МЕТЕОРОЛОГИЯ

УДК 551.510.4:[001.891:378.4] doi: 10.33933/2074-2762-2020-60-219-240

Моделирование изменчивости газового состава атмосферы в РГГМУ

С.П. Смышляев, П.А. Блакитная, М.А. Моцаков, А.Р. Яковлев, М.В. Черепова

Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург, smyshl@rshu.ru

Приведено описание разработанных в РГГМУ моделей газового состава нижней и средней атмосферы, имеющих единый блок фотохимических превращений и разные методы учета влияния динамических процессов на изменение содержания атмосферных газов. Приведены примеры использования моделей газового состава РГГМУ для исследования влияния физических и химических процессов, а также природных и антропогенных факторов на изменчивость атмосферного озона и качества воздуха.

Ключевые слова: атмосферные газы, численное моделирование, фотохимия атмосферы, стратосферный озон, природные и антропогенные воздействия, динамика атмосферы.

Modeling the variability of the atmospheric gas composition at RSHU

S.P. Smyshlyaev, P.A. Blakitna, M.A. Motsakov, A.R. Yakovlev, M.V. Cherepova

Russian State Hydrometerological University, St. Petersburg, Russia, smyshl@rshu.ru

A set of numerical models of the lower and middle atmosphere gas composition has been created at the Russian State Hydrometeorological University (RSHU). The set of RSHU numerical models consists of a global chemistry-climate model (CCM) of the troposphere, stratosphere and mesosphere (0-90 km), a chemistry-transport model (CTM) of the troposphere and stratosphere gas composition with meteorological parameters specified from reanalysis data (0-60 km), and a model of Eurasia air quality (0-32 km). All models use a single block of chemical transformations in the atmosphere and different ways of using meteorological parameters that determine the effect of atmospheric transport on atmospheric gases. The CCM allows us to study the interaction of physical and chemical processes in the lower and middle atmosphere, the CTM is suitable for studying the influence of chemical processes on the gas composition of the atmosphere under a given influence of dynamic factors, and the air quality model can be used to analyze the impact of surface emissions of pollutants and meteorological conditions on the observed variability of air quality in different parts of Eurasia.

Numerical experiments with RSHU CCM described in this article allowed us to identify the relative role of natural and anthropogenic factors in the interannual variability of atmospheric ozone in tropical, middle and polar latitudes. Quantitative estimates of ozone trends revealed a greater rate of ozone decrease in Northern mid-latitude compared to its variability in the tropical latitudes. During periods of sharp ozone decrease and then recovery in the 90th years of the twentieth century, in the tropics and mid-latitudes, the additive role played by the combination of several factors: the fall in ozone as a result of increased content

of chlorine and bromine gases and reduction in solar activity and the role of sea surface temperature on the background of increasing chlorine and bromine gases and the increase in the ozone content in the result of the purification of stratospheric aerosol and the influence of the variability of sea surface temperature and growth of solar activity. The results of numerical calculations with CTM demonstrated the predominant role of dynamic processes in the formation of winter-spring ozone anomalies in the Arctic and Subarctic. Rapid use of the air quality model has shown the important impact of meteorological conditions on air quality in Eurasia.

Keywords: atmospheric gases, numerical modeling, atmospheric photochemistry, stratospheric ozone, natural and anthropogenic impacts, atmospheric dynamics.

For citation: *S.P. Smyshlyaev, P.A. Blakitna, M.A. Motsakov, A.R. Yakovlev, M.V. Cherepova.* Modeling the variability of the atmospheric gas composition at RSHU. *Gidrometeorologiya i Ekologiya.* Hydrometeorology and Ecology (Proceedings of the Russian State Hydrometeorological University). 2020, 60: 219—240. [In Russian]. doi: 10.33933/2074-2762-2020-60-219-240

Введение

В РГГМУ моделирование изменчивости газового состава нижней и средней атмосферы проводится с 90-х годов XX века. За это время в содружестве с Государственным университетом штата Нью-Йорк разработана двумерная фотохимическая модель, использующая динамические параметры из модели общей циркуляции атмосферы [1]. Эта модель использовалась для исследования влияния конвективных процессов на атмосферный газовый состав [2], воздействия сверхзвуковых самолетов на атмосферный озон [3] и атмосферного незонального переноса на газовый состав стратосферы [4], для изучения изменчивости газового состава Антарктики [5, 6] и влияния природных и антропогенных факторов на тенденции изменения атмосферного озона [7, 8], а также для исследования трендов стратосферного озона [9—11].

Начиная с 2000-х годов разработанная в РГГМУ схема химических процессов с участием газов и аэрозолей нижней и средней атмосферы стала использоваться в трехмерных химико-транспортных моделях Осло [12] и ИВМ РАН [13, 14]. В развитие сотрудничества РГГМУ и ИВМ РАН была создана химико-климатическая модель (ХКМ) ИВМ РАН — РГГМУ [15, 16], в которой в интерактивной форме учитывается взаимное влияние динамических и химических процессов в нижней и средней атмосфере (0—90 км). ХКМ ИВМ РАН — РГГМУ использовалась для исследования процессов в полярной стратосфере [17], изучения влияния грозовой активности на газовый состав атмосферы [18, 19], исследования влияния солнечной активности на газовый состав атмосферы [20—22].

В последние годы ХКМ ИВМ РАН — РГГМУ совместно с модифицированной версией, в которой динамические параметры атмосферы задаются по данным реанализа (MERRA или ERA-Interim) [23], используется для исследования изменчивости арктической и субарктической атмосферы [24—30], изменчивости потоков эритемной солнечной радиации [31—33], влияния вулканических выбросов на газовый состав атмосферы [34], влияния выбросов метана из арктических газовых гидратов на газовый состав атмосферы [35], а также эффектов изменения качества воздуха [36, 37].

Методика исследования

Для моделирования изменчивости газового состава нижней и средней атмосферы в РГГМУ используются глобальные и региональные численные модели, в которых рассчитывается изменение концентрации малых газов атмосферы под воздействием локальных фотохимических процессов, атмосферного упорядоченного и турбулентного переноса, фазовых переходов, эмиссий с поверхности, а также сухого и влажного осаждения и разрушения на подстилающей поверхности.

Во всех моделях газового состава РГГМУ используется единый блок химической эволюции малых газов атмосферы. Ядром данного блока является программный модуль расчета временной эволюции концентрации атмосферных газов на основе численного решения уравнений химической кинетики, автоматически создаваемых для каждого из исследуемых атмосферных газов кинетическим препроцессором на основе заданных в форме входных параметров модели таблиц рассматриваемых газов, списка химических реакций и процессов фотодиссоциации.

Химический препроцессор на основе входных таблиц подготавливает данные для вычисления скоростей химических реакций и процессов фотодиссоциации на каждом временном шаге модельных вычислений на основе принципов химической кинетики [38]. При этом для вычисления скорости химических реакций используются заданные во входных таблицах на основе данных Jet Propulsion Laboratory (JPL) [39] параметры химических реакций, а скорость фотодиссоциации на каждом модельном шаге рассчитывается с учетом оценки потоков прямой, отраженной и рассеянной солнечной радиации в спектральном диапазоне от 175 до 850 нм [40]. Рассчитанные таким образом значения скорости фотохимического изменения атмосферных газов используются затем в уравнениях баланса для расчета эволюции малых газов атмосферы в результате одновременного воздействия химических, радиационных и динамических процессов.

Для учета влияния динамических процессов (адвективного и турбулентного переноса массы) на изменчивость содержания атмосферных газов нужны данные о скорости адвекции и коэффициенте турбулентности. В РГГМУ используются несколько подходов использования метеорологических и климатических параметров в моделях газового состава атмосферы. Для исследования одновременного влияния химических и физических процессов на изменчивость газового состава с учетом их взаимодействия и обратных связей в РГГМУ используется химико-климатическая модель (ХКМ) ИВМ РАН — РГГМУ, представляющая собой объединение моделей общей циркуляции и газового состава атмосферы [15]. В ХКМ ИВМ РАН — РГГМУ скорость адвективного переноса, коэффициент турбулентности, а также температура атмосферы, влияющая на скорость химических реакций, и влажность воздуха, определяющая содержание водяного пара в атмосфере, рассчитываются с использованием среднеатмосферной версии модели общей циркуляции атмосферы (МОЦА) ИВМ РАН [41].

Рассчитанные в МОЦА ИВМ РАН климатические параметры передаются в модель газового состава (МГС) РГГМУ, где используются для оценки влияния атмосферного переноса и зависящих от температуры химических реакций и

процессов фотодиссоциации на содержание атмосферных газов и аэрозолей. В то же время рассчитанные в МГС РГГМУ значения концентрации атмосферных газов используются для расчета скорости нагрева атмосферы, влияющей на температуру и влажность воздуха, скорость ветра и давление. ХКМ ИВМ РАН — РГГМУ охватывает тропосферу, стратосферу и мезосферу и позволяет в глобальном масштабе рассчитывать изменчивость 74 атмосферных газов, включая кислородные, водородные, азотные, хлорные, бромные, углеродные и серные компоненты. Численная схема ХКМ ИВМ РАН — РГГМУ основана на конечно-разностном решении уравнений гидротермодинамики, основывающихся на аппроксимации уравнений баланса атмосферных газов, движения и притока тепла, представляющих собой математическое описание фундаментальных законов физики и химии [15].

