, Russia

²LATMOS-UVSQ, Guyancourt, France

The Atmospheric Chemistry Suite (ACS) on the ExoMars Trace Gas Orbiter (TGO) has been making atmospheric measurements in Mars orbit since 2018. One of the main objectives of the mission is to search for yet undiscovered gaseous species that may indicate modern volcanism on Mars or its present and past habitability. Analyzing the ACS data, hydrogen chloride (HCl) was first discovered [1]. The presence of HCl in the Martian atmosphere is a seasonal phenomenon; during the summer in the southern hemisphere (perihelion), countable concentrations of this gas of the order of several parts per billion (ppb) are found in the atmosphere [2,3]. This season is also characterized by high temperatures, a significant amount of aerosol and water vapor in the atmosphere. It has been thought that HCl may be a sign of present-day volcanism, but its widespread occurrence in both hemispheres and recurring seasonality suggest a photochemical source. Interestingly, unlike most volatiles on Mars, the isotopic ratio of $H^{37}Cl/H^{35}Cl$ practically does not differ from the Earth's one [4]. In this paper, we present the climatology of HCl after observations of three periods of the Martian perihelion,

as well as a comparison with other atmospheric parameters measured by the ACS, such as water, temperature, and aerosols. The content of hydrogen chloride is strongly correlated with water vapor, the concentration and distribution of which, in turn, depends on atmospheric temperatures. The disappearance of HCl closer to the autumnal equinox may also be due to changes in atmospheric temperature. Cooling reduces the concentration of water vapor necessary for the formation of hydrogen chloride, and promotes the formation of ice particles, which can trap HCl.

This work was supported by the Russian Science Foundation grant 23-12-00207.

1. O. Korablev et al. (2021). Transient HCl in the atmosphere of Mars. *Sci. Adv.* 7, eabe4386, <https://doi.org/10.1126/sciadv.abe4386>
2. K. S. Olsen et al. (2021). Reappearance of HCl in the atmosphere of Mars. *Astron. Astrophys.* 167, A161, <https://dx.doi.org/10.1051/0004-6361/202140329>
3. S. Aoki et al. (2021). Annual appearance of hydrogen chloride on Mars and its correlation with water vapor from TGO/NOMAD observations. *Geophys. Res. Lett.* 48, <https://doi.org/10.1029/2021GL092506>
4. A. Trokhimovskiy et al. (2021). The chlorine isotope Composition of HCl in the atmosphere of Mars. *Astron. Astrophys.* 651 A32, <https://doi.org/10.1051/0004-6361/202140916>

Климатология вертикального распределения CO и O₂ в атмосфере Марса по данным эксперимента ACS на борту КА EхоMars TGO

Федорова А.А.¹ (fedorova@cosmos.ru), Lefevre F.², Трохимовский А.Ю.¹, Olsen K.³, Игнатьев Н.И.¹, Alday J.³, Кораблёв О.И.¹, F. Montmessin²

¹ *Институт космических исследований РАН, Москва, Россия*

² *LATMOS, Guyancourt, France*

³ *School of Physical Sciences, The Open University, Milton Keynes, United Kingdom.*

Молекулярный кислород и монооксид углерода – малые составляющие атмосферы Марса, получаемые в результате фотолиза углекислого газа. Сезонные и широтные вариации этих неконденсируемых молекул вызваны процессами конденсации и сублимация основной составляющей атмосферы CO₂, что приводит к увеличению и уменьшению их относительного содержания, особенно в полярных областях [1]. По данным различных экспериментов их среднегодовое соотношение оценивается как 1560 ± 60 ppm для O₂ и 673 ± 2.6 ppm для CO [2].

Эксперимент ACS (Atmospheric Chemistry Suite) на борту космического орбитального аппарата ESA-Роскосмоса EхоMars 2016 Trace Gas Orbiter (TGO) состоит из трех спектрометров (-NIR, -MIR и -TIRVIM), предназначенных для исследования атмосферы Марса [3]. Все три спектрометра проводят чувствительные измерения малых составляющих атмосферы с высоким спектральным разрешением. Эшелле спектрометр MIR (диапазон 2.2-4 мкм) и Фурье спектрометр TIRVIM (диапазон 1.7-17 мкм) проводят измерения вертикального распределения CO в полосах 2.3 и 4.9 мкм на высотах от 0 до 80 км и от 0 до 50 км, соответственно [4]. В свою очередь, эшелле спектрометр NIR (диапазон 0,7–1,7 мкм) проводит одновременные измерения вертикального распределения O₂ в полосе 0,76 мкм и CO в полосе 1,57 мкм на высотах от 0 до 60 км.

В этой работе мы представляем первые многолетние наблюдения сезонных и широтных вариаций вертикального распределения O₂ и CO, полученные за время работы аппарата с апреля 2018 по начало 2023 года (более двух марсианских лет), и приводим сравнение с современной моделью общей циркуляции атмосферы Марса LMD GCM [5]. Было получено средние содержания для CO ~ 950 ppm и для O₂ ~ 1900 ppm на высотах от 15 до 35 км. Также, был обнаружен обогащенный слой CO и O₂ на высотах 10-15 км в южной полярной области в начале весны на Ls = 100-200°, говорящий о конденсационных процессах в атмосфере. Сильное обогащение CO, связанное с нисходящей ветвью ячейки

Хедли, наблюдалось также на высотах более 50 км в полярных областях в сезоны равноденствия в обоих полушариях. Впервые удалось построить климатологию отношения O_2/CO , неожиданно показавшую значительные широтные вариации. Это поставило новые вопросы перед фотохимическими моделями Марса.

Данная работа финансируется Министерством науки и высшего образования РФ.

1. Lefèvre, F., & Krasnopolsky, V. A. (2017). Atmospheric photochemistry. In R. Haberle, R. T. Clancy, F. Forget, M. Smith, & R. W. Zurek (Eds.), *The Atmosphere and Climate of Mars* (pp. 405–432). Cambridge: Cambridge University Press.

2. V.A. Krasnopolsky, Annual mean mixing ratios of N_2 , Ar, O_2 , and CO in the martian atmosphere, *Planet. Space Sci.*, 144 (2017), pp. 71-73

3. Korablev, O. et al. (2018). The atmospheric chemistry suite (ACS) of three spectrometers for the ExoMars 2016 trace gas orbiter. *Space Science Reviews*, 214(1), 7.

4. Fedorova, A., et al. 2022. Climatology of the CO Vertical Distribution on Mars Based on ACS TGO Measurements. *Journal of Geophysical Research (Planets)* 127, e07195.

5. Millour, E., et al.: The Mars Climate Database (Version 6.1), Europlanet Science Congress 2022, Granada, Spain, 18–23 Sep 2022, EPSC2022-786, 2022.

Climatology of CO and O_2 vertical distribution in the Martian atmosphere based on ACS TGO measurements

A.A. Fedorova¹ (fedorova@cosmos.ru), F. Lefevre², A.Yu. Trokhimovskiy¹, K. Olsen³, N.I. Ignatiev¹, J. Alday³, O.I. Korablev¹, F. Montmessin²

¹ *Space Research Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

² *LATMOS, Guyancourt, France*

³ *School of Physical Sciences, The Open University, Milton Keynes, United Kingdom*

Molecular oxygen and carbon monoxide are minor species of the Martian atmosphere, produced by the carbon dioxide photolysis. Seasonal and latitudinal variations of these non-condensable molecules are caused by the processes of condensation and sublimation of the main component of the atmosphere, CO_2 , which leads to an increase and decrease in their mixing ratio, especially in the polar regions [1]. According to various experiments, their average annual mixing ratios are estimated as 1560 ± 60 ppm for O_2 and 673 ± 2.6 ppm for CO [2].

The ACS (Atmospheric Chemistry Suite) experiment aboard the ESA-Roscosmos ExoMars 2016 Trace Gas Orbiter (TGO) consists of three spectrometers (-NIR, -MIR, and -TIRVIM) designed to study the Martian atmosphere [3]. All three spectrometers provide sensitive measurements of minor species in the atmosphere with high spectral resolution. Echelle spectrometer MIR (spectral range of 2.2-4 μm) and Fourier spectrometer TIRVIM (spectral range of 1.7-17 μm) measure the vertical distribution of CO in the 2.3 and 4.9 μm bands at altitudes from 0 to 80 km and from 0 to 50 km, respectively [4]. In turn, the NIR echelle spectrometer (spectral range of 0.7–1.7 μm) performs simultaneous measurements of the vertical distribution of O_2 in the 0.76 μm band and CO in the 1.57 μm band at altitudes from 0 to 60 km.

In this paper, we present the first long-term observations of seasonal and latitudinal variations in the vertical distribution of O_2 and CO obtained during the operation of the spacecraft from April 2018 to the beginning of 2023 (more than two Martian years), and we present a comparison with the modern general circulation model of the Martian atmosphere LMD GCM [5]. We obtained a mean mixing ratio for CO ~ 950 ppm and for $O_2 \sim 1900$ ppm at altitudes from 15 to 35 km. An enriched layer of CO and O_2 was found at altitudes of 10-15 km in the southern polar region in early spring at $L_s = 100-200^\circ$, indicating condensation processes in the atmosphere. We also observed strong CO enrichment associated with the descending branch of the Hadley cell at altitudes above 50 km in the polar regions during the equinox

seasons in both hemispheres. For the first time, a climatology of the O₂/CO ratio was constructed, which unexpectedly showed significant latitudinal variations. This raised new questions for the photochemical models of Mars.

This work is funded by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation.

1. Lefèvre, F., & Krasnopolsky, V. A. (2017). Atmospheric photochemistry. In R. Haberle, R. T. Clancy, F. Forget, M. Smith, & R. W. Zurek (Eds.), *The Atmosphere and Climate of Mars* (pp. 405–432). Cambridge: Cambridge University Press.
2. V.A. Krasnopolsky, Annual mean mixing ratios of N₂, Ar, O₂, and CO in the martian atmosphere, *Planet. Space Sci.*, 144 (2017), pp. 71-73
3. Korablev, O. et al. (2018). The atmospheric chemistry suite (ACS) of three spectrometers for the ExoMars 2016 trace gas orbiter. *Space Science Reviews*, 214(1), 7.
4. Fedorova, A., et al. 2022. Climatology of the CO Vertical Distribution on Mars Based on ACS TGO Measurements. *Journal of Geophysical Research (Planets)* 127, e07195.
5. Millour, E., et al.: The Mars Climate Database (Version 6.1), Europlanet Science Congress 2022, Granada, Spain, 18–23 Sep 2022, EPSC2022-786, 2022.

Влияние внутренней атмосферной изменчивости на ионосферный отклик явлений космической погоды

Клименко М. В.^{1,2} (maksim.klimenko@mail.ru), Бессараб Ф.С.^{1,2}, Клименко В. В.^{1,2},
Белюченко К.В.¹

¹*Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия*

²*Калининградский филиал Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН, Калининград, Россия*

Ранее с помощью модели всей атмосферы EAGLE и ансамблевого подхода была проведена оценка значимости ионосферного отклика на усиление потоков солнечных и магнитосферных протонов в январе 2005 года. В ансамблевых расчетах начальные условия полей температур на высотах 0-90 км случайным образом менялось на 1 – 2 К. Анализ полученных результатов показал, что внутренняя атмосферная изменчивость не маскирует возмущения полного электронного содержания (ПЭС), связанные с высыпаниями протонов, в высоких широтах, и максимально маскирует возмущения ПЭС в низкоширотной области. Также на основе Глобальной Самосогласованной Модели Термосферы, Ионосферы и Протоносферы (ГСМ ТИП) и модели EAGLE были выявлены ионосферные эффекты геомагнитной бури в марте 2015 года. При этом в модели EAGLE осуществлена передача скоростей Джоулева нагрева из модуля ГСМ ТИП в модуль HAMMONIA. Таким образом, осуществлена первая реализация модели EAGLE, в которой система термосфера-ионосфера может оказывать влияние на нижележащую мезосферу. Показано, что учет атмосферно-ионосферных связей приводит к значительным отличиям ионосферного отклика на геомагнитные бури. Также выявлено устойчивое повышение плотности нейтрального газа в термосфере в марте 2015, которое может сказаться на торможение спутников.