Второй подход для использования метеорологических параметров в модели газового состава РГГМУ заключается в использовании вместо интерактивного динамического блока в форме МОЦА ежедневных данных реанализа, которые приводятся к координатной сетке МГС и используются для расчета скорости химических реакций и сечения поглощения солнечной радиации (температура), адвективного переноса озона и других газов (ветер) и содержания водяного пара в тропосфере (абсолютная влажность). Поле вертикальной скорости рассчитывается в модели по уравнению неразрывности на основе ассимилированных данных о горизонтальных составляющих скорости ветра. Кроме того, в модели рассчитывается содержание водяного пара в стратосфере на основе его заданного содержания в тропосфере с учетом фотохимических источников в стратосфере. Использование данных реанализа вместо интерактивного расчета метеорологических параметров позволяет проводить численное моделирование изменения газового состава атмосферы для реально измеренных полей ветра, температуры, влажности и давления. В этом подходе пропадает учет обратных связей между изменчивостью динамических и химических полей в атмосфере, однако улучшается точность воспроизводства влияния динамических характеристик на содержание атмосферных газов.

ХКМ ИВМ РАН — РГГМУ и МГС РГГМУ с метеорологическими параметрами, заданными из данных реанализа, в основном используются в РГГМУ для исследования влияния глобальных процессов на изменение газового состава атмосферы. Эти модели охватывают весь земной шар и высоты от земной поверхности до мезопаузы (ХКМ ИВМ РАН — РГГМУ) и от поверхности до стратопаузы (МГС РГГМУ). Пространственное разрешение этих моделей достаточно грубое: 5° долготы на 4° широты, поэтому для исследования региональных процессов в РГГМУ используется модель газового состава Евразии с горизонтальным разрешением 0,5° широты на 0,5° долготы. Эта модель предназначена для оперативного исследования изменчивости качества воздуха в нижней атмосфере Евразии, поэтому, помимо более высокого горизонтального разрешения, имеет нижнюю границу на уровне 10 гПа (около 32 км). В качестве динамических параметров в МГС Евразии используются данные Global Forecast System (GFS). Модель используется для диагностики наблюдаемого состояния качества воздуха в Евразии на основе оперативного анализа GFS, содержащего данные о давлении, скорости

ветра, температуре и влажности воздуха за последние сутки, оцениваемые на основе модельной ассимиляции результатов измерений, а также для прогноза качества воздуха в Евразии на ближайшие трое суток на основе прогностических оценок метеорологических параметров GFS.

Во всех модификациях моделей газового состава атмосферы РГГМУ потоки газов с подстилающей поверхности задаются на основе адаптации международных баз данных о природных и антропогенных эмиссиях к пространственным сеткам моделей РГГМУ. Расчеты с использованием ХКМ ИВМ РАН — РГГМУ и МГС РГГМУ проводятся на основе данных ВМО об изменчивости выбросов веществ, разрушающих озон [42], и данных IPCC о выбросах парниковых газов [43]. Для МГС Евразии с более высоким разрешением используются базы данных EDGAR [45] для антропогенных потоков газовых примесей в атмосферу и MEGAN [44] для природных выбросов в атмосферу. Эмиссии газов задаются в качестве нижнего граничного условия моделей газового состава РГГМУ для потоковой формы уравнений баланса атмосферных газов как разность между потоками с поверхности и разрушением газов на поверхности, параметризуемым как произведение концентрации газа на скорость его разрушения на поверхности. Скорость разрушения газов на поверхности задается на основе лабораторных данных о параметрах взаимодействия атмосферных газов с разными типами поверхностей [39].

В единой химической схеме атмосферных процессов, применяемой во всех моделях газового состава атмосферы РГГМУ, рассматривается изменчивость 74 основных газовых составляющих атмосферы [1], взаимодействующих в 174 химических реакциях и 51 процессе фотолиза с участием кислородных, водородных, азотных, хлорных, бромных и серных газов, что позволяет рассматривать влияние химических процессов на образование и эволюцию малых газов и сульфатного аэрозоля. Количество и тип учитываемых фотохимических реакций позволяют исследовать изменения концентрации основных влияющих на озон газов как в стратосфере, так и в тропосфере [14]. Для расчета коэффициента фотолиза используется спектральная изменчивость приходящей солнечной радиации с учетом влияния на нее солнечной активности, а также поглощения и рассеяния радиации в атмосфере [40]. При этом межгодовая изменчивость спектральных потоков солнечной радиации задается на основе данных базы LASP [46].

Для исследования изменения газового состава полярной стратосферы используется модель образования и эволюции полярных стратосферных облаков (ПСО), которые играют ключевую роль в формировании явления «озоновых дыр» поздней зимой — ранней весной в Антарктике и Арктике [17]. Модель позволяет рассчитывать появление ПСО полярной зимой в нижней стратосфере (15—25 км) в результате укрупнения существующих на этих высотах частиц сульфатного аэрозоля, когда воздух охлаждается до температуры ниже 200 K. С одной стороны, в результате образования ПСО увеличивается площадь поверхности аэрозольных частиц, где происходят гетерогенные реакции, приводящие к перераспределению хлорных и бромных газовых составляющих атмосферы с последующим разрушением озона в хлорных и бромных каталитических циклах. С другой стороны, ПСО

поглощают пары азотной кислоты и водяного пара, что приводит к денитрификации и дегидратации полярной атмосферы.

В МГС учитывается влияние уменьшения содержания азотных и водородных газов (денитрификация и дегидратация) на увеличение относительной роли хлорных и бромных газов в каталитическом разрушении озона, что с учетом гетерогенной активации на поверхности ПСО ведет к усилению эффекта разрушения озона [12]. Фотодиссоциация газофазных продуктов гетерогенных реакций на поверхности ПСО приводит к высвобождению галогенных радикалов (Cl и Br), которые разрушают озон в каталитических циклах. Роль полярных процессов учитывается в результате моделирования процессов формирования циркумполярного вихря, который изолирует полярную стратосферу от обмена воздухом и теплом с умеренными широтами, в результате чего в течение полярной ночи образуется область низких температур, что способствует образованию и длительному существованию ПСО и накоплению оптически активных резервуарных газов Cl_2, HOCl, BrCl и HOBr. С возвращением солнца происходит высвобождение накопившихся галогенных радикалов с последующим быстрым разрушением озона.

Однако в случае присутствия в атмосфере достаточного количества азотных газов может происходить быстрое возвращение хлорных и бромных радикалов обратно в резервуарное состояние. В связанном состоянии, в форме $ClONO_2$ и $BrONO_2$, галогенные составляющие не представляют опасности для озона, а гетерогенные реакции после возвращения солнца и повышения температуры прекращаются, так как полярные стратосферные облака испаряются. В этой ситуации определяющую роль играет денитрификация полярной атмосферы, поскольку вследствие приведенных выше гетерогенных реакций образовавшаяся азотная кислота остается в составе частиц полярных стратосферных облаков, а их гравитационное осаждение приводит к вымыванию азотной кислоты из стратосферы [5]. В результате к моменту испарения ПСО после возвращения Солнца в составе частиц полярных стратосферных облаков остается незначительное количество HNO_3, являющейся доминирующим азотосодержащим газом нижней стратосферы.

Вследствие сокращения содержания азотной кислоты концентрация двуокиси азота NO_2, так же как и общее количество азотсодержащих газов, намного уменьшается по сравнению с уровнем начала полярной ночи перед началом процессов образования ПСО. В результате процессов денитрификации полярной стратосферы хлорные и бромные радикалы достаточно продолжительное время еще находятся в активном виде и продолжают разрушать озон в каталитических циклах.

В моделях газового состава РГГМУ рассматриваются два типа ПСО. При охлаждении стратосферы полярной ночью до температуры ниже 200 K в ней появляются облака, состоящие из жидких частиц, содержащих серную и азотную кислоты и воду. Подобные облака называются полярными стратосферными облаками первого типа (ПСО-1). ПСО-1 состоят из тригидрата азотной кислоты (NAT) и тройного раствора $H_2SO_4/HNO_3/H_2O$. При температуре ниже 190 K в полярной стратосфере регистрируются полярные стратосферные облака второго типа (ПСО-2), состоящие из ледяных частиц.

Результаты исследований

Результаты проводимых в РГГМУ исследований с использованием ХКМ ИВМ РАН — РГГМУ позволили оценить относительную роль природных и антропогенных факторов в наблюдаемой изменчивости стратосферного озона в разных широтных зонах [23]. На рис. 1 приведены результаты расчета изменчивости общего содержания озона в средних широтах Северного полушария в сравнении с данными спутниковых измерений. Как данные спутниковых измерений, так и результаты моделирования позволяют выделить три периода межгодовой изменчивости общего содержания озона в средних широтах Северного полушария: значительное уменьшение с начала 80-х до середины 90-х годов XX века, резкое увеличение с середины 90-х до начала 2000-х годов и слабую изменчивость в течение первых 20 лет XXI века. На эту изменчивость накладываются короткопериодные колебания общего содержания озона с максимумами около 1990, 2000 и 2010 гг., т. е. практически каждые 10 лет, и минимумами около1986—1987, 1993—1994, 2005—2007 и 2016 гг.

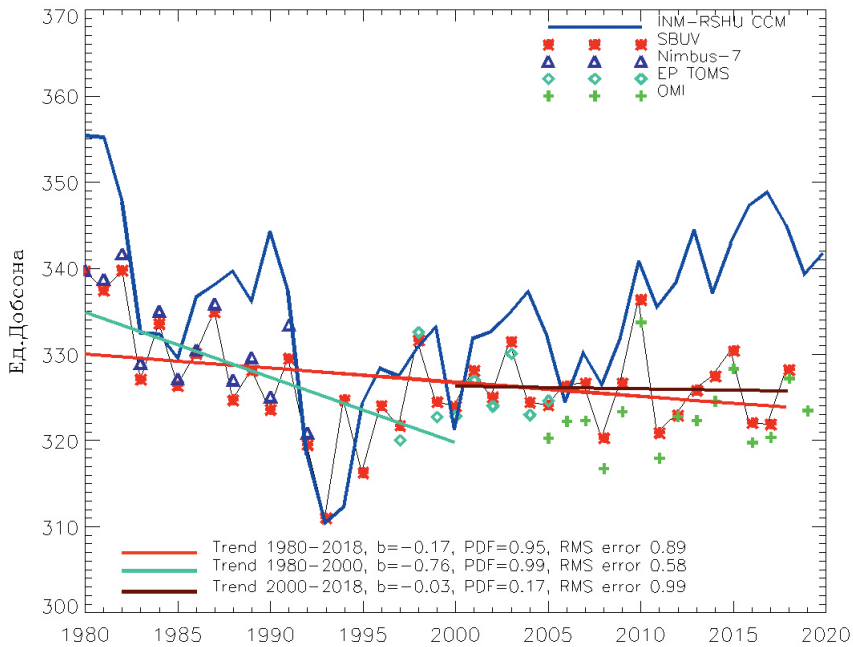

Рис. 1. Межгодовая изменчивость общего содержания озона в средних широтах Северного полушария по данным расчетов с ХКМ ИВМ РАН — РГГМУ в сравнении с данными спутниковых измерений.

Fig. 1. Interannual variability of the total column ozone in the middle latitudes of the Northern hemisphere according to calculations with the INM RAS – RSHU CCM in comparison with satellite measurements.

Количественные оценки трендов показывают большую скорость уменьшения озона в средних широтах Северного полушария по сравнению с тропическими широтами. В частности, для всего исследуемого периода 1980—2020 гг. коэффициент линейного тренда составляет –0,17 с уровнем значимости 0,05; для конца XX века –0,76 с уровнем значимости 0,01, а для начала XXI века –0,01 с уровнем значимости 0,83. Таким образом, можно констатировать, что отрицательные тренды содержания озона в средних широтах Северного полушария значимы с высоким уровнем как для всего периода 1980—2020 гг., так и для конца XX века (1980—2000 гг.). Для начала XXI века тренд является незначимым. Если оценивать тренды за три ранее выделенных периода, то в 1980—1995 гг. коэффициент линейного тренда составляет –1,41 с уровнем значимости 0,01, а в конце 90-х годов (1995—2000 гг.) коэффициент положительного линейного тренда составляет 1,42 с уровнем значимости 0,05.

Для оценки роли основных влияющих на межгодовую изменчивость содержания озона факторов (выбросов хлор- и бромсодержащих веществ, способствующих разрушению озона (ОДС), задаваемых на основе сценариев Всемирной метеорологической организации (ВМО) 2011 г.; изменений потоков солнечной радиации на верхней границе атмосферы, задаваемых по данным эмпирической модели НРЛ; содержания стратосферного сульфатного аэрозоля; температуры поверхности океана, задаваемой по данным реанализа МетОффис), помимо базового сценария, в котором учитывается влияние всех перечисленных факторов (сценарий базовый), проводились дополнительные модельные численные эксперименты, в которых учитывалось влияние каждого из этих факторов по отдельности. Сравнение результатов модельных экспериментов по данным сценариям позволило оценить роль каждого из исследуемых факторов в межгодовой изменчивости общего содержания озона в разных широтных зонах.

Анализ факторов, влияющих на содержание озона в средних широтах Северного полушария, показывает (рис. 2), что содержание хлорных и бромных газов, задаваемых по сценариям ВМО, существенно влияет на уменьшение содержания озона в средних широтах Северного полушария в первой половине исследуемого периода (1980—1995 гг.) и в конце периода (2010—2020 гг.). С середины 90-х годов до 2010 г. влияние хлорных и бромных газов на содержание озона в средних широтах Северного полушария является незначительным. Среди других факторов следует отметить более существенное по сравнению с тропическими широтами влияние стратосферного аэрозоля в конце XX века, особенно в периоды вулканических выбросов, а также более значительную роль изменчивости температуры поверхности океана, сравнимую с влиянием солнечной активности. В периоды резкого уменьшения содержания озона, а затем его восстановления в 90-е годы XX века, как и для тропических широт, суммарную роль играло сочетание сразу нескольких факторов: уменьшение содержания озона в результате увеличения содержания хлорных и бромных газов, уменьшение солнечной активности и роли температуры поверхности океана на фоне увеличения содержания хлорных и бромных газов и увеличение содержания озона в результате очищения от стратосферного аэрозоля и влияния изменчивости температуры поверхности океана и роста солнечной активности.

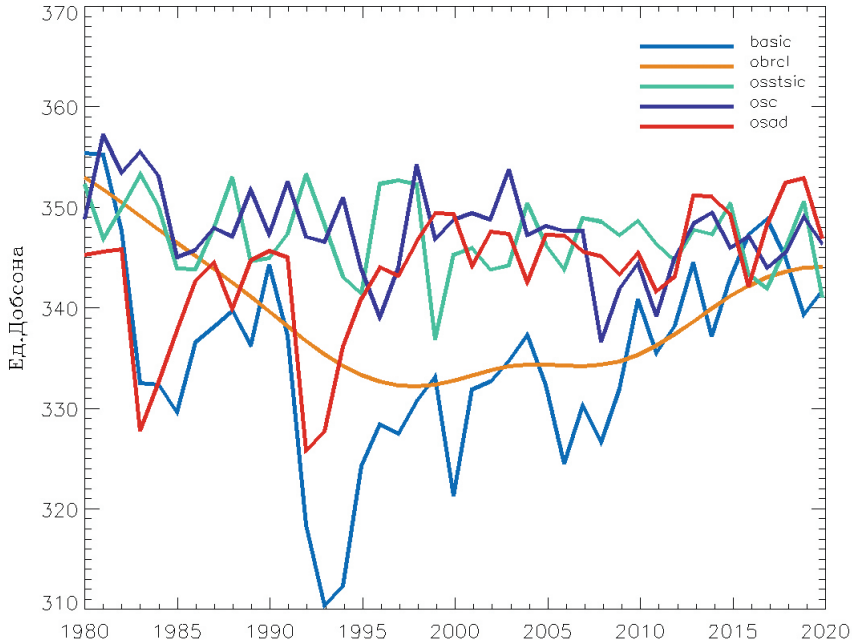

Рис. 2. Результаты экспериментов с ХКМ ИВМ РАН — РГГМУ
по исследованию чувствительности общего содержания озона
в средних широтах к изменчивости природных и антропогенных факторов.

basic — учитывалась все факторы, obrcl — только изменчивость потоков хлор- и бромсодержащих газов, osstsic — только изменчивость температуры поверхности океана и площадь его покрытия льдом, osc — только изменение солнечной активности, osad — только изменение концентрации стратосферного сульфатного аэрозоля.

Fig. 2. The results of the experiments with INM RAS – RSHU CCM
in the study of the sensitivity of total column ozone in mid-latitudes
to the variability of natural and anthropogenic factors.

basic — all factors were taken into account, obrcl — only the variability of chlorine and bromine gases emissions are taken into account, osstsic — only the variability of sea surface temperature and the area of its covering with ice take into account, osc — only the changes in solar activity are taken into account, osad— only the change of stratospheric sulphate aerosol take into account.

Модель РГГМУ с заданными динамическими параметрами из данных реанализа (МГС РГГМУ) использовалась для Арктики, чтобы проанализировать зимне-весенние периоды с наиболее низким по сравнению с другими годами содержанием озона: 1984—1985, 1996—1997, 2010—2011 и 2015—2016 гг. На основании анализа результатов наземных и спутниковых измерений общего содержания озона на антарктических и арктических станциях были выбраны годы с отличающейся от средней тенденции изменчивости содержания озона в сезонном ходе [26]. Для этих лет выполнялись расчеты изменения газового состава полярной атмосферы с использованием заданных по данным реанализа динамических

параметров (скорости ветра, температуры и влажности воздуха, приземного давления) в химико-транспортной модели нижней и средней атмосферы (ctm). В ходе проведения модельных расчетов использовались данные реанализа MERRA [47] и Era-Interim [48].

Как для одного, так и для другого набора данных реанализа модельные расчеты сезонной изменчивости содержания озона в целом демонстрировали хорошее соответствие данным наземных и спутниковых измерений, однако для отдельных дней при правильном качественном соответствии модельные расчеты недооценивали амплитуды наблюдаемых колебаний общего содержания озона. В целом результаты расчетов с использованием данных MERRA показали большее количество несоответствий результатам измерений, чем результаты моделирования с использованием данных Era-Interim, особенно в тропосфере. В этой связи для расчетов по исследованию чувствительности короткопериодных колебаний содержания полярного озона к изменчивости динамических и химических параметров использовались данные реанализа Era-Interim.

Анализ осуществлялся для периодов наилучшего совпадения результатов модельных расчетов и данных наземных и спутниковых измерений. При этом для разделения роли динамических и химических факторов выполнялись модельные расчеты по четырем сценариям. В первом, базовом сценарии (psc) рассматривалось влияние всех учитываемых в модели процессов на изменчивость содержания полярного озона в Северном и Южном полушарии [36]. Во втором сценарии (nopsc) в полярных районах не учитывались образование и эволюция полярных стратосферных облаков, однако принимались во внимание гетерогенные процессы на сульфатном аэрозоле [37]. В третьем сценарии (nopscaer) в полярной зоне не учитывались гетерогенные процессы и на полярных стратосферных облаках [38], и на поверхности сульфатного аэрозоля, однако рассматривались газофазные химические реакции [39]. Наконец, в четвертом сценарии (nochemall) в полярных районах в течение зимы и весны вообще не учитывались химические реакции разрушения озона.