Работа выполнена в Лаборатории исследований озонового слоя и верхних слоев атмосферы СПбГУ при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (соглашение № 075-15-2021-583).

Influence of internal atmospheric variability on the ionospheric response to space weather events

M.V. Klimenko^{1,2} (maksim.klimenko@mail.ru), F.S. Bessarab^{1,2}, V.V. Klimenko^{1,2}, K.V. Belyuchenko¹

¹*Saint Petersburg State University, Saint Petersburg, Russia*

Earlier, using the whole atmosphere model EAGLE and the ensemble approach, we estimated the significance of the ionospheric response to the enhancement of solar and magnetospheric proton fluxes in January 2005. In ensemble calculations, the initial conditions of the temperature fields at altitudes of 0–90 km varied randomly by 1–2 K. An analysis of the results showed that the internal atmospheric variability does not mask perturbations of the total electron content (TEC) associated with proton precipitation at high latitudes, and maximally masks TEC disturbances in the low-latitude region. Also, based on the Global Self-Consistent Model of the Thermosphere, Ionosphere and Protonosphere (GSM TIP) and the EAGLE model, the ionospheric effects of the geomagnetic storm in March 2015 were revealed. At that in the EAGLE model, the Joule heating rates were transferred from the GSM TIP module to the HAMMONIA module. Thus, the first implementation of the EAGLE model has been carried out, in which the thermosphere-ionosphere system can influence the underlying mesosphere. It is shown that accounting for atmosphere-ionosphere coupling leads to significant differences in the ionospheric response to geomagnetic storms. A steady increase in the density of neutral gas in the thermosphere in March 2015 was also revealed, which may affect the deceleration of satellites.

The work was carried out at the Laboratory for Research on the Ozone Layer and Upper Atmosphere of St. Petersburg State University with the support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (agreement No. 075-15-2021-583).

СЕКЦИЯ 9. РАДИАЦИЯ и ДИНАМИКА АТМОСФЕРЫ в ПОЛЯРНЫХ РАЙОНАХ

Председатель: д.ф.-м.н. **Макштас А.П.** (ААНИИ, Санкт-Петербург, Россия)

Сопредседатель: к.ф.м.н. **Богородский П.В.** (ААНИИ, Санкт-Петербург, Россия)

SESSION 9. RADIATION and DYNAMICS of POLAR ATMOSPHERE

Chairman: Dr. **A.P. Makshtas** (AARI, Saint Petersburg, Russia)

Co-Chairman: Dr. **P.V. Bogorodsky** (AARI, Saint Petersburg, Russia)

Устные доклады

Блокирующие свойства стратосферного полярного вихря в Северном полушарии во время зим 2019-2021гг.

Хабитуев Д.С. (Khabituev@iszf.irk.ru)

Институт Солнечно Земной Физики СО РАН, Иркутск, Россия

Исследование посвящено изучению особенностей циркуляции верхней стратосферы в полярной области Северного полушария в спокойные и возмущенные периоды. В работе проводится сравнительный анализ блокирующих свойств полярного стратосферного вихря во время зимних месяцев 2019-2021гг. Анализ проводится на основе данных модели реанализа Европейского центра прогнозирования погоды Era-5. Для определения внутренней границы полярного вихря используется метод запуска пробных частиц в трехмерном поле значений скорости ветра, траектории которых формируют замкнутые циркуляционные структуры. Рассмотрены основные различия формирования и динамики таких структур в периоды сильного и слабого стратосферного полярного вихря. Показано, что во время развития главной фазы внезапного стратосферного потепления, которое развивалось в январе 2021г, замкнутая структура вихря разрушается, что стимулирует повышение меридионального перемешивания полярной стратосферы. Проведены оценки средней вертикальной скорости перемещения пробных частиц.

Работа выполнена при поддержке проекта РНФ № 22-77-10008.

Blocking properties of the stratospheric polar vortex in the Northern Hemisphere in the winter of 2019-2021

Khabituev D.S. (Khabituev@iszf.irk.ru)

Institute of Solar-Terrestrial Physics, Irkutsk, Russia

The study is devoted to investigate the features of the upper stratosphere circulation in the polar region of the Northern Hemisphere in quiet and disturbed periods. The work provides a comparison of the blocking properties of the polar stratospheric vortex during the winter months of 2019-2021. The analysis is based on the data of the reanalysis model Era-5 of the European Weather Forecasting Center. To determine the inner boundary of the polar vortex, the method of launching test particles in a three-dimensional field of wind speed values is used, the trajectories of which form closed circulation structures. The main differences in the formation and dynamics of such structures during periods of strong and weak stratospheric polar vortex are considered. It is shown that during the development of the main phase of the sudden stratospheric warming, which evolves in January 2021, the closed structure of the

vortex is destroyed, which stimulates an increase in the meridional mixing of the polar stratosphere. Estimates of the average vertical velocity of movement of test particles were carried out.

This work was supported by the Russian Science Foundation project no. 22-77-10008.

Характеристики облачности над морским льдом в Арктике по данным облакомера на дрейфующих станциях «Северный полюс – 37, 39, 40». Радиационный эффект облаков.

Махотина И.А.¹ (ir@aari.ru), Чечин Д.Г.², Нарижная А.И.², Макштас А.П.¹

¹Арктический и Антарктический НИИ, Санкт-Петербург, Россия

²Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия

Приведены характеристики облачности и оценки их влияния на энергообмен атмосферы со снежно-ледяной поверхностью в районах дрейфа станций «Северный полюс-37,39,40». Данные высокого временного разрешения о наличии облачности и высоте ее нижней границы (НГО) были получены на основе измерений, выполненных в 2009-2013 годах с помощью лазерного облакомера СТ25К (Vaisala). Рассчитаны среднечасовые и среднемесячные соотношения результатов сканирований при ясном небе, сплошной облачности, а также в случаях повышения коэффициента обратного рассеяния, вызванного взвешенными частицами (метель, туман и т.п.), далее – дымки. Общее количество облаков минимально зимой и постепенно увеличивается в течение года. Повторяемость дымки в течение года почти не менялась: на станциях СП-37,39 она составила в среднем 0,20-0,35, на СП-40 не более 0,25.

В зимний период на станциях СП-39,40 корреляция балла облачности, определяемого наблюдателем визуально в стандартные сроки, с баллом, рассчитанным по облакомеру, составила не более 0,45. Включение в анализ случаев с дымкой повысило корреляцию до 0,63. Лучшее соответствие результатов в зимний период было получено на СП-37 (0,66, с учетом дымки- 0,79). Улучшение условий для визуального наблюдения в летний период не привело к заметному увеличению корреляции.

В распределении повторяемости балла облачности бимодальность характерна для ноября, с мая по октябрь наблюдается преобладание облачной моды, соответствующей сплошной облачности в 10 баллов. С декабря по апрель отмечается одна мода с повторяемостью 45-99 %, соответствующая безоблачному небу.

Для оценки влияния облаков на состояние приземного слоя атмосферы и изменение компонентов радиационного баланса поверхности использован радиационный эффект облачности (РЭО), рассчитываемый, как разность радиационных потоков, измеренных при сплошной облачности и потоков, измеренных при ясном небе. Показано, что в течение года наличие облачности, задерживая эффективное излучение, уменьшает выхолаживание снежно-ледяного покрова. Только в июле эффект облаков обратный – отраженная от верхней границы облаков приходящая коротковолновая радиация обуславливает уменьшение положительного суммарного радиационного баланса в подоблачном слое, приводя к охлаждению поверхности.

Зимой и весной 2013 года облачность на СП-40 была наиболее оптически прозрачной в длинноволновом диапазоне и в феврале наблюдались лишь единичные сканирования, когда регистрировалась высота НГО более 7000 метров. Косвенным подтверждением этому служит более интенсивное выхолаживание поверхности при наличии облаков. Так, на СП-40 длинноволновый баланс в облачную погоду с сентября по май достигал -14...-30 Вт/м², а на СП-37,39 был не ниже -9 Вт/м². Кроме того на СП-40 разность суммарного длинноволнового баланса, полученного при сплошной облачности и

ясном небе, уменьшалась от осени к весне (с 19 до 1,5 Вт/м²). В то время как на СП-37 и СП-39 она в аналогичные периоды увеличивалась и достигла максимального значения летом (от 20 до 51 Вт/м²).

Встречное излучение атмосферы на СП-37 зимой при ясном небе на 12-18 Вт/м² было меньше, чем на других станциях. В совокупности с наибольшей толщиной льда в январе 2010 года на СП-37 отмечалась самая низкая температура поверхности, а среднемесячная разность температуры воздуха и поверхности составила 3,5°, в то время как на СП-39,40 не превышала 2° за весь период наблюдений.

Characteristics of cloudiness over sea ice in the Arctic based on ceilometer data at the drifting stations "North Pole - 37, 39, 40". Radiation effect of clouds.

I.A.Makhotina¹ (ir@aari.ru), D.G.Chechin², A.I.Narizhnaya², A.P.Makshtas¹

¹Arctic and Antarctic Research Institute, Saint-Petersburg, Russia

²A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics RAS, Moscow, Russia

The characteristics of cloudiness and estimates of their influence on the energy exchange of the atmosphere with the snow-ice surface in the areas of the drifting stations "North Pole-37,39,40" are presented. High temporal resolution data on the presence of cloudiness and the height of its lower boundary (CBH) were obtained on the basis of measurements made in 2009-2013 using the CT25K laser ceilometer (Vaisala). The e hourly and monthly averaged ratios of the results of scanning are calculated for clear skies, overcast, and also in cases of an increase in the backscattering coefficient caused by suspended particles (blizzard, fog, etc.), hereinafter referred to as haze. The total amount of clouds is minimal in winter and gradually increases throughout the year. The frequency of haze almost did not change during the year: at stations NP-37,39 it was on average 0.20-0.35, at NP-40 no more than 0.25.

In winter, at stations NP-39,40, the correlation of the clouds amount determined visually by the observer at standard times with the clouds amount calculated using a ceilometer was no more than 0.45. The adding of cases with haze in the analysis increased the correlation to 0.63. The best correspondence of the results in the winter period was obtained at NP-37 (0.66, with haze cases - 0.79). Improving conditions for visual observation in summer did not lead to a noticeable increase in the correlation.

In the frequency distribution of cloudiness, bimodality is typical for November; since May to October, there is a predominance of the cloudy mode corresponding to overcast sky. Since December to April, one mode is observed with a frequency of 45-99%, corresponding to a cloudless sky.