Модельные расчеты позволили получить следующие результаты (рис. 3 и 4):

— в Арктике, так же как и в Антарктике, сравнение роли фотохимических и динамических факторов в периоды хорошего совпадения результатов моделирования и данных измерений, в частности во время кратковременных периодов значительного уменьшения содержания озона, показало, что учет динамических факторов даже без учета фотохимического разрушения позволяет качественно правильно описать наблюдаемое уменьшение содержания озона;

— в частности, весной 2011 г., когда наблюдалось максимальное за последние годы сокращение содержания озона в Арктике и Субарктике, модель без учета химического разрушения позволяет описать наблюдаемое на большинстве арктических станций уменьшение содержания озона, а добавление к рассмотрению фотохимических газофазных и гетерогенных процессов позволяет улучшить соответствие результатов измерений и моделирования, но в целом роль фотохимических факторов менее значима, чем роль динамических процессов, даже в периоды весеннего уменьшения содержания озона.

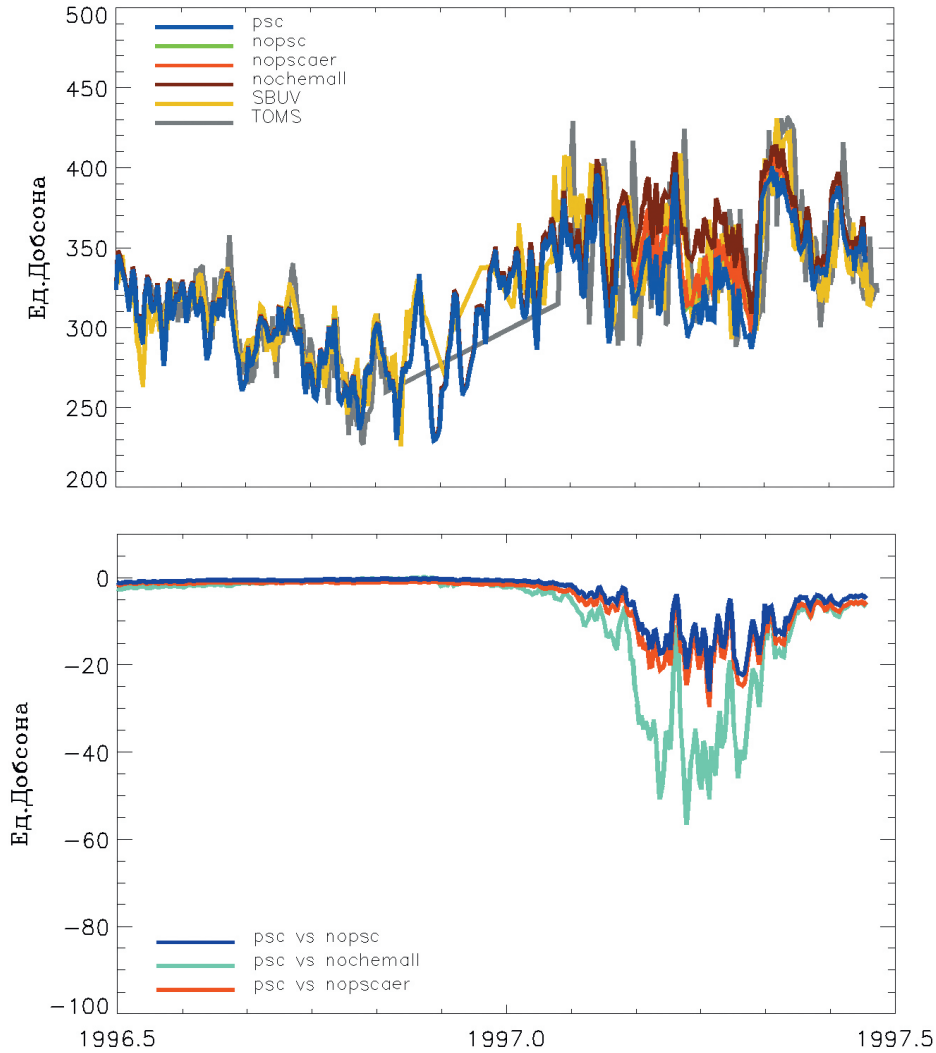

Рис. 3. Расчетное изменение общего содержания озона на арктической станции Печора (65,12° с.ш., 57, 1° в.д.) в 1996—1997 гг. по разным сценариям: с учетом процессов на полярных стратосферных облаках и сульфатном аэрозоле (psc), без учета ПСО (nopsc), без учета и ПСО, и аэрозоля (nopscaer), а также без учета химического разрушения озона вообще (nochemall) в сравнении с данными измерений со спутников TOMS и SBUV.

Fig. 3. The calculated change in total ozone at the Arctic station of Pechora in 1996 and 1997 for the scenarios, taking into account processes on polar stratospheric clouds and sulfate aerosol (psc), without regard to PSCs (nopsc), and without taking into account PSCs and aerosol (nopscaer) and without chemical destruction of ozone in general (nochemall) in comparison with TOMS and SBUV satellite measurements.

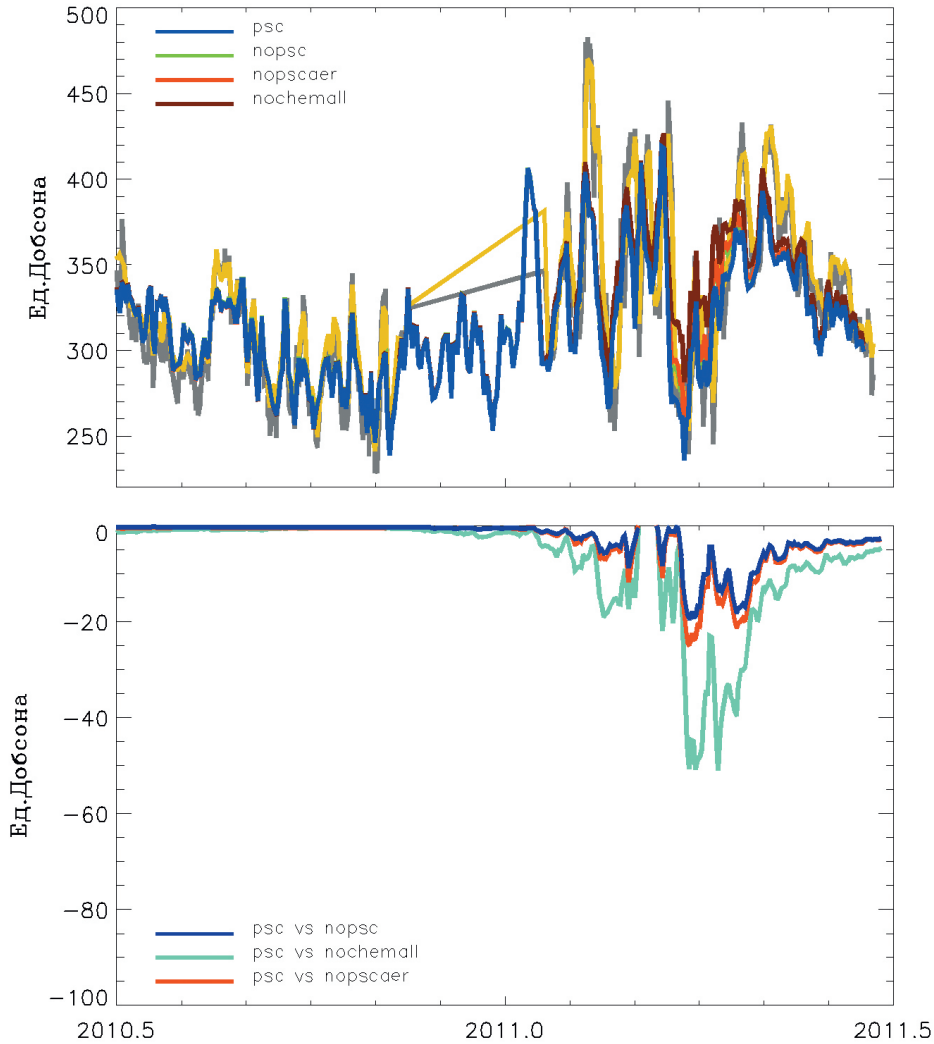

Рис. 4. Расчетное изменение общего содержания озона на арктической станции Печора в 2010—2011 гг. по сценариям с учетом процессов на полярных стратосферных облаках и сульфатном аэрозоле, без учета ПСО, без учета и ПСО и аэрозоля и без учета химического разрушения озона вообще в сравнении со спутниковыми измерениями TOMS и SBUV.

Fig. 4. Estimated change in total ozone content at the Pechora Arctic station in 2010-2011 according to scenarios taking into account processes on polar stratospheric clouds (PSCs) and sulfate aerosol, excluding PSCs, excluding both PSCs and aerosol, and excluding chemical destruction of ozone in general in comparison with satellite measurements of TOMS and SBUV.

Для моделирования распределения содержания парниковых газов CO_2, CH_4, N_2O и окиси углерода CO в нижней атмосфере в Евразии использовалась МГС Евразии. Горизонтальное разрешение модели составляет 0,5° широты на 0,5° долготы. По высоте модель охватывает тропосферу и нижнюю стратосферу в сигма-системе координат на основе давления с 22 уровнями. Модель является вложенной по отношению к глобальной МГС РГГМУ.