To assess the influence of clouds on the state of the surface layer of the atmosphere and the change in the components of the surface radiation balance, the radiative effect of clouds (CRE) was used. CRE calculated as the difference between the radiative fluxes measured under total cloudiness and the fluxes measured under clear sky. It is shown that during the year the presence of clouds reduces the cooling of the snow-ice cover. Only in July, the incoming short-wave radiation reflected from the upper boundary of the clouds causes a decrease in the net radiative balance in the subcloud layer, leading to cooling of the surface.

In the winter and spring of 2013, the cloudiness at NP-40 was the most optically transparent in the long-wavelength range, and in February only several scans were observed, when the CBH was over 7000 meters. An indirect confirmation of this is the more intense cooling of the surface in the presence of clouds. So, at NP-40, the long-wave balance in cloudy cases from September to May reached -14...-30 W/m², and at NP-37,39 it was not lower than -9

W/m². In addition, at NP-40, the difference in the net longwave radiative balance obtained under overcast and clear sky decreased since autumn to spring (from 19 to 1.5 W/m²). While at NP-37 and NP-39 it increased in similar periods and reached its maximum value in summer (from 20 to 51 W/m²).

The downward atmospheric radiation at NP-37 in winter under a clear sky was 12-18 W/m² less than at other stations. Together with the biggest thickness of sea ice in January 2010, the lowest surface temperature was observed at NP-37, and the monthly averaged air and surface temperature difference was 3.5°, while at NP-39,40 it did not exceed 2° for the entire period of observations.

Пространственно – временная изменчивость влагосодержания арктической атмосферы по данным аэрологических наблюдений и дистанционных измерений

А.П. Макштас¹ (maksh@aari.ru), Г.Н. Ильин², И.И. Большакова¹, В.Ю. Быков²

¹Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, Россия

²Институт прикладной астрономии РАН, Санкт-Петербург, Россия

На основе сравнения данных непрерывных измерений интегрального влагосодержания атмосферы (ИВА), выполненных в период с октября 2021 по сентябрь 2022 года с помощью радиометра водяного пара РВП, развернутого на НИС «Ледовая база Мыс Баранова», и данных аэрологических зондирований, регулярно выполняемых на НИС в срок 0 ГМТ, показано, что расхождение между ними при оценке среднего за сезон ИВА не превышает 0.19 г/см² при среднеквадратическом отклонении 0.18 г/см² и коэффициенте корреляции в пределах 0,94 – 0.98 (в зависимости от сезона) . При этом выявлено, что по данным РВП наблюдается, в основном, некоторое завышение величины осредненного за сезон интегрального влагосодержания атмосферы. Особенно заметно расхождение при малых значениях влагосодержания в зимний период.

Анализ данных измерений, осредненных за каждый час, не выявил суточного хода величины ИВА даже в июле, месяце максимального суточного хода солнечной радиации, что важно при оценке адекватности сопоставления осредненных за сезон данных аэрологической наблюдений, выполняемых на сети станций в 0 ГМТ, но в разное солнечное время. Данные РВП позволили также количественно оценить связь приходящих коротковолновой (SRD) и длинноволновой (IRD) радиации с величиной ИВА (Q). Значимые коэффициенты корреляции с ИВА составили -0.4 для SRD, 0.67 для IRD в июле и 0.76 – в январе.

Методика расчета ИВА по данным радиозондирований была использована для оценки пространственно – временной изменчивости влагосодержания по слоям для станций, выполнявших аэрологические наблюдения в западном секторе Арктики в 2014 – 2022 годах, в период с начала работы НИС «Ледовая база Мыс Баранова». Показано, что наиболее значимые для всех слоев (от поверхности до 500 гПа) положительные тренды наблюдаются на южном побережье Баренцева и Карского морей (Малые Кармакулы, м. Баранова и м. Челюскина).

Spatial - temporal variability of the water vapor content in the Arctic atmosphere according to radiosoundings and remote sensing data

Makshatas A.P.¹ (maksh@aari.ru), Ilyin G.N.², Bolshakova I.I.¹, Bykov V.Yu.²

¹Arctic and Antarctic Research Institute, Saint Petersburg, Russia

²Institute of Applied Astronomy RAS, Saint Petersburg, Russia

Based on comparison the data from continuous measurements of the column-integrated atmospheric water vapor (CIAWV), performed from October 2021 to September 2022 using the water vapor radiometer RWV, deployed on the Research Stationary “Ice Base Cape Baranova” (RS), and data of radiosoundings regularly performed on the RS at 0 GMT, it is shown that the discrepancy between estimations seasonally average CIAWV does not exceed 0.19 g/cm^2 with standard deviation 0.18 g/cm^2 and correlation coefficients within 0.94–0.98 (depending on the season). Same time it was revealed that RWP data are mainly overestimate the value of CIAWV averaged over the season. The discrepancy is especially noticeable at low values of moisture content in winter.

Analysis of RWV hourly data did not reveal a daily variation in CIAWV even in July, the month of the maximum daily variation of solar radiation and evaporation from underlying surface. It is important in assessing the adequacy of comparing season-averaged data of radiosoundings performed at network of stations at 0 GMT, but at different solar time. The RWV data also made it possible to quantify the relationship between the incoming shortwave (SRD) and longwave (IRD) radiation and the CIAWV value. Significant correlation coefficients with CIAWV were 0.4 for SRD in July, for IRD 0.67 in July and 0.76 in January.

The method of CIAWV calculation from the data of radiosoundings was used to estimate the spatial and temporal variability of water vapor content by layers for polar stations performed radiosoundings observations in the western sector of the Arctic in 2014–2022, the period from the start of operation RS “Ice Base Cape Baranova”. It is shown that the most significant positive trends for all layers in free atmosphere (from the surface to 500 hPa) are observed on the southern coast of the Barents and Kara Seas (Small Karmakuly, Cape Baranova and Cape Chelyuskin).

Чувствительность поляризации в модельных расчётах переноса теплового и солнечного излучения к различной структуре облачности в полярных районах

Фалалеева В.А. (victory@ifaran.ru), Чернокульский А.В., Мамонтов А.Е., Артамонов А.Ю.
Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия

Исследование вертикальной структуры облаков в полярных районах затруднено, поскольку рассеивающие слои имеют низкий видимый и температурный контраст с подстилающей поверхностью. Важным фактором, позволяющим выделять рассеивающие слои облаков на фоне молекулярного (рэлеевского) рассеяния, является поляризация излучения, поэтому использование поляриметрических приборов может повысить информативность ДЗЗ.

Для оценки эффективности поляризационных измерений в полярных районах была проведена серия численных экспериментов с моделью переноса излучения Fast Line-by-Line Model (FLBLM). Были рассчитаны спектры интенсивности и линейной поляризации солнечного и теплового излучения для различных моделей атмосферы, характеристик облачности (границы, оптическая толщина, микрофизика) и альbedo подстилающей поверхности (лёд, открытая вода). Для расчётов были использованы модели жидко-капельных слоисто-кучевых облаков нижнего яруса и модели кристаллических перистых облаков верхнего яруса.

Результаты численных экспериментов показали, что чувствительность линейной поляризации для выбранных случаев составляет порядка 10% для солнечного излучения и 1% для теплового. Также показана важность высокого спектрального разрешения, которое позволяет исследовать атмосферу послойно, благодаря учёту более узких линий

из высоких слоёв атмосферы и различной глубине проникновения излучения в разных участках спектра.

Поляриметрическое пассивное зондирование может повысить информативность спутниковых данных, если приборы будут обладать высоким спектральным разрешением. Однако, современные спутниковые приборы обладают либо высоким спектральным разрешением, либо поляриметрическими возможностями.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ 16-35-00585, 17-01-00220 и 18-01-00609.

Sensitivity of polarization in the thermal and solar radiative transfer simulations to different cloud structure in polar regions

V.A. Falaleeva (victory@ifaran.ru), A.V. Chernokulsky, A.E. Mamontov, A.Yu. Artamonov
A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics RAS, Moscow, Russia

The investigation of the vertical structure of clouds in the polar regions is difficult, since scattering layers have low visible and temperature contrast with the surface. An important factor that makes it possible to distinguish the clouds scattering from the molecular (Rayleigh) scattering is the polarization of the radiation, therefore, the use of polarimetric instruments can increase the information content of remote sensing.

To evaluate the efficiency of polarization measurements in polar regions we have carried out a set of numerical experiments with the radiative transfer model Fast Line-by-Line Model (FLBLM). We have performed calculations of the intensity and linear polarization spectra of solar and thermal radiation for various atmospheric models, different cases of clouds (boundaries, optical depth, microphysics) and surface albedo (ice, open water). For the calculations we have used the models of low-level liquid stratocumulus clouds and the models of high-level ice crystal cirrus clouds.

The results of the numerical experiments have shown that the sensitivity of the linear polarization for the selected cases are about 10% for solar radiation and 1% for the thermal one. Also, the importance of the high spectral resolution was shown, that allows for investigation of the atmosphere layer by layer, due to accounting of the narrow spectral lines from the higher atmospheric levels and the fact that radiance at different spectral points possesses a different penetration depth.

Polarimetric passive remote sensing could improve the quality of the retrieval information, if the instruments would have high spectral resolution. However, modern satellite instruments have either high spectral resolution or polarimetric capabilities.

This work was supported by the RFBR Grants РФФИ 16-35-00585, 17-01-00220 и 18-01-00609.

Концентрация CO₂, CH₄ и стабильный изотоп δ¹³C в метане в сентябре 2022 г: самолетные и судовые измерения

Панкратова Н.В.¹(n_pankratova@list.ru), Беликов И.Б.¹, Скороход А.И.^{1,2}, Белоусов В.А.¹, Новигатский А.Н.³, Аршинов М.Ю.⁴, Давыдов Д.К.⁴

¹Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия

²Венский университет, Вена, Австрия

³Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия

⁴Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, Томск, Россия

С 5 по 18 сентября 2022 г. с борта научно-исследовательского судна измерены концентрации метана, углекислого газа и стабильного изотопа δ¹³C в метане. 9 и 10 сентября 2022 г в результате самолетных измерений с использованием УНУ «Самолет-

лаборатория Ту-134 «Оптик»» получены вертикальные профили CH₄ и CO₂ в слое от 200 до 9000 метров. Совместный анализ самолетных и судовых наблюдений метана и углекислого газа позволяет получить профиль распределения концентраций парниковых газов по всей толще тропосферы. Содержание метана в свободной тропосфере над арктическими морями в период измерений имеет довольно равномерный характер, при этом в нижнем околоповерхностном слое (приземный/слой перемешивания) содержание метана превышает значения в свободной тропосфере примерно на 10 ppb, что может говорить о наличии источника вблизи района проведения совместных измерений.

В целом концентрация CH₄ и CO₂ существенно зависят от синоптической ситуации и района адвекции воздушных масс. Так, пересечение воздушным потоком суши вносит существенную неоднородность в наблюдаемые значения концентраций газовых составляющих. В то же время при адвекции с северных районов в район измерений поступал хорошо перемешанный воздух с Северного Ледовитого океана, при этом фиксировались довольно однородные ряды значений концентраций газовых составляющих. Для уточнения динамики концентрации метана проведен анализ обратных траекторий, получены зависимости по методу Килинга.

CO₂ and CH₄ Concentration and stable isotope $\delta^{13}\text{C}$ in methane in September 2022: aircraft and shipborne measurements

N.V. Pankratova¹(n_pankratova@list.ru), I.B. Belikov¹, A.I. Skorokhod^{1,2}, V.A. Belousov¹, A.N. Novigatsky³, M.Yu. Arshinov⁴, D.K. Davydov⁴

¹A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics RAS, Moscow, Russia

²University of Vienna, Vienna, Austria

³P.P. Shirshov Institute of Oceanology of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

⁴V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics of SB SO RAS, Tomsk, Russia

Concentrations of methane, carbon dioxide and the stable isotope $\delta^{13}\text{C}$ in methane were measured from the research vessel from September 5 to September 18, 2022. As a result of aircraft measurements using the Aircraft Laboratory Tu-134 Optic, vertical profiles of CH₄ and CO₂ were obtained for a layer from 200 to 9000 meters a.s.l. for the period 9-10 September, 2022. Due to parallel measurements of methane and carbon dioxide concentration from aircraft and research vessel makes it possible to obtain a profile of the distribution of greenhouse gases concentrations throughout the troposphere. The content of methane in the free troposphere over the Arctic seas during the measurement period is quite uniform, while in the surface layer (surface/mixing layer) the content of methane exceeds the values in the free troposphere by about 10 ppb, which may indicate the presence of a source near the area of joint measurements.

In general, the concentrations of CH₄ and CO₂ significantly depend on the synoptic situation and direction of air mass advection. Thus, the crossing of land by an air flow introduces a significant inhomogeneity in the observed values of the concentrations of gas components. At the same time, during advection from the northern regions, well-mixed air from the Arctic Ocean entered the measurement area, and rather homogeneous series of values of the concentrations of gas components were recorded. To refine the dynamics of the methane concentration, an analysis of the reverse trajectories was carried out, and dependences were obtained using the Keeling plot.

Пространственное распределение и средние характеристики атмосферного аэрозоля в акватории Карского моря

Сакерин С.М.¹ (sms@iao.ru), Кабанов Д.М.¹, Круглинский И.А.¹, Почуфаров А.О.¹,
Ризе Д.Д.², Сидорова О.Р.², Турчинович Ю.С.^{1,2}

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

²Арктический и антарктический научно исследовательский институт, Санкт-Петербург, Россия

Атмосферный аэрозоль играет важную роль в процессах формировании климата и экологического состояния окружающей среды. Наименее изученной является арктическая зона, которая отличается большой динамикой природной среды и уязвимостью к изменениям климата. Характеристики аэрозоля в арктической атмосфере отличаются высокой изменчивостью в синоптическом масштабе: пространственные размеры – от сотен до 1-2 тысяч км, по времени – несколько суток. Причиной является низкий фоновый уровень содержания аэрозоля от местных источников и сильное воздействие дальних переносов загрязненного воздуха из средних широт.

Более 10 лет нами ведутся экспедиционные исследования аэрозоля в акватории Северного Ледовитого океана. В число измеряемых характеристик входят: аэрозольная оптическая толщина (АОТ) атмосферы, концентрация аэрозоля и содержания в нем поглощающего вещества (черного углерода). Основная задача состоит в определении закономерностей пространственного распределения аэрозоля и его средних характеристик для отдельных арктических морей. Учитывая эпизодичность морских экспедиций, к анализу привлекаются данные более регулярных измерений характеристик аэрозоля на полярных станциях, в частности, «Мыс Баранова» (остров Большевик).

В докладе представлено обобщение результатов многолетних исследований аэрозоля в 11-и морских экспедициях в акватории Карского моря (2007-2022 гг.): (а) построена карта среднего пространственного распределения характеристик аэрозоля с использованием сплайн интерполяции полученных данных; (б) определены статистические характеристики для отдельных районов; (в) оценено влияние наиболее мощных континентальных выносов на загрязнение арктической атмосферы. Средние значения характеристик аэрозоля над Карским морем составили: объемы субмикронных частиц – 0,35 мкм³/см³, объемы грубодисперсных частиц – 1,89 мкм³/см³; концентрации черного углерода – 32 нг/м³; АОТ (0,5 мкм) – 0,035; показатель Ангстрема – 0,8.

Осенью 2022 г. были проведены одновременные измерения характеристик аэрозоля в нескольких районах Карского моря: на полярной станции «Мыс Баранова» и на маршруте трех экспедиций – на НИС «Академик Мстислав Келдыш», НЭС «Академик Трешников» и ЛСП «Северный полюс». Благодаря этому появилась уникальная возможность более детально проанализировать динамику пространственного распределения характеристик аэрозоля на основе данных измерений в нескольких районах Карского моря.

Работа выполнялась при финансовой поддержке проекта РНФ № 21-77-20025.

Spatial distribution and average characteristics of atmospheric aerosol in Kara Sea basin

Sakerin S.M.¹(sms@iao.ru), Kabanov D.M.¹, Kruglinsky I.A.¹, Pochufarov A.O.¹, Rize D.D.²,
Sidorova O.R.², Turchinovich Yu.S.^{1,2}

¹V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics, Tomsk, Russia

²Arctic and Antarctic Research Institute, Saint Petersburg, Russia

Atmospheric aerosol plays an important role in the processes of climate formation and ecological environmental state. The least studied is the Arctic zone, standing out in the strong environmental dynamics and vulnerability to climate changes. Aerosol characteristics in the Arctic atmosphere exhibit strong synoptic-scale variations: spatial extents from hundreds to 1-

2 thousand km, and a few days in time. The causes are the low background level of aerosol content from local sources and the strong impact of long-range transports of polluted air from midlatitudes.

Our aerosol expedition studies in the Arctic Ocean basin are already more than 10 years long. The measured characteristics include: the aerosol optical depth (AOD) of the atmosphere, the aerosol concentration, and the content of absorbing substance (black carbon) in aerosol. The main task is to determine the regularities of the spatial distribution of aerosol and its average characteristics for individual Arctic seas. Considering that marine expeditions are episodic, the analysis is extended to include data from more regular measurements of aerosol characteristics at polar stations and, in particular, on Cape Baranov (Bolshevik Island).

In this report we present a generalization of multiyear aerosol studies in 11 marine expeditions in Kara Sea basin (2007-2022): (a) we plotted a map of the average spatial distribution of aerosol characteristics, using spline interpolation of the data obtained; (b) determined the statistical characteristics for separate regions; and (c) estimated how the most severe continental outflows influence the pollution of the Arctic atmosphere. The average aerosol characteristics over the Kara Sea had been: $0.35 \mu\text{m}^3/\text{cm}^3$ for the volumes of submicron particles, $1.89 \mu\text{m}^3/\text{cm}^3$ for the volumes of coarse particles; $32 \text{ ng}/\text{m}^3$ for the black carbon concentration; 0.035 for the AOD ($0.5 \mu\text{m}$); and 1.1 for the *Ångström exponent*.

During fall 2022, we carried out simultaneous measurements of aerosol characteristics in a few regions of the Kara Sea: at the polar station Cape Baranov and on the routes of three expeditions: onboard RVs Akademik Mstislav Keldysh, Akademik Tryoshnikov, and Severny Polyus. This gave us a unique opportunity to analyze more comprehensively the dynamics of the spatial distribution of aerosol characteristics, using measurements in a few regions of the Kara Sea.

This work was supported by the Russian Science Foundation (under the project no. 21-77-20025).

Атмосферные выпадения черного углерода на территорию западного сектора Арктической зоны РФ (модельные расчеты)

Котова Е.И. (ecorr@yandex.ru), Лохов А.С., Топчая В.Ю., Туфанова О.П.

Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия

При рассмотрении вопроса регионального потепления в Арктике важным объектом исследования являются эмиссии сажи. Распространение примесей происходит весьма неравномерно по площади и в некоторых случаях на отдаленных территориях в десятки раз превышает их естественное поступление. При этом атмосферный перенос часто является самым быстрым путем поставки загрязняющих веществ, в том числе сажевых микрочастиц. Аэрогенный источник поступления поллютантов является постоянно действующим и его влияние сложно ограничить. В связи с этим важно знать особенности и масштаб аэрогенного воздействия на арктические экосистемы, для того, чтобы учитывать данный источник при оценке состояния окружающей среды региона. В работе использован метод статистики траекторий переноса воздушных масс, основой которого является анализ многолетних массивов обратных траекторий переноса воздушных масс и примесей к географическому пункту. Методика подробно представлена в [1]. Расчет ведется для 4 репрезентативных месяцев сезона (январь, апрель, июль, октябрь). Обратные траектории движения воздушных масс вычисляются с помощью модели HYSPLIT4 и данных реанализа полей метеорологических характеристик NOAA (NCEP/NCAR Reanalysis Data Files). Основные расчетные показатели, отражающие загрязнение окружающей среды вблизи исследуемых объектов – концентрация примеси

в приземном слое воздуха и поток примеси на поверхность. Формулы расчета приведены в [1]. В расчетах использовались данные об эмиссиях черного углерода (Black carbon) из базы данных EMEP Centre on Emission Inventories and Projections. Расчеты велись для 11 точек: на территории Архангельской области – устья рек Онега, Северная Двина, Мезень, заповедник «Пинежский», арх. Новая Земля, арх. Земля Франца-Иосифа; на территории Ненецкого автономного округа – устья рек Индига, Пеша, Печора (заповедник «Ненецкий»); на территории Мурманской области – побережье Кандалакшского и Кольского заливов. Период расчета – 2001-2021 гг. По данным расчетов максимальные концентрации сажи в воздухе на всей рассматриваемой территории наблюдаются в январе. Это связано с метеорологическими факторами, которые определяют расширение ареала территорий, с которых происходит перенос примесей в северные широты. Для большинства точек содержание сажи в атмосферном воздухе в январе находилось на уровне 1,3–1,6 мкг/м³. Минимальные значения получены для территорий архипелагов: 0,1 мкг/м³. Максимальные значения определены в устьевых областях крупных рек: Северной Двины и Печоры – порядка 7,4-8,5 мкг/м³. На территории Мурманской области концентрация сажи в воздухе в январе составила 3 мкг/м³. Расчетные значения атмосферных потоков сажи для островных территорий минимальны: 0,8–1,8 мг/м² год. Это определяется как дальностью основных источников антропогенного воздействия, так и атмосферными процессами. Больше всего сажевых частиц из атмосферы выпадает в дельте Северной Двины – вблизи Архангельского промышленного узла: 680,7 мг/м² в год. Потоки сажи в районе Кольского залива, где также расположены крупные промышленные объекты, уже практически в 2 раза ниже и составили 350,4 мг/м² в год. Это в первую очередь может быть связано с развитием атомной энергетики в данном регионе. В отдаленных районах Ненецкого автономного округа (устья рек Пеша и Индига) потоки сажи составили 24,7–30,7 мг/м² в год. На территорию заповедника «Ненецкий», расположенном ближе к источникам выбросов сажи – разрабатываемым нефтяным и газовым месторождениям, поступает порядка 252,7 мг/м² сажи в год.

Работа выполнена при поддержке РФ (проект № 22-77- 10074).

1. Виноградова А.А. Дистанционная оценка влияния загрязнения атмосферы на удаленные территории // Геофизические процессы и биосфера. 2014. Т. 13. № 4. С. 5-20.

Atmospheric deposition of black carbon on the territory of the western sector of the Arctic zone of the Russian Federation (model calculations)

E.I. Kotova (ecopp@yandex.ru), A.S. Lokhov, V.Yu. Topchaya, O.P. Tufanova
Shirshov Institute of Oceanology RAS, Moscow, Russia

In matters of regional warming in the Arctic, black carbon emissions are an important object of research. The distribution of pollutants occurs very unevenly over the area and in some cases in remote areas is tens of times higher than their natural receipts. At the same time, atmospheric transport is often the fastest way to supply pollutants, including microparticles of black carbon. The aerogenic source of pollutants is permanent and its influence is difficult to limit. In this regard, it is important to know the features and scale of the aerogenic impact on the Arctic ecosystems in order to take this source into account when assessing the state of environment of the region.