Модельная область охватывает всю Европу и Азию; максимальные граничные уровни составляют от 30 до 88° с.ш. и от 10° з.д. до 180° в.д. Базовым вариантом для изучения газового состава Российской Федерации является модельная область с границами от 45 до 80 °с.ш. и от 15 до 180 °в.д. При этом остальная часть основной модельной области играет роль буферной зоны, в которой в наибольшей степени ощущается влияние боковых граничных условий, устанавливаемых по результатам расчетов с глобальной моделью. Кроме того, из глобальной модели определяются начальные условия во всей модельной области и содержание газовых компонентов на верхней границе, которые обновляются каждые 15 дней.

Для проведения расчетов был выбран период в середине сентября 2019 г., для которого использовались результаты измерений отношения смеси трех атмосферных газов: CO, CO_2 и CH_4. Расчет фонового содержания атмосферных газов с использованием глобальной модели [10] осуществлялся до конца августа 2019 г., а затем, начиная с 1 сентября 2019 г., расчеты проводились с МГС Евразии, начальные и граничные условия для которой брались из результатов МГС РГГМУ на конец августа 2019 г.

Для моделирования переноса и химических превращений исследуемых газовых составляющих моделью ассимилировались метеорологические данные, включающие в себя скорость ветра, приземное давление, температуру и влажность воздуха из Global Forecast System (GFS) [49]. База GFS содержит оперативные данные, обновляемые каждые 6 часов в сроки 0, 6, 12 и 18 часов по всемирному времени [49]. Помимо текущих данных, представляющих собой результаты модельной ассимиляции результатов измерений, в базе GFS содержатся также прогностические данные на ближайшие 72 часа с периодичностью 6 часов. Таким образом, на основе данных GFS можно проводить диагностические исследования, используя текущие данные по результатам модельной ассимиляции, а также давать прогноз изменения газового и аэрозольного состава на ближайшие трое суток, который можно будет сравнивать с результатами измерений и делать выводы о влиянии антропогенных выбросов на газовый и аэрозольный состав атмосферы.

На рис. 5—8 приведено рассчитанное на модели распределение содержания исследуемых газов CO_2, CH_4, N_2O и CO на территории Евразии для 14 сентября 2019 г. Как видно из рис. 5, для углекислого газа характерно наличие зоны конвергенции в средней полосе России, где для следующих дней применялась технология автоматического обнаружения.

Похожая картина отмечается и для расчетного распределения метана в приземном слое атмосферы на европейской части России (рис. 6). Это говорит о преобладающем влиянии метеорологических факторов на формировании локальных особенностей изменчивости содержания исследуемых долгоживущих газов,

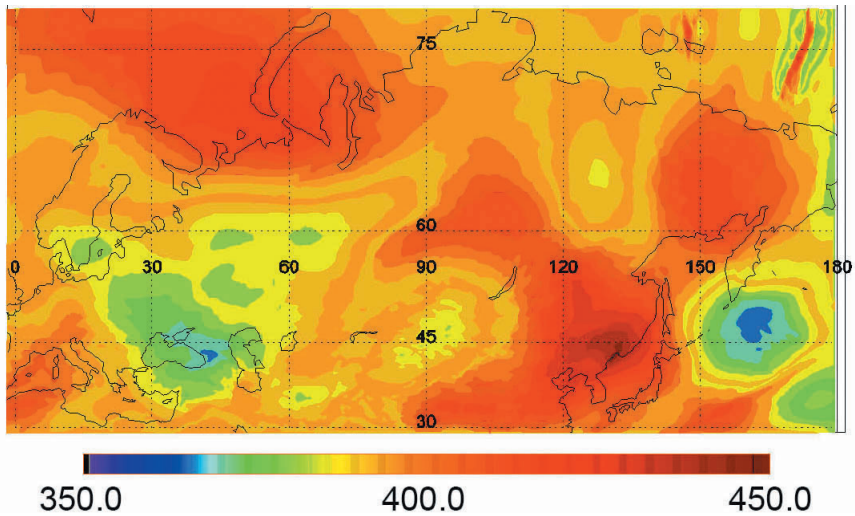

Рис. 5. Рассчитанное на МГС Евразии распределение содержания CO_2 (ppm) для 14 сентября 2019 г.

Fig. 5. Calculated for the CTM of Eurasia CO_2 distribution for September 14, 2019.

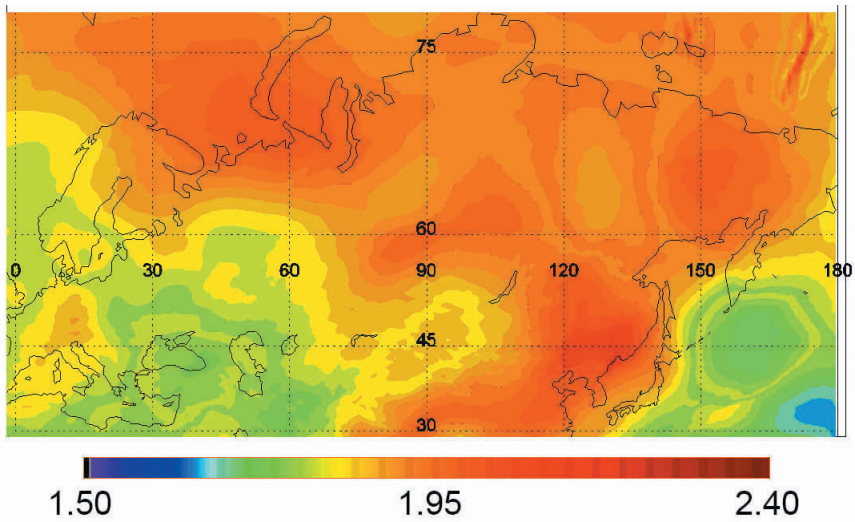

Рис. 6. Рассчитанное на модели фоновое распределение содержания CH_4 (ppm) для 14 сентября 2019 г.

Fig. 6. Model-based background distribution of CH_4 for September 14, 2019.

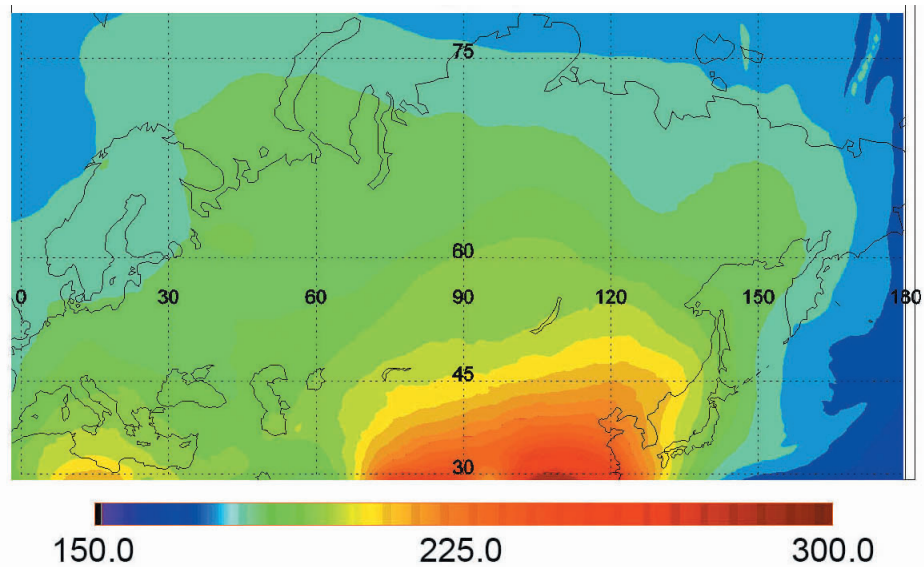

Рис. 7. Рассчитанное на модели распределение содержания CO (ppb) для 14 сентября 2019 г.

Fig. 7. Model-based CO distribution for September 14, 2019.

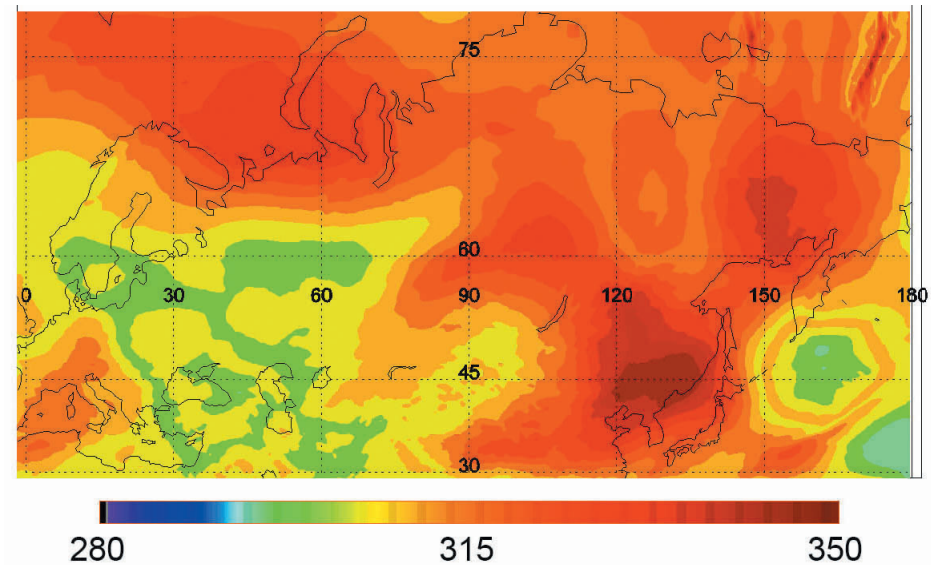

Рис. 8. Рассчитанное на модели фоновое распределение содержания N_2O (ppb) для 14 сентября 2019 г.