The paper uses statistical method of trajectories for the air mass transport, the basis of which is the analysis of long-term arrays of backwards trajectories of air mass transfer and pollutants to a geographical point. In detail the method is presented in [1]. The calculation is carried out for 4 representative months of the season (January, April, July, October). The backwards trajectories of air masses are calculated using the HYSPLIT4 model and NOAA

meteorological characteristics reanalysis data (NCEP/NCAR Reanalysis Data Files). The main calculated indicators reflecting environmental pollution near the studied objects are the concentration of pollutants in the surface layer of air and their fluxes on the surface. The calculation formulas are given in [1]. The calculations used data on emissions of black carbon from the EMEP database (Centre on Emission Inventories and Projections). Calculations were made for 11 points: on the territory of the Arkhangelsk region - the mouths of the Onega River, Northern Dvina River, Mezen River, the Pinezhsky Nature Reserve, the Novaya Zemlya archipelago, the Franz Josef Land archipelago; on the territory of the Nenets Autonomous Okrug - the mouths of the Indiga River, Pesho River, Pechora River (the reserve "Nenets"); on the territory of the Murmansk region - the coast of the Kandalaksha and Kola bays. The calculation period is 2001-2021.

According to calculations, the maximum concentrations of black carbon in the atmospheric air throughout the territory under study are observed in January. This is due to meteorological factors that determine the expansion of the area of territories from which pollutants are transported to northern latitudes. For most points, the black carbon content in the atmospheric air in January was at the level of 1.3–1.6 $\mu\text{g m}^{-3}$. The minimum values were obtained for the territories of the archipelagos: 0.1 $\mu\text{g m}^{-3}$. The maximum values are determined in the mouth areas of the Northern Dvina River and Pechora River – 7.4–8.5 $\mu\text{g m}^{-3}$. On the territory of the Murmansk region, the concentration of black carbon in the air in January amounted to 3 $\mu\text{g m}^{-3}$.

The calculated values of atmospheric black carbon fluxes for island territories are minimal: 0.8–1.8 mg m^{-2} per year. This is determined both by the range of the main sources of anthropogenic impact and by atmospheric processes. Most of the black carbon particles from the atmosphere deposition in the delta of the Northern Dvina River – near the Arkhangelsk industrial hub: 680.7 mg m^{-2} per year. Fluxes of black carbon in the Kola Bay area, where large industrial facilities are located, are already almost 2 times lower and amounted to 350.4 mg m^{-2} per year. This may primarily be due to the development of nuclear energy in this region. In remote areas of the Nenets Autonomous Okrug (the mouths of the Pesho River and Indiga River), fluxes of black carbon amounted to 24.7–30.7 mg m^{-2} per year. The Nenetsky Nature Reserve, located closer to the sources of black carbon emissions – oil and gas fields under development, receives about 252.7 mg m^{-2} of black carbon per year.

The investigation was supported by the Russian Science Foundation (No. 22–77–10074).

1. Vinogradova A.A. Remote assessment of the influence of atmospheric pollution on remote territories // Geophysical processes and biosphere. 2014. Vol. 13. No. 4. pp. 5-20. (in Russian)

Сезонные вариации изотопного состава общего углерода в атмосферном аэрозоле на Ледовой базе «Мыс Баранова» (2018-2022 гг.)

Калашникова Д.А.^{1,2} (terrezaprk@mail.ru), Симонова Г.В.¹, Турчинович Ю.С.², Лоскутова М.А.³, Ризе Д. Д.³

¹Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск, Россия

²Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, Томск, Россия

³Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, Россия

Аэрозольные частицы в нижних слоях тропосферы Арктической зоны в основном характеризуются сочетанием частиц морского происхождения (из Северного Ледовитого океана) и частиц континентального происхождения, переносимых из средних широт. Доминирование частиц континентального происхождения происходит, когда Северный Ледовитый океан покрыт льдом, и отсутствует эмиссия частиц из океана [1]. Исследование вариаций изотопного состава общего углерода ($\delta^{13}\text{C}$) атмосферного

аэрозоля может стать полезным инструментом для понимания вклада частиц морского и континентального происхождения в аэрозольные частицы, так как аэрозольные частицы морского и континентального происхождения характеризуются различными значениями величины $\delta^{13}\text{C}$ [2]. С целью оценки временных вариаций величины $\delta^{13}\text{C}$ арктического аэрозоля и определения вероятных источников происхождения аэрозольных частиц проводилось исследование сезонных вариаций изотопного состава общего углерода в атмосферном аэрозоле на Ледовой базе «Мыс Баранова» (о. Большевик, архипелаг Северная Земля, 79°16'59" с.ш., 101°38'17" в.д.) в период с апреля 2018 по сентябрь 2022 года.

Отбор проб аэрозоля осуществлялся на стекловолоконные фильтры MGF (Munktell, Швеция) с помощью вихревой воздуходувки ERSTEVAK – EVL22/11 в течение 3-4 суток. Измерение величины $\delta^{13}\text{C}$ методом масс-спектрометрии изотопных отношений проводилось в ИМКЭС СО РАН с использованием изотопного масс-спектрометра DELTA V Advantage (Thermo Fisher Scientific, Бремен, Германия), приборы предоставлены ТомЦКП СО РАН.

Установлено, что величина $\delta^{13}\text{C}$ менялась в диапазоне от $-31,3$ до $-23,6\text{‰}$, среднее значение за весь период составило $-27,5 \pm 0,9\text{‰}$ ($n=299$), что, согласуется со значением величины $\delta^{13}\text{C}$ для станции Барроу (Аляска) [3]. Самое низкое значение величины $\delta^{13}\text{C}$ ($-31,3\text{‰}$), зафиксированное в образце аэрозоля, отобранном в феврале 2020 год, свидетельствует о доминирующем влиянии выбросов от сжигания продуктов нефтепереработки, от работы дизельных двигателей и морских судов. Самое высокое значение величины $\delta^{13}\text{C}$ ($-23,6\text{‰}$) определено для образца аэрозоля, отобранного в сентябре 2019 года, в период поступления частиц морского происхождения из Северного Ледовитого океана, что подтверждают обратные траектории движения воздушных масс. Для периода полярной ночи (16 октября – 14 марта) величина $\delta^{13}\text{C}$ аэрозоля лежит в пределах от $-31,3$ до $-26,7\text{‰}$, для периода полярного дня (15 марта – 15 октября) – от $-29,4$ до $-23,6\text{‰}$. Сезонная изменчивость величины $\delta^{13}\text{C}$ связана с различными источниками происхождения частиц аэрозоля и регионами поступления воздушных масс. Анализ обратных траекторий движения воздушных масс (HYSPLIT) подтвердил, что аэрозоль весенне-летнего периода больше подвержен влиянию частиц из Северного Ледовитого океана, чем аэрозоль зимнего периода, для которого доминируют частицы континентального происхождения.

Исследование проведено при финансовой поддержке проекта РНФ № 21-77-2005.

1. Klonecki A., P. Hess L. Emmons L. Smith J. Orlando, D. Blake. Seasonal changes in the transport of pollutants into the Arctic troposphere-model study // J. Geophys. Res., 2003, V. 108, № D4, 8367.
2. Simonova G., Kalashnikova D., Turchinovich Yu., Makshtas A. The atmospheric aerosol carbon isotope composition studies at the Svalbard and the Severnaya Zemlya archipelagos // Proc. SPIE 11560, 26th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics, Atmospheric Physics, 115605A.
3. Mouteva G.O., Czimczik C.I., Fahrni S.M., Wiggins E.B., et al. Black carbon aerosol dynamics and isotopic composition in Alaska linked with boreal fire emissions and depth of burn in organic soils // Global Biogeochem. Cycles, 2015, V. 29, № 11, p. 1977-2000.

Seasonal variations of stable carbon isotopic composition of atmospheric aerosol at the Ice Base Cape Baranov (2018-2022)

Kalashnikova D.A.^{1,2}(terrezapr@mail.ru), Simonova G.V.¹, Turchinovich Yu.S.², Loskutova M.A.³, Rize D.D.³

¹Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems SB RAS, Tomsk, Russia

²V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Tomsk, Russia

³State Scientific Center of the Russian Federation Arctic and Antarctic Research Institute, Saint Petersburg, Russia

In the troposphere lower layers of the Arctic zone the aerosol particles are mainly characterized by a combination of particles of both marine origin (from the Arctic Ocean) and continental origin transported from middle latitudes. The predominance of particles of continental origin occurs when the Arctic Ocean is covered by ice, and there is no emission of particles from the ocean [1]. The study of variations of the total carbon isotopic composition ($\delta^{13}\text{C}$) of arctic atmospheric aerosol can be a useful tool for evaluation the contribution of particles of marine and continental origin, since aerosol particles of marine and continental origin are characterized by different $\delta^{13}\text{C}$ values [2]. This study of seasonal variations of the total carbon isotopic composition of atmospheric aerosol at the Ice Base Cape Baranov (Bolshevik Island, the Severnaya Zemlya archipelago, 79°16'59" N, 101°38'17" E) was carried out from April 2018 to September 2022 in order to estimate the temporal variations of the arctic aerosol $\delta^{13}\text{C}$ value and to determine the probable sources of aerosol particles.

Aerosol samples were collected on precombusted (500°C, 5 h) glass fiber filters MGF (Munktell, Sweden) using a high-volume air sampler ERSTEVAK – EVL22/11 for 3–4 days. The measurement of $\delta^{13}\text{C}$ value by isotope ratio mass spectrometry was carried out at the IMCES SB RAS using the DELTA V Advantage isotope ratio mass spectrometer (Thermo Fisher Scientific, Bremen, Germany). The equipment provided by Shared Research Facilities of the Tomsk Scientific Center SB RAS.

It was found that the $\delta^{13}\text{C}$ value varied in the range from -31.3 to -23.6‰ , the average $\delta^{13}\text{C}$ value for the entire period was $-27.5\pm 0.9\text{‰}$ ($n=299$). This average $\delta^{13}\text{C}$ value is consistent with the $\delta^{13}\text{C}$ value of aerosol for Barrow (Alaska) [3]. The lowest $\delta^{13}\text{C}$ value (-31.3‰) was determined for an aerosol sample collected in February 2020, and indicates the dominant influence of emissions from the oil products combustion, from the operation of diesel engines and marine vessels. The highest $\delta^{13}\text{C}$ value (-23.6‰) was determined for an aerosol sample collected in September 2019, during the period of emissions of particles of marine origin from the Arctic Ocean, which are confirmed by the backward trajectories of air masses. For the period of the polar night (16 October – 14 March), the $\delta^{13}\text{C}$ value of the arctic aerosol ranges from -31.3 to -26.7‰ , for the polar day period (15 March – 15 October) – from -29.4 to -23.6‰ . Seasonal variability of the $\delta^{13}\text{C}$ value is associated with different sources of aerosol particles origin and regions of air mass inflow. An analysis of backward air mass trajectories (HYSPLIT) confirmed that spring-summer aerosol is more affected by particles from the Arctic Ocean than winter aerosol, for which particles of continental origin dominate.

The study was supported by the Russian Science Foundation (project no. 21-77-20025).

1. Klonecki A., P. Hess L. Emmons L. Smith J. Orlando, D. Blake. Seasonal changes in the transport of pollutants into the Arctic troposphere-model study // *J. Geophys. Res.*, 2003, V. 108, № D4, 8367.
2. Simonova G., Kalashnikova D., Turchinovich Yu., Makshtas A. The atmospheric aerosol carbon isotope composition studies at the Svalbard and the Severnaya Zemlya archipelagos // *Proc. SPIE 11560*, 26th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics, Atmospheric Physics, 115605A.
3. Mouteva G.O., Czimczik C.I., Fahrni S.M., Wiggins E.B., et al. Black carbon aerosol dynamics and isotopic composition in Alaska linked with boreal fire emissions and depth of burn in organic soils // *Global Biogeochem. Cycles*, 2015, V. 29, № 11, p. 1977-2000.

Термодинамическая эволюция припая в проливе Шокальского

Богородский П.В. (bogorodski@aari.ru), Сидорова О.Р.
Арктический и Антарктический НИИ, Санкт-Петербург, Россия

Представлены и проанализированы результаты шестилетних ледовых наблюдений неподвижного снежно-ледяного покрова на стационаре ААНИИ «Мыс Баранова» (о. Большевик, арх. Северная Земля), в малоизученном прибрежном районе на границе

морей Карского и Лаптевых. С помощью математической модели, реализующей фронтальный вариант задачи Стефана, получены количественные и качественные оценки формирования и эволюции припая под влиянием атмосферных условий зимы 2020/21 г. Модельные данные дополнены результатами расчётов толщины льда по эмпирической формуле Визе на основе суммы градусо-дней мороза, показавшими хорошее совпадение с результатами прямых измерений и моделирования. Рассмотрены возможности возникновения инфильтрационного (снежного) льдообразования за счёт превращения снега в лёд при опускании границы их раздела ниже уровня воды.

Thermodynamic evolution of land fast ice in the Shokalsky strait

P.V. Bogorodskiy (bogorodski@aari.ru), O.R. Sidorova
Arctic and Antarctic Research Institute, Saint Petersburg, Russia

The results of complex observations of immobile ice cover at the AARI Research Station “Mys Baranova” (Bolshevik Isl., Severnaya Zemlya Arch.) carried out during the last six winters in a little-studied coastal region on the border of the Kara and Laptev Seas are presented and analyzed. Using a mathematical model that implements the frontal version of the Stefan problem, quantitative and qualitative estimates of the thermodynamic growth of sea ice cover under the influence of 2020/21 Winter atmospheric conditions were obtained. The model data were supplemented with the results of ice thickness calculations using Vieze empirical formula based on sum of frost degree-days, which showed good agreement as the results of field measurements as the simulation results. The possibilities of snow-ice (infiltration) formation due to the subsidence of their interface below the water level is considered.

Прогноз ледовой обстановки для Арктики с использованием совместной системы ROMS-CICE

Бутаков Н.Ю.^{1,2} (nikita.butakov.2019@mail.ru), Рубинштейн К.Г.^{1,2}

¹Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН, Москва, Россия

²Гидрометеорологический научно-исследовательский центр, Москва, Россия

Прогноз ледовой обстановки имеет важное значение для обеспечения хозяйственной деятельности РФ в Арктическом регионе, например, для обеспечения нужд атомного ледокольного флота по Северному морскому пути. В данной работе представлены результаты прогноза характеристик морского льда по совместной системе океан-морской лёд для Арктического региона. Совместная система включала в себя океаническую модель ROMS и модель морского льда CICE, связь между компонентами совместной системы осуществлялась посредством пакета инструментов MCT. Расчётная сетка моделей покрывала собой весь Арктический регион с пространственным разрешением 20 км. Интервал моделирования был выбран с 1 января 2023 по 21 января 2023 г. Шаг по времени для модели океана составлял 30 с, для модели морского льда 1200 с. Дискретность обмена данными между моделями была выбрана 3 ч модельного времени. В качестве начальных и граничных условий для модели океана использовались данные ретроспективного прогноза по глобальной модели NCOM. В качестве атмосферного форсинга для модели океана использовались данные реанализа ERA5. Анализируя результаты прогноза ледовой обстановки, можно сделать выводы о том, что максимальная толщина морского льда прогнозировалась для Канадского арктического архипелага, Чукотского и Берингова морей. Наибольшая концентрация морского льда

прогнозировалась для северного побережья России восточнее о. Новая Земля, в то время как Баренцево и Норвежское моря были свободны ото льда.

Ice forecast for the Arctic using the coupled ROMS-CICE system

N.Y.Butakov^{1,2} (nikita.butakov.2019@mail.ru), K.G.Rubinstein^{1,2}

¹*Nuclear Safety Institute of RAS, Moscow, Russia*

²*Hydrometeorological Research Center of Russian Federation, Moscow, Russia*

Forecasts of ice conditions are important for ensuring the economic activities of the Russian Federation in the Arctic region, for example, to meet the needs of the nuclear icebreaker fleet on the Northern Sea Route. This paper presents the results of sea ice characteristics forecasting using a coupled ocean-sea-ice system for the Arctic region. The coupled system included the ROMS ocean model and the CICE sea-ice model, and coupling between the components of the coupled system was performed using the MCT toolbox. The computational grid covered the entire Arctic region with a spatial resolution of 20 km. The simulation interval was chosen from 1 January 2023 to 21 January 2023. The time step for the ocean model was chosen to be 30 s, for the sea ice model it was chosen to be 1200 s. The coupling discreteness between the models was chosen to be 3 h of model time. The initial and boundary conditions for the ocean model were based on the HYCOM global model hindcast data. ERA5 reanalysis data were used as the atmospheric forcing for the ocean model. Analysing the results of the ice forecast, it can be concluded that the maximum thickness of sea ice was predicted for the Canadian Arctic Archipelago, the Chukchi and Bering Seas. The maximum concentration of sea ice was predicted for the northern coast of Russia east of Novaya Zemlya Island, while the Barents and Norwegian Seas were ice-free.

Ступенчатые изменения климата. Статистические аспекты.

Бекряев Р.В. (bekryaev@mail.ru)

Главная геофизическая обсерватория им. А.И. Воейкова, Санкт-Петербург, Россия

Быстрые изменения климата, например изменения в арктической климатической системе, случившиеся в 2007 году, представляют достаточно интересный предмет исследования. В тоже время, статистические методы, применяемые для изучения быстрых (ступенчатых) изменений климата, не всегда имеют надежные вероятностные обоснования. В данной работе показано, что используемые для изучения ступенчатых изменений климата метрики могут приводить к ложным выводам о наличии климатических сдвигов при авто-коррелированности временных рядов и при наличии трендовой компоненты.

Step Climate Changes. Statistical Aspects

R. V. Bekryaev (bekryaev@mail.ru)

Voeikov Main Geophysical Observatory, Saint Petersburg, Russia

Rapid climate changes, for example, changes in the Arctic climate system that occurred in 2007, are quite an interesting subject of research. At the same time, statistical methods used to study rapid (stepwise) climate changes do not always have reliable probabilistic justifications. In this paper, it is shown that the metrics used to study stepwise climate changes

can lead to false conclusions about the presence of climate shifts under the conditions of auto-correlation of time series and/or the presence of a trend component.

Постерная сессия

Исследование спектрального состава проходящей, отраженной и проникающей в снежную толщу солнечной радиации в Арктике

Лоскутова М.А. (loskutova@aari.ru), Макштас А.П., Сидорова О.Р.

Арктический и Антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, Россия

Представлены результаты измерений спектрального состава проходящей, отраженной и проникающей в снежную толщу коротковолновой радиации, проведенных с июня по октябрь 2022 г. на НИС «Ледовая база Мыс Баранова» (79°16' с. ш., 101°45' в. д.). Наблюдения за спектральным составом солнечной радиации проводились с помощью гиперспектрального радиометра RAMSES производства компании TriOS (Германия). Прибор измеряет интенсивность поступающего излучения на диапазоне длин волн от 320 до 950 нм с разрешением 3 нм. Для настоящего исследования полученные данные были использованы с разрешением 10 нм, а также проводились визуальные наблюдения за количеством и формой облачности и высотой снежного покрова по рейкам.

Для проведения измерений использовано 3 датчика, которые были установлены на штанге на высоте 2 м от снежного покрова на территории метеоплощадки НИС. Для измерения проходящей радиации датчик был направлен вверх, для отраженной - вниз, а в период с 12 по 20 июня третьим датчиком, установленным в сугроб, были проведены измерения проникающей в снег солнечной радиации. По измерениям проходящей и отраженной радиации было рассчитано спектральное и осредненное значение альbedo подстилающей поверхности. За рассматриваемый период удалось получить измерения альbedo над различными типами снежного покрова, оголенном глинисто-каменистом участке с вкраплениями растительности, а также на снежниках и поверхности ледника Мушкетова после снеготаяния. Первичная обработка данных включает себя устранение помех, связанных с затенениями датчиков, а также отбраковку измерений, полученных при высоте Солнца менее 5 градусов. Дальнейшая обработка требует также отбраковки данных при выпадении осадков.

Рассмотрен эпизод в даты 21 июня и 23 июня 2022 г. в срок 06:00 ВCB (что соответствует местному времени 14:00 часов), когда послеполуденная высота солнца близка к максимальной (приблизительно 33 градуса). В первом случае облачность отсутствовала (0/0), состояние диска солнца – в квадрате, во втором случае было пасмурно, наблюдалась плотная облачность нижнего яруса (10/10, Sc op.). Обработка результатов измерений показала, что спектральный состав не меняется при наличии облачности, однако интенсивность проходящей радиации при плотной сплошной облачности уменьшается почти в 3 раза. Максимум интенсивности проходящей и отраженной радиации приходится на длины волн 450–500 нм. Спектральное альbedo для обоих случаев достаточно близко, различия наблюдаются на промежутке 450–750 нм, когда в случае сплошной облачности альbedo оказывается немного (примерно 5-7%) превосходящим по величине.

Также было рассчитано среднее арифметическое значение альbedo по всем длинам волн за каждый промежуток времени. Был зафиксирован достаточно плавный спад альbedo снежного покрова в период снеготаяния, с 90 % от поверхности свежевывпавшего снега до 60% от поверхности уже практически разрушенного снежного покрова. При наличии снежного покрова (до 5 июля и с 25 августа) максимумы спектрального альbedo приходятся на коротковолновый интервал, 470–620 нм при старом снежном покрове и 320–350 нм осенью, на поверхности свежевывпавшего снега, а максимумы спектрального альbedo глинисто-каменистой поверхности приходятся на более длинноволновый диапазон, 830–950 нм. В летний период осредненное значение альbedo подстилающей поверхности практически неизменно находится в диапазоне 10–13%.

Investigation of the spectral composition of incoming, reflected and transmitting into the snowpack of solar radiation in the Arctic

M.A. Loskutova (loskutova@aari.ru), A.P. Makshtas, O.R. Sidorova
Arctic and Antarctic research Institute, Saint Petersburg, Russia

The results of measurements of the spectral composition of incoming, reflected, and transmitting into the snowpack short-wave radiation, carried out at the research station Ice Base Cape Baranov (79°16' N, 101°45' E) from June to October 2022 are presented. Observations of the spectral composition of solar radiation were carried out using a hyperspectral radiometer RAMSES manufactured by TriOS (Germany). The device measures the intensity of incoming radiation in the wavelength range from 320 to 950 nm with a resolution of 3 nm. For this study, the data obtained were used with a resolution of 10 nm, and visual observations were made of the amount and form of cloudiness and the height of the snow cover.