Fig. 8. Model-based background distribution of N_2O for September 14, 2019.

не имеющих или имеющих слабые внутриатмосферные источники, вблизи земной поверхности. Из рис. 7 видно, что для угарного газа (CO), который имеет внутриатмосферный источник, связанный с окислением метана и других углеводородов, картина распределения фоновых концентраций отличается от таковой для углекислого газа и метана.

Однако особенности распределения в приземном слое атмосферы на территории России закиси азота, которая также не имеет внутриатмосферных источников в нижней атмосфере, схожи с особенностями распределения углекислого газа и метана (рис. 8).

Выводы

В Российском государственном гидрометеорологическом университете создан комплекс численных моделей газового состава нижней и средней атмосферы, основанный на едином блоке моделирования химических превращений в атмосфере и разных способах использования метеорологических параметров, определяющих влияние атмосферного переноса на атмосферные газы.

Модели газового состава РГГМУ используются для исследования одновременного влияния природных и антропогенных факторов на изменение содержания стратосферного озона в разных широтных зонах в течение нескольких последних десятилетий, для оценки влияния динамических и фотохимических процессов на сезонную и межгодовую изменчивость озона и связанных с ним газов, а также для исследования особенностей изменения озона в полярных районах и оперативного анализа наблюдаемой изменчивости качества воздуха и ее прогноза на будущее. Численные эксперименты с моделями газового состава РГГМУ позволили определить относительную роль разных факторов в межгодовой изменчивости общего содержания озона в тропических, средних и полярных широтах и показать преобладающую роль динамических процессов в формировании зимне-весенних аномалий содержания озона в Арктике, а также важное влияние метеорологических условий на качество воздуха в Евразии.

Работа выполнена в Российском государственном гидрометеорологическом университете в рамках Государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, проект № FSZU-2020-0009.

The work was performed at the Russian State Hydrometeorological University as part of the state task of the Ministry of science and higher education of the Russian Federation, project No. FSZU-2020-0009.

Список литературы

1. *Smyshlyaev S.P., Dvortsov V.L., Geller M.A., Yudin V.A*. A two dimensional model with input parameters from a GCM: Ozone sensitivity to different formulation for the longitudinal temperature variation // J. Geophys. Res. 1998. V. 103. P. 28373—28387.
2. *Dvortsov V.L., Geller M.A., Yudin V., Smyshlyaev S.*. Parameterization of the convective transport in a two-dimensional chemistry-transport model and its validation with radon 222 and other tracer simulations // J. Geophys. Res. 1998. V. 103. P. 22047—22062.

3. *Smyshlyaev S.P., Geller M.A., Yudin V.A.* Sensitivity of model assessments of high-speed civil transport effects on stratospheric ozone resulting from uncertainties in the NO_X production from lightning // J. Geophys. Res.: Atmospheres. 1999. V. 104. No. D21. P. 26401—26417.
4. *Yudin, V.A., Smyshlyaev S.P., Geller M.A., Dvortsov V.* Transport diagnostics of GCMS and implications for 2D chemistry-transport model of troposphere and stratosphere 2000 // J. Atmos. Sci. V. 57. P. 673—699.
5. *De Zafra, R., Smyshlyaev S.* On the formation of HNO_3 in the Antarctic mid to upper stratosphere in winter // J. Geophys. Res. 2001. V. 106. P. 23115—23125б.
6. *Muscari G., de Zafra R., Smyshlyaev S.* Evolution of the NO_Y — N_2O correlation in the Antarctic stratosphere during 1993 and 1995 // J. Geophys. Res. 2003. V. 108, No. D14. 4428 10.1029/2002JD002871,
7. *Smyshlyaev S.P., Geller M.A.* Analysis of SAGE II observations using data assimilation by SUNY-SPB two-dimensional model and comparison to TOMS data // J. Geophys. Res. 2001. V. 106. P. 32327—32335.
8. *Geller M.A., Smyshlyaev S.P.* A Model Study of Total Ozone Evolution 1979—2000 — The Role of Individual Natural and Anthropogenic Effects // Geophys. Res. Let. 2002. 29(22), 2048,
9. WMO (World Meteorological Organization), Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2002, Global Ozone Research and Monitoring Project—Report No. 47. Geneva, 2003. 498 p.
10. WMO (World Meteorological Organization), Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2006, Global Ozone Research and Monitoring Project—Report No. 50. Geneva, Switzerland, 2007. 572 p.
11. *Andersen S.B., Austin J., Isaksen I., Pitari G., Smyshlyaev S.* et al. Comparison of recent modeled and observed trends in total column ozone // J. Geophys. Res. 2006. V. 111, No. D1, 4428 10.1029/2002JD002871.
12. *Sovde O.A., Gauss M., Smyshlyaev S., Isaksen I.* Evaluation of the chemical transport model OSLO CTM2 with focus on Arctic winter ozone depletion // J. Geophys. Res. 2008. V. 113. D093042.
13. *Галин В.Я., Володин Е.М., Смышляев С.П.* Модель общей циркуляции атмосферы ИВМ РАН с динамикой озона // Метеорология и гидрология. 2003. № 5. С. 13—23.
14. *Смышляев С.П., Галин В.Я., Володин Е.М.* Модельное исследование межгодовой изменчивости содержания атмосферного озона в средних широтах // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2004. Т. 40, № 2. С. 210—221.
15. *Галин В.Я., Смышляев С.П., Володин Е.М.* Совместная химико-климатическая модель атмосферы // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2007. Т. 43, № 4. С. 437—452.
16. *Dianskii N.A., Galin V.Ya., Gusev A.V., Volodin E.M., Iakovlev N.G., Smyshlyaev S.P.* The model of the Earth system developed at the INM RAS // Russian J. Numerical Analysis and Mathematical Modelling. 2010. V. 25, No. 5. C. 419—429.
17. *Смышляев С.П., Галин В.Я., Шаарийбуу Г., Моцаков М.А.* Моделирование изменчивости газовых и аэрозольных составляющих в стратосфере полярных районов // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2010. Т. 46, № 3. С. 291—306.
18. *Смышляев С.П., Мареев Е.А., Галин В.Я.* Моделирование влияния грозовой активности на газовый состав атмосферы // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2010. Т. 46, № 4. С. 487—504.
19. *Смышляев С.П., Мареев Е.А., Галин В.Я., Блакитная П.А.* Моделирование непрямых эффектов влияния грозовой активности на температуру атмосферы // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2013. Т. 49, № 5. С. 550.
20. *Смышляев С.П., Галин В.Я., Атласкин Е.М., Блакитная П.А.* Моделирование непрямого влияния одиннадцатилетнего цикла солнечной активности на газовый состав атмосферы // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2010. Т. 46, № 5. С. 672—684.
21. *Смышляев С.П., Галин В.Я., Блакитная П.А., Лемищенко А.К.* Исследование чувствительности состава и температуры стратосферы к вызванной 11-летним циклом солнечной активности изменчивости спектральных потоков солнечной радиации // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2016. Т. 52, № 1. С. 19.
22. *Sukhodolov T., Rozanov E., Ball W.T., Bais A., Tourpali K., Shapiro A.I., Telford P., Smyshlyaev S.* et al. Evaluation of simulated photolysis rates and their response to solar irradiance variability // J. Geophys. Res. 2016. V. 121, is. 10. P. 6066—6084.
23. *Smyshlyaev S.P., Galin V.Y., Blakitnaya P.A., Jakovlev A.R.* Numerical Modeling of the Natural and Manmade Factors Influencing Past and Current Changes in Polar, Mid-Latitude and Tropical Ozone // Atmosphere. 2020. V. 11. 76; doi:10.3390/atmos11010076.

24. *Смышляев С.П., Виролайнен Я.А., Моцаков М.А., Тимофеев Ю.М., Поберовский А.В., Поляков А.В.* Межгодовые и сезонные вариации содержания озона в разных высотных слоях атмосферы Санкт-Петербурга по данным наблюдений и численного моделирования // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2017. Т. 53, № 3. С. 343—359.
25. *Смышляев С.П., Погорельцев А.И., Галин В.Я., Дробашевская Е.А.* Влияние волновой активности на газовый состав стратосферы полярных районов // Геомагнетизм и аэрономия. 2016. Т. 56, № 1. С. 102—116.
26. *Timofeyev Y.M., Smyshlyaev S.P., Virolainen Y.A., Garkusha A.S., Polyakov A.V., Motsakov M.A., Kirner O.* Case study of ozone anomalies over northern Russia in the 2015/2016 winter: measurements and numerical modelling // Ann. Geophys. 2018. V. 36. P. 1495—1505.
27. *Virolainen Y.A., TimofeevY.M., Berezin I.A., Smyshlyaev S.P., Motsakov M.A., Kirner O.* Validation of Atmospheric Numerical Models Based on Satellite Measurements of Ozone Columns // Russian Meteorology and Hydrology. 2018. V. 43, Is. 3. P. 161—167. https://doi.org/10.3103/S1068373918030044.
28. *Virolainen Y.A., Timofeyev Y.M., Smyshlyaev S.P., Motsakov M.A., Kirner O.* Study of Ozone Layer Variability near St. Petersburg on the Basis of SBUV Satellite Measurements and Numerical Simulation (2000–2014) // Izvestiya. Atmospheric and Ocean Physics. 2017. V. 53, No. 9. P. 911—917. https://doi.org/10.1134/S0001433817090328.
29. *Яковлев А.Р., Смышляев С.П.* Влияние южной осцилляции на динамику стратосферы и озоновый слой Арктики // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2019. Т. 55, № 1. С. 98—113.
30. *Яковлев А.Р., Смышляев С.П.* Численное моделирование воздействия мирового океана на температуру и содержание озона в нижней и средней атмосфере // Метеорология и гидрология. 2019. № 9. С. 25—37.
31. *Чубарова Н.Е., Пастухова А.С., Галин В.Я., Смышляев С.П.* Многолетняя изменчивость УФ-радиации в московском регионе по данным измерений и моделирования // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2018. Т. 54, № 2. С. 160—167.
32. *Пастухова А.С., Чубарова Н.Е., Жданова Е.Ю., Галин В.Я., Смышляев С.П.* Численное моделирование изменения содержания озона, эритемной ультрафиолетовой радиации и УФ ресурсов над территорией северной Евразии в XXI веке // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2019. Т. 55, № 3. С. 20—28.
33. *Chubarova N.E., Pastukhova A.S., Zhdanova E.Y., Volpert E.V., Smyshlyaev S.P., Galin V.Y.* Effects of Ozone and Clouds on Temporal Variability of Surface UV Radiation and UV Resources over Northern Eurasia Derived from Measurements and Modeling // Atmosphere. 2020. V. 11. P. 59. doi: 10.3390/atmos11010059
34. *Luyang Xu, Ke Wei, Xue Wu, Smyshlyaev S.P., Wen Chen, Galin V.Ya.* The Effect of Super Volcanic Eruptions on Ozone Depletion in a Chemistry-Climate Model // Advances in Atmospheric Sciences. 2019. V. 36, Is. 8. P. 823—836, https://doi.org/10.1007/s00376-019-8241-8.
35. *Смышляев С.П., Мареев Е.А., Галин В.Я., Блакитная П.А.* Моделирование влияния выбросов метана из арктических газовых гидратов на региональные изменения состава нижней атмосферы // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2015. Т. 51, № 4. С. 472.
36. *Nerobelov G., Sedeeva M., Mahura A., Nuterman R., Mostamandi S., Smyshlyaev S.* Online integrated modeling on regional scale in North-West Russia: Evaluation of aerosols influence on meteorological parameters // Geography, Environment, Sustainability. 2018. V. 11 (2). P. 73 —83.
37. *Kurganskiy A, Skjøth C.A., Baklanov A., Sofiev M., Saarto A., Severova E., Smyshlyaev S., Kaas E.* // Atmospheric Chemistry and Physics. 2020. V. 20. P. 2099—2121. doi: 10.5194/acp-20-2099-2020.
38. *Эммануэль А.Б., Кнорре Р.Б.* Основы химической кинетики. М.: Наука, 1968. 413 с.
39. *Sander S.P., Abbatt J., Barker J.R., Burkholder J.B., Friedl R.R., Golden D.M., Huie R.E., Kolb C.E., Kurylo M.J., Moortgat G.K., Orkin V. L., Wine P.H.* Chemical kinetics and photochemical data for use in atmospheric studies. Evaluation 17. JPL Publication 10-6, Jet Propulsion Laboratory. Pasadena, 2011.
40. *Dvortsov V.L., Zvenigorodsky S.G., Smyshlyaev S.P.* On the use of Isaksen-Luther method of computing photodissociation rates in photochemical models // J. Geophys. Res. 1992. V. 97. P. 7593—7601.
41. *Дымников В.П., Лыкосов В.Н., Володин Е.М., Галин В.Я., Глазунов А.В., Грицун А.С., Дианский Н.А., Толстых М.А., Чавро А.И.* Моделирование климата и его изменений / В кн.: Современные проблемы вычислительной математики и математического моделирования. Т.2. М.: Наука, 2005. С. 38 —175.

42. WMO (World Meteorological Organization), Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2010, Global Ozone Research and Monitoring Project–Report No. 52. Geneva, Switzerland, 2011. 516 p.
43. *Moss R*. et al. The next generation of scenarios for climate change research and assessment // Nature. 2010. V. 463. P. 747—756.
44. *Guenther A., Karl T., Harley P., Wiedinmyer C., Palmer P.I., Geron C.* Estimates of global terrestrial isoprene emissions using MEGAN (Model of Emissions of Gases and Aerosols from Nature) // Atmos. Chem. Phys. 2006. V. 6. P. 3181—3210.
45. *Crippa M., Solazzo E., Huang G., Guizzardi, D., Koffi E., Muntean M., Schieberle C., Friedrich, R., Janssens-Maenhout G.* High resolution temporal profiles in the Emissions Database for Global Atmospheric Research // Sci. Data 7. 2020. 121.
46. *Dewolfe, W.A., Wilson, A., Lindholm, D.M., Pankratz, C.K., Snow, M.A., Woods, T.N.* Solar irradiance data products at the LASP interactive solar irradiance datacenter (LISIRD) // AGU Fall Meet. Abstr. 2010. 21. GC21B-0881.
47. *Rienecker M.M., Suarez M.J., Gelaro R., Todling R., Bacmeister J., Liu E., Bosilovich M.G., Schubert S.D., Takacs L., Kim G.-K., Bloom S., Chen J., Collins D., Conat A., da Silva A.* et al. MERRA: NASA's Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications // J. Climate. 2011. V. 24. P. 3624—3648, doi:10.1175/JCLI-D-11-00015.1
48. *Bauer P. Bechtold A.C. Beljaars M.* et al. The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system // Q.J.R. Meteorol. Soc. 2011. V. 137. P. 553—597.
49. Environmental Modeling Center: The GFS Atmospheric Model. NCEP Office Note 442, Global Climate and Weather Modeling Branch, EMC, Camp Springs, Maryland, 2003.

References

1. *Smyshlyaev S.P., Dvortsov V.L., Geller M.A., Yudin V.A.* A two dimensional model with input parameters from a GCM: Ozone sensitivity to different formulation for the longitudinal temperature variation. J. Geophys. Res., 1998, 103: 28373-28387
2. *Dvortsov V.L., Geller M.A., Yudin V., Smyshlyaev S.,* Parameterization of the convective transport in a two-dimensional chemistry-transport model and its validation with radon 222 and other tracer simulations. J. Geophys. Res. 1998, 103: 22047-22062.
3. *Smyshlyaev S.P., Geller M.A., Yudin V.A*. Sensitivity of model assessments of high-speed civil transport effects on stratospheric ozone resulting from uncertainties in the NO_X production from lightning. J. Geophys. Res.: Atmospheres. 1999, 104: 26401-26417.
4. *Yudin, V. A., Smyshlyaev S.P., Geller M. A., Dvortsov V.* Transport diagnostics of GCMS and implications for 2D chemistry-transport model of troposphere and stratosphere. J. Atmos. Sci.. 2000, 57: 673-699.
5. *De Zafra, R,. Smyshlyaev S.*, On the formation of HNO_3 in the Antarctic mid to upper stratosphere in winter. J. Geophys. Res., 106: 23115-23125.
6. *Muscari G., de Zafra R., Smyshlyaev S.* Evolution of the NO_Y – N_2O correlation in the Antarctic stratosphere during 1993 and 1995. J. Geophys. Res., 2003, 108: 4428. doi: 10.1029/2002JD002871.
7. *Smyshlyaev S.P., Geller M.A.* Analysis of SAGE II observations using data assimilation by SUNY-SPB two-dimensional model and comparison to TOMS data. J. Geophys. Res., 2001, 106: 32 327–32 335.
8. *Geller M.A., Smyshlyaev S.P.,* A Model Study of Total Ozone Evolution 1979-2000 – The Role of Individual Natural and Anthropogenic Effects. Geophys. Res. Letters. 2002, 29 (22): 2048.
9. WMO (World Meteorological Organization), Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2002, Global Ozone Research and Monitoring Project – Report No. 47. Geneva, 2003. 498 p.
10. WMO (World Meteorological Organization), Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2006, Global Ozone Research and Monitoring Project—Report No. 50. Geneva, 2007. 572 p.
11. *Andersen S.B., Austin J., Isaksen I., Pitari G., Smyshlyaev S.* et al. Comparison of recent modeled and observed trends in total column ozone. J. Geophys. Res. 2006, 111: 4428. doi: 10.1029/2002JD002871.
12. *Sovde O.A., Gauss M., Smyshlyaev S., Isaksen I.S.A.* Evaluation of the chemical transport model OSLO CTM2 with focus on Arctic winter ozone depletion. J. Geophys. Res., 2008. 113: D093042.
13. *Galin V.Ya., Volodin E.M., Smyshlyaev S.P.* Atmospheric general circulation model of INM RAS with ozone dynamics. Russian Meteorology and Hydrology. 2003, 5: 7-15.