For the measurements, 3 sensors were used, which were installed on the rod at a height of 2 m from the snow cover at a meteorological station area. To measure the incoming radiation, the sensor was directed upwards, for the reflected radiation it was directed downwards. In the period from June 12 to 20, the third sensor installed in a snowpack measured the solar radiation transmitting into the snow. Based on the measurements of the incoming and reflected radiation, the spectral and arithmetic mean albedo of the underlying surface was calculated. It was possible to obtain albedo measurements over various types of snow cover, a bare area with interspersed vegetation, as well as on meltwater lakes and the surface of a glacier after snowmelt. Primary data processing consists of the removal of noise associated with sensor shading, as well as the rejection of measurements taken at a solar altitude of less than 5 degrees. Further processing also requires the rejection of data during precipitation.

We considered the episode on June 21 and June 23, 2022 at 06:00 UTC (14:00 local time), when the afternoon sun height is close to the maximum (approximately 33 degrees). In the first case, there was no cloudiness (0/0), the state of the sun's disk was "in the square", in the second case it was overcast, dense cloudiness of the lower layer was observed (10/10, Sc op.). The processing of the measurement results showed that the spectral composition does not change in the presence of cloudiness, however, the intensity of the incoming radiation in the case of dense continuous cloudiness decreases by almost 3 times. The maximum intensity of incoming and reflected radiation falls on wavelengths of 450-500 nm. The spectral albedo for both cases is quite close, the differences are observed in the interval 450-750 nm, when in the case of overcast cloudiness, the albedo turns out to be slightly superior in value (about 5-7%).

The arithmetic mean albedo was also calculated for all wavelengths for each time interval. A fairly smooth decrease in the snow cover albedo during the snowmelt period was recorded, from 90% of the surface of freshly fallen snow to 60% of the surface of the almost destroyed snow cover. In the presence of snow cover (before July 5 and from August 25), the spectral albedo maxima occur in the short-wave interval, 470–620 nm with old snow cover and 320–350 nm in autumn, on the surface of freshly fallen snow, and the spectral albedo maxima of the bare surface fall to a longer wavelength range, 830–950 nm. In summer, the average value of the albedo of the underlying surface is almost invariably in the range of 10–13%.

Характеристики облаков в Арктике: сравнительный анализ спутниковых данных и региональных моделей Arctic-CORDEX

Нарижная А.И.¹ (alex.narizhnaya@ifaran.ru), Чернокульский А.В.^{1,2}, Rinke А.³

¹ *Институт физики атмосферы им. А.М.Обухова РАН, Москва, Россия.*

² *Институт географии РАН, Москва, Россия*

³ *Alfred Wegener Institute, Helmholtz Centre for Polar and Marine, Potsdam, Germany*

Облака в Арктике играют одну из ключевых ролей, оказывая влияние на региональный энергетический баланс и участвуя в ряде важных климатических обратных связей. Облачность Арктики чувствительна к различным климатическим факторам, таким как площадь морского льда и индексы атмосферной циркуляции. Климатические модели, включая региональные, не корректно воспроизводят ряд облачных характеристик в Арктике. Качество моделирования можно улучшить на основе сопоставления с наблюдаемыми характеристиками облаков, полученными, например, на основе данных спутникового зондирования.

В данной работе представлен сравнительный анализ характеристик облаков (балл облачности разного уровня, показатели водности и ледности) на основе данных восьми региональных моделей проекта Arctic-CORDEX в сравнении со спутниковыми данными CERES. Сравнение характеристик облачности по данным модельных экспериментов и по данным спутникового зондирования проводилось для широкого диапазона условий, включая различные подстилающие поверхности (открытая вода и морской лед), для различных сезонов и синоптических условий. Модели Arctic-CORDEX проанализированы с учетом их конфигурации, включая вертикальное и горизонтальное разрешение, схемы параметризации облачности.

Characteristics of clouds in the Arctic:

Comparison of Arctic-CORDEX regional model's data with satellite observations

A.I. Narizhnaya¹ (alex.narizhnaya@ifaran.ru), A V Chernokulsky^{1,2}, A. Rinke³

¹ *A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

² *Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

³ *Alfred Wegener Institute, Helmholtz Centre for Polar and Marine, Potsdam, Germany*

Clouds play a key role in the Arctic, influencing the regional energy balance and participating in some important climatic feedbacks. Arctic cloudiness is sensitive to various climatic factors, such as sea ice extent and atmospheric circulation indices. Climate models, including regional models, do not correctly reproduce cloud characteristics in the Arctic. The quality of modeling can be improved by comparison with observed cloud characteristics obtained, for example, from satellite sensing data.

This paper presents a comparative analysis of cloud characteristics (cloud area fraction of varying cloud levels, integral water and ice content) based on data from eight regional models of the Arctic-CORDEX project compared to CERES satellite data. Comparison of cloud characteristics from

model experiments and satellite sensing data was carried out for a wide range of conditions, including different underlying surfaces (open water and sea ice), for different seasons and synoptic conditions. Arctic-CORDEX models were analyzed considering their configuration, including vertical and horizontal resolution, cloud parameterization schemes.

Оценка вклада компонентов теплового баланса в пространственное распределение абляции ледника Альдегонда (Шпицберген)

Прохорова У.В. (yliwa@rambler.ru), Терехов А.В., Иванов Б.В.

Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, Россия

Метеорологические наблюдения на леднике Альдегонда производятся, начиная с 2015 г., однако, на основе полученных ранее (Прохорова и др., 2023) зависимостей можно установить некоторые особенности абляции и за более ранний отрезок времени, используя в качестве основы данные гляциологического мониторинга. Всего за 12 лет наблюдений R^2 , показывающий долю вариации величины абляции, определяемую высотой над уровнем моря, изменялся от 0,37 до 0,86. Чем ниже этот показатель, тем большая доля вариации определяются компонентами теплового баланса, не зависящими от высоты; таковым показателем является коротковолновый баланс.

Гораздо более подробно рассмотреть распределение величины абляции по леднику Альдегонда в зависимости от высоты возможно на основе данных о снижении его поверхности, рассчитанных на основе цифровых моделей рельефа (ЦМР). В работе использовано распределение по пятилетним интервалам: за период 2008–2013 гг. и 2013–2018 гг. Изменения высоты ледника в целом зависят от рельефа, демонстрируя наибольшие значения суммарного таяния льда вблизи края ледника и наименьшие — в верховьях. Тем не менее, заметно, что снижение поверхности ледника происходит вдоль левого и правого борта (северного и южного, соответственно) по-разному при равных высотах. Объяснением наблюдаемого различия в таянии северной и южной частей ледника Альдегонда может служить форма её поверхности. Чтобы наглядно продемонстрировать, каким образом экспозиция вносит свой вклад в распределение величины абляции по леднику, был рассчитан усредненный за сезон нисходящий поток солнечной радиации при ясном небе в период абляции (с 15 июля по 15 сентября). Для этого был использован алгоритм “Potential Incoming Solar Radiation”, реализованный в программе SAGA GIS. В силу особенностей уклона и экспозиции, максимум значений среднего потока солнечной радиации приходится на северную часть ледника, охватывая область наиболее интенсивного таяния, в то время как минимальные значения распределены вдоль южного борта, где ледник затеняется горным хребтом.

Осредненный поток в пределах северной и южной частей ледника Альдегонда составляет 165 и 139 Вт/м², то есть среднее различие составляет около 26 Вт/м². В действительности, из-за рассеяния значительной части потока солнечной радиации, контраст между фактическими значениями должен быть несколько ниже. Однако, это различие заметно влияет на распределение величины абляции льда по леднику. По ЦМР разница в пятилетней величине таяния в северной и южной частях ледника примерно равна в оба рассматриваемых временных периода и составляет 2,1 м. Чтобы растопить такое количество льда на протяжении условного сезона таяния в 60 суток, нужен дополнительный поток энергии в 23 Вт/м². Это хорошо согласуется с приведенным ранее выводом о различии рассчитанных потоков для северной и южной частей ледника.

Полученные оценки позволяют построить модель множественной регрессии, где снижение поверхности может быть рассчитано по высоте поверхности и значению потока

солнечной радиации. Коэффициент детерминации такой модели равен $R^2 = 0,73$ и $0,75$. Таким образом, из объясненной регрессионной зависимостью части изменчивости абляции только $\frac{1}{3}$ обусловлена приходом коротковолновой радиации, большая часть (или $\frac{2}{3}$) связана с компонентами, зависящими от высоты. Оставшаяся необъясненной часть дисперсии абляции — это вклад в изменчивость компонентов баланса, не зависящих от высоты, таких как альbedo поверхности.

Одним из важных следствий приведенного анализа является то, что ориентация ледников архипелага Шпицберген крайне важна для их теплового баланса и абляции поверхности. При ориентации поверхности ледника на юг вклад солнечной радиации в абляцию может быть существенно выше оцененного для ледника Альдегонда.

Estimation of the heat balance components contribution to the distribution of Aldegondabreen glacier (Spitsbergen) ablation

U.V. Prokhorova (yliwa@rambler.ru), A.V. Terekhov, B.V. Ivanov
Arctic and Antarctic Research Institute, Saint-Petersburg, Russia

Meteorological observations on the Aldegondabreen glacier have been made since 2015, however, based on the dependences obtained earlier (Prokhorova et al., 2023), it is possible to estimate some features of ablation for an earlier period of time, using glaciological monitoring data as a basis. Over 12 years of observations, R^2 , which shows the proportion of ablation variation determined by height above sea level, varied from 0.37 to 0.86. The lower this indicator, the greater the proportion of variation determined by the components of the heat balance that do not depend on height; such an indicator is the short-wave balance.

It is possible to consider the distribution of the ablation value along the Aldegondabreen glacier depending on the height in much more detail on the basis of data on the decrease in its surface, calculated on the basis of digital elevation models (DEMs). Was used the distribution over five-year intervals: for the period 2008–2013 and 2013–2018. Changes in the height of the glacier as a whole depend on the relief, demonstrating the highest values of the total ice melt near the edge of the glacier and the lowest in the upper reaches. Nevertheless, it is noticeable that the decrease in the surface of the glacier occurs along the left and right sides (northern and southern, respectively) in different ways at equal heights. The observed difference in the melting of the northern and southern parts of the Aldegondabreen glacier can be explained by the shape of its surface. To clearly demonstrate how the exposure contributes to the distribution of the ablation value over the glacier, we calculated the seasonally averaged downward flux of solar radiation under clear skies during the ablation period (from July 15 to September 15). For this, the “Potential Incoming Solar Radiation” algorithm implemented in the SAGA GIS program was used. Due to the peculiarities of the slope and exposure, the maximum values of the average solar radiation flux fall on the northern part of the glacier, covering the area of the most intense melting, while the minimum values are distributed along the southern edge, where the glacier is shaded by the mountain range.

The average flux within the northern and southern parts of the Aldegondabreen glacier is 165 and 139 W/m^2 , i.e. the average difference is about 26 W/m^2 . In reality, due to the scattering of a significant part of the solar radiation flux, the contrast between the actual values should be somewhat lower. However, this difference significantly affects the distribution of ice ablation over the glacier. According to the DEM, the difference in the five-year melting value in the northern and southern parts of the glacier is approximately equal in both considered time periods and is 2.1 m. To melt such an amount of ice during the conventional melting season of 60 days, an additional energy flow of 23 W/m^2 . This agrees well with the earlier conclusion

about the difference between the calculated fluxes for the northern and southern parts of the glacier.

The estimates obtained make it possible to construct a multiple regression model, where the surface decline can be calculated from the surface height and the value of the solar radiation flux. The coefficient of determination of such a model is $R^2 = 0.73$ and 0.75 . Thus, out of the part of the ablation variability explained by the regression dependence, only $\frac{1}{3}$ is due to the arrival of short-wave radiation, the greater part (or $\frac{2}{3}$) is associated with the height-dependent components. The remaining unexplained part of the ablation dispersion is the contribution to the variability of balance components that do not depend on height, such as surface albedo.

One of the important consequences of the analysis is that the orientation of the glaciers of the Svalbard Archipelago is extremely important for their thermal balance and surface ablation. When the glacier surface is oriented to the south, the contribution of solar radiation to ablation can be significantly higher than that estimated for the Aldegondabreen glacier.

Результаты пятилетнего цикла измерений характеристик аэрозоля на полярной станции «Мыс Баранова» (2018-2022 гг.)

Сакерин С.М.¹ (sms@iao.ru), Кабанов Д.М.¹, Чернов Д.Г.¹, Лоскутова М.А.², Ризе Д.Д.², Турчинович Ю.С.^{1,2}

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

²Арктический и Антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, Россия

Атмосферный аэрозоль играет важную роль в климатических процессах, но отличается высокой изменчивостью и неопределенностью своих характеристик. Повышенное внимание в последнее время уделяется исследованиям аэрозоля в Арктике, где происходят самые большие изменения климата. В 2010-2011 гг. организованы регулярные измерения характеристик аэрозоля на Российских полярных станциях в районе Тикси и Баренцбурга (арх. Шпицберген). В 2018 г. аналогичные измерения начались на третьей станции – «Мыс Баранова» (арх. Северная Земля; 79,3°с.ш., 101,6° в.д.). В состав измеряемых характеристик входят: счетная концентрация частиц радиусом 0,2-5 мкм (счетчик АЗ-10), содержание в аэрозоле поглощающего вещества в эквиваленте черного углерода (аэталометр МДА) и аэрозольная оптическая толща (АОТ) атмосферы в диапазоне спектра 0,34-2,14 мкм (солнечный фотометр SPM). По данным измерений рассчитываются мелко- и грубодисперсный компоненты объемов частиц (V_f , V_c) и АОТ (τ_f , τ_c) на длине волны 0,5 мкм.

В настоящей работе представлено статистическое обобщение результатов пятилетнего мониторинга характеристик аэрозоля на станции «Мыс Баранова». Средние значения характеристик аэрозоля за общий период наблюдений составили: объемы частиц $V_f - 0,44$ мкм³/см³, $V_c - 0,51$ мкм³/см³; концентрации черного углерода – 56 нг/м³; АОТ (0,5 мкм) – 0,095 (в том числе, $\tau_f - 0,082$, о $\tau_c - 0,013$); показатель Ангстрема – 1,7. Обсуждаются особенности сезонной изменчивости различных характеристик аэрозоля. Отмечается влияние на арктическую атмосферу выносов дымов лесных пожаров и других загрязнений из средних широт. Полученные средние характеристики аэрозоля сравниваются с аналогичными данными над соседним Карским морем (морские экспедиции 2007-2022 гг.) и на станции Баренцбург (2011-2022 гг.).

Работа выполнена при финансовой поддержке проекта РФФ № 21-77-20025.

Results from five-year cycle of measuring the aerosol characteristics at polar station Cape Baranov (2018-2022)

S.M. Sakerin¹ (sms@iao.ru), D.M. Kabanov¹, D.G. Chernov¹, M.A. Loskutova², D.D. Rize², Yu.S. Turchinovich^{1,2}

¹V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Tomsk, Russia;

²Arctic and Antarctic Research Institute, Saint-Petersburg, Russia

Atmospheric aerosol plays an important role in climate processes; however, it stands out in strong variations and large uncertainty of its characteristics. Increased attention is devoted recently to aerosol studies in the Arctic, where climate changes are the largest. In 2010-2011, regular measurements of aerosol characteristics were organized at the Russian polar stations in the region of Tiksi and Barentsburg (the Spitsbergen Archipelago). In 2018, analogous measurements were initiated at the third station, namely, Cape Baranov (the Severnaya Zemlya Archipelago; 79.3°N, 101.6°E). The measured characteristics included: the number concentration of particles with the radii 0.2-5 μm (AZ-10 counter), the content of absorbing substance in aerosol in the equivalent of black carbon (MDA aethalometer), and the aerosol optical depth (AOD) of the atmosphere in the wavelength range of 0.34-2.14 μm (SPM sun photometer). The particle counter and sun photometer measurements were used to calculate the fine and coarse components of AOD (τ_f , τ_c) at the wavelength of 0.5 μm and the particle volumes (V_f , V_c).

In this work, we presented a statistical generalization of results from five-year monitoring of aerosol characteristics at the polar station Cape Baranov. Over the total measurement period, the average aerosol characteristics had been: 0.44 $\mu\text{m}^3/\text{cm}^3$ for the particle volumes V_f , 0.51 $\mu\text{m}^3/\text{cm}^3$ for V_c ; 56 ng/m^3 for the black carbon concentration; 0.095 for AOD (0.5 μm) (and, in particular, 0.082 for τ_f , and 0.013 for τ_c); and 1.7 for the *Ångström exponent*. The specific features of seasonal variations in different aerosol characteristics are discussed. It is noted that the Arctic atmosphere is affected by outflows of smokes from forest fires and other pollutants from midlatitudes. The obtained average aerosol characteristics are compared with analogous data over the neighboring Kara Sea (2007-2022 marine expeditions) and from the Barentsburg station (2011-2022).

This work was supported by the Russian Science Foundation (under the project no. 21-77-20025).

Вертикальное распределение чёрного углерода в атмосфере зимней Арктики по данным баллонного зонда обратного рассеяния

Фомин Б.А.^{1,2} (b.fomin@mail.ru), Балугин Н.В.^{1,2}, Гинзбург В.А.¹, Зеленова М.С.¹, Кострыкин С.В.^{1,3}, Кухта Б.А.¹, Юшков В.А.²

¹Институт глобального климата и экологии им. академика Ю. А. Израэля, Москва, Россия

²ФГБУ «Центральная Аэрологическая Обсерватория», Долгопрудный, Россия

³Институт Вычислительной Математики РАН, Москва, Россия

Исследование распределения чёрного углерода в столбе атмосферы зимней Арктики вызывает известные трудности. В частности, из-за практической невозможности применять методы дистанционного зондирования по солнечному излучению. Проблема может быть решена с помощью контактных самолётных измерений, однако трудноосуществима в силу их высокой стоимости. В данной работе тестировался бюджетный «Аэрозольный Зонд Обратного Рассеяния» (АЗОР). Одна из целей экспериментальных исследований - получить представление о вертикальном распределении в атмосфере черного углерода, по возможности, проследить пути

переноса, определить источники выбросов. Метод измерения концентрации чёрного углерода основан на регистрации обратного излучения (из-за молекулярного и аэрозольного рассеяния) в двух каналах: от двух светодиодов прибора (470 или 528 нм, и 940 нм), формирующегося в его непосредственной близости (~2-3 м). Отметим, что измерения в двух каналах позволяет сделать оценки состава аэрозоля. Для данной работы особенно важно, что отношение измеренных величин в этих каналах надёжно указывает на наличие или отсутствие чёрного углерода в данной точке траектории полёта зонда. Измерения вертикального распределения выполнены с использованием аэрологической оболочки с высотой подъема ~30 км.

Зонды были запущены в марте 2021 г. (4 запуска) и феврале 2023 г. (4 запуска) на Аэрологической станции г. Салехард. При обработке данных выявлена стабильность оптических свойств стратосферы, а также профиля концентрации чёрного углерода на протяжении нескольких дней, и даже лет. Результаты измерений находятся в хорошем согласии со спутниковыми данными (Copernicus Atmosphere Monitoring Service - CAMS). В целом применение АЗОР показало хорошую эффективность в исследованиях распределения черного углерода в атмосфере арктического региона и может быть рекомендовано для широкого распространения в научных исследованиях по данной теме.

Исследование выполнено в рамках научных тем Росгидромета (ФГБУ «ИГКЭ») АААА-А20-120020590066-5 «Мониторинг глобального климата и климата Российской Федерации и ее регионов, включая Арктику. Развитие и модернизация технологий мониторинга», АААА-А20-120021090098-8 «Развитие методов и технологий расчетного мониторинга антропогенных выбросов и абсорбции поглотителями парниковых газов и короткоживущих климатически-активных веществ», Плана ОПП 8.23. Обеспечение российского участия в деятельности группы Арктического совета по черному углероду (саже) и метану.

Vertical distribution of black carbon in the atmosphere of the winter Arctic according to the data of an aerosol backscatter probe

B.A. Fomin^{1,2} (b.fomin@mail.ru), N.V. Balugin^{1,2}, V.A. Ginzburg¹, M.S. Zelenova¹, S.V. Kostrykin^{1,3}, B.A. Kukhta¹, V.A. Yushkov²

¹*Institute of Global Climate and Ecology by Academician Yu. A. Izrael, Moscow, Russia*

²*Central Aerological Observatory, Dolgoprudny, Russia*

³*Institute of Computational Mathematics RAS, Moscow, Russia*

The study of the distribution of black carbon in the atmospheric column of the winter Arctic causes certain difficulties. In particular, due to the practical impossibility to apply methods of remote sensing by solar radiation. The problem can be solved with the help of airborne contact measurements, however, it is difficult to implement due to their high cost. In this work, the budgetary "Aerosol Backscatter Probe" (ABP) was tested. One of the goals of experimental studies is to get an idea of the vertical distribution of black carbon in the atmosphere, to trace the transport paths, if possible, and to determine the sources of emissions. The method for measuring the concentration of black carbon is based on the registration of back radiation (due to molecular and aerosol scattering) in two channels: from two LEDs of the device (470 or 528 nm, and 940 nm), which is formed in its immediate vicinity (~ 2-3 m). Note that measurements in two channels make it possible to estimate the composition of the aerosol. For this work, it is especially important that the ratio of the measured values in these channels reliably indicates the presence or absence of black carbon at a given point of the probe flight path. The vertical distribution measurements were made using an aerological shell with a rise height of ~30 km.

The probes were launched in March 2021 (4 launches) and February 2023 (4 launches) at the Aerological station in Salekhard. Data processing revealed the stability of the optical properties of the stratosphere, as well as the concentration profile of black carbon over several days, and even years. The measurement results are in good agreement with satellite data (Copernicus Atmosphere Monitoring Service - CAMS). In general, the use of ABP has shown good efficiency in studies of the distribution of black carbon in the atmosphere of the Arctic region and can be recommended for widespread use in scientific research on this topic.

The study was carried out within the framework of the scientific topics of Roshydromet (FGBI IGCE) AAAA-A20-120020590066-5 "Monitoring of the global climate and the climate of the Russian Federation and its regions, including the Arctic. Development and modernization of monitoring technologies", AAAA-A20-120021090098-8 "Development of methods and technologies for computational monitoring of anthropogenic emissions and removals by sinks of greenhouse gases and short-lived climate-active substances", ERP Plan 8.23. Ensuring Russian participation in the activities of the Arctic Council group on black carbon (soot) and methane.