14. *Smyshlyaev S.P., Galin V.Ya., Volodin E.M.* Simulation of the interannual variability of the total ozone content in the midlatitudinal atmosphere. Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics. 2004, 40 (2): 183-192.
15. *Galin V.Ya., Volodin E.M., Smyshlyaev S.P.* Combined chemistry-climate model of the atmosphere. Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics. 2007, 43 (4): 399-412.
16. *Dianskii N.A., Galin V.Ya., Gusev A.V., Volodin E.M., Iakovlev N.G., Smyshlyaev S.P.* The model of the Earth system developed at the INM RAS. Russian Journal of Numerical Analysis and Mathematical Modelling. 2010, 25 (5): 419-429.
17. *Smyshlyaev S.P., Shaariibuu G., Motsakov M.A., Galin V.Y.* Modeling the variability of gas and aerosol components in the stratosphere of polar regions. Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics. 2010, 46 (3): 265-280.
18. *Smyshlyaev S.P., Mareev E.A., Galin V.Y.* Simulation of the impact of thunderstorm activity on atmospheric gas composition. Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics. 2010, 46 (4): 451-467.
19. *Smyshlyaev S.P., Blakitnaya P.A., Mareev E.A., Galin V.Y.* Simulating indirect effects that thunderstorm activity has on atmospheric temperature. Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics. 2013, 49 (5): 504-518.
20. *Smyshlyaev S.P., Atlaskin E.M., Blakitnaya P.A., Galin V.Y.* Simulation of the indirect impact that the 11-year solar cycle has on the gas composition of the atmosphere. Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics. 2010, 46 (5): 623-634.
21. *Smyshlyaev S.P., Blakitnaya P.A., Lemishchenko A.K., Galin V.Y.* Analysis of the sensitivity of the composition and temperature of the stratosphere to the variability of spectral solar radiation fluxes induced by the 11-year cycle of solar activity. Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics. 2016, 52(1): 16-32.
22. *Sukhodolov T., Rozanov E., Ball W.T., Bais A., Tourpali K., Shapiro A.I., Telford P., Smyshlyaev S.* et al. Evaluation of simulated photolysis rates and their response to solar irradiance variability. J. Geophys. Res. 2016, 121(10): 6066–6084.
23. *Smyshlyaev S.P., Galin V. Y., Blakitnaya P.A. Jakovlev A.R.* Numerical Modeling of the Natural and Manmade Factors Influencing Past and Current Changes in Polar, Mid-Latitude and Tropical Ozone. Atmosphere. 2020, 11: 76. doi:10.3390/atmos11010076
24. *Smyshlyaev S.P., Motsakov M.A., Virolainen Y.A., Timofeev Y.M., Poberovskiy A.V., Polyakov A.V.* Interannual and seasonal variations in ozone in different atmospheric layers over St. Petersburg based on observational data and numerical modeling. Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics. 2017, 53 (3): 301-315.
25. *Smyshlyaev S.P., Pogoreltsev A.I., Drobashevskaya E.A., Galin V.Y.* Influence of wave activity on the composition of the polar stratosphere. Geomagnetism and Aeronomy. 2016, 56 (1): 95-109.
26. *Timofeyev Y. M., Smyshlyaev S.P., Virolainen Y.A., Garkusha A.S., Polyakov A.V., Motsakov M.A., Kirner O.* Case study of ozone anomalies over northern Russia in the 2015/2016 winter: measurements and numerical modelling. Ann. Geophys. 2018, 36: 1495-1505.
27. *Virolainen Y.A., TimofeevY.M., Berezin I.A., Smyshlyaev S.P., Motsakov M.A., Kirner O.* Validation of Atmospheric Numerical Models Based on Satellite Measurements of Ozone Columns. Russian Meteorology and Hydrology. 2018, 43 (3): 161–167. doi: 10.3103/S1068373918030044.
28. *Virolainen Y.A., Timofeyev Y.M., Smyshlyaev S.P., Motsakov M.A., Kirner O.* Study of Ozone Layer Variability near St. Petersburg on the Basis of SBUV Satellite Measurements and Numerical Simulation (2000–2014). Izvestiya. Atmospheric and Ocean Physics. 2017, 53 (9): 911–917. doi: 10.1134/S0001433817090328.
29. *Jakovlev A.R., Smyshlyaev S.P.* Imact of the southern oscillation on arctic stratospheric dynamics and ozone layer. Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics. 2019, 55 (1): 86-98.
30. *Jakovlev A.R., Smyshlyaev S.P.* Numerical simulation of world ocean effects on temperature and ozone in the lower and middle atmosphere. Russian Meteorology and Hydrology. 2019, 44 (9): 594-602.
31. *Chubarova N.E., Pastukhova A.S., Galin V.Y., Smyshlyaev S.P.* Long-term variability of UV irradiance in the moscow region according to measurement and modeling data. Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics. 2018, 54 (2): 139-146.
32. *Pastukhova A.S., Chubarova N.E., Zhdanova Y.Y., Galin V.Y., Smyshlyaev S.P.* Numerical simulation of variations in ozone content, erythemal ultraviolet radiation, and ultraviolet resources over northern eurasia in the 21st century. Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics. 2019, 55 (3): 242-250.

33. *Chubarova N.E., Pastukhova A.S., Zhdanova E.Y., Volpert E.V., Smyshlyaev S.P., Galin V.Y.* Effects of Ozone and Clouds on Temporal Variability of Surface UV Radiation and UV Resources over Northern Eurasia Derived from Measurements and Modeling. Atmosphere. 2020, 11: 59. doi: 10.3390/atmos11010059
34. *Luyang Xu, Ke Wei, Xue Wu, Smyshlyaev S. P., Wen Chen, Galin V. Ya.,* The Effect of Super Volcanic Eruptions on Ozone Depletion in a Chemistry-Climate Model. Advances in Atmospheric Sciences. 2019, 36 (8): 823–836. doi: 10.1007/s00376-019-8241-8;
35. *Smyshlyaev S.P., Blakitnaya P.A., Mareev E.A., Galin V.Y.* Modeling the influence of methane emissions from arctic gas hydrates on regional variations in composition of the lower atmosphere. Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics. 2015, 51 (4): 412-422.
36. *Nerobelov, G., Sedeeva, M., Mahura, A., Nuterman R., Mostamandi, S., Smyshlyaev, S.* Online integrated modeling on regional scale in North-West Russia: Evaluation of aerosols influence on meteorological parameters. Geography, Environment, Sustainability. 2018, 11 (2):73-83.
37. *Kurganskiy A, Skjøth C.A., Baklanov A., Sofiev M., Saarto A., Severova E., Smyshlyaev S., Kaas E.* Atmospheric chemistry and physics. 2020, 20: 2099–2121. doi: 10.5194/acp-20-2099-2020.
38. *Emmanuel A.B., Knorre R.B. Osnovy ximicheskoj kinetiki.* Fundamentals of chemical kinetics. Moscow: Nauka. 1968. 413 p. [In Russian].
39. *Sander S.P., Abbatt J., Barker J.R., Burkholder J.B., Friedl R.R., Golden D.M., Huie R.E., Kolb C.E., Kurylo M.J., Moortgat G.K., Orkin V. L., Wine P.H.* Chemical kinetics and photochemical data for use in atmospheric studies. Evaluation 17. JPL Publication 10-6, Jet Propulsion Laboratory. Pasadena, 2011.
40. *Dvortsov V.L., Zvenigorodsky S.G., Smyshlyaev S.P.* On the use of Isaksen-Luther method of computing photodissociation rates in photochemical models. J. Geophys. Res. 1992, 97: 7593-7601.
41. *Dymnikov V.P., Lyikosov V.N., Volodin E.M., Galin V.Ya., Glazunov A.V., Gritsun A.S., Dianskiy N.A., Tolstyih M.A., Chavro A.I. Modelirovanie klimata i ego izmeneniy. Sovremennyie problemyi vyichislitelnoy matematiki i matematicheskogo modelirovaniya*. Modeling the climate and its changes. Modern problems of computational mathematics and mathematical modeling. V. 2. Moscow: Nauka, 2005, 38-175. [In Russian].
42. WMO (World Meteorological Organization), Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2010, Global Ozone Research and Monitoring Project–Report No. 52. Geneva, 2011. 516 p.
43. *Moss R.* et al. The next generation of scenarios for climate change research and assessment. Nature. 2010, 463: 747-756.
44. *Guenther A., Karl T., Harley P., Wiedinmyer C., Palmer P.I., Geron C.* Estimates of global terrestrial isoprene emissions using MEGAN (Model of Emissions of Gases and Aerosols from Nature). Atmos. Chem. Phys. 2006, 6: 3181–3210.
45. *Crippa, M., Solazzo, E., Huang, G., Guizzardi, D., Koffi, E., Muntean, M., Schieberle, C., Friedrich, R., Janssens-Maenhout, G.* High resolution temporal profiles in the Emissions Database for Global Atmospheric Research. Sci. Data. 2020, 7, 121.
46. *Dewolfe, W.A.; Wilson, A.; Lindholm, D.M.; Pankratz, C.K.; Snow, M.A.; Woods, T.N.* Solar irradiance data products at the LASP interactive solar irradiance datacenter (LISIRD). AGU Fall Meet. Abstr. 2010, 21. GC21B-0881.
47. *Rienecker M.M., Suarez M.J., Gelaro R., Todling R., Bacmeister J., Liu E., Bosilovich M.G., Schubert S.D., Takacs L., Kim G.-K., Bloom S., Chen J., Collins D., Conat A., da Silva A.* et al. MERRA: NASA's Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications**.** J. Climate. 2011, 24: 3624-3648. doi:10.1175/JCLI-D-11-00015.1
48. *Bauer, P. Bechtold A.C. Beljaars M., et al.,* The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system. Q. J. R. Meteorol. Soc. 2011, 137: 553–597.
49. Environmental Modeling Center. The GFS Atmospheric Model. NCEP Office Note 442, Global Climate and Weather Modeling Branch, EMC, Camp Springs, Maryland, 2003.

Конфликт интересов: конфликт интересов отсутствует.

Статья поступила 23.08.2020
Принята к публикации 15.09.2020

Сведения об авторах

Смышляев Сергей Павлович, д-р физ.-мат. наук, профессор кафедры метеопрогнозов Российского государственного гидрометеорологического университета, smyshl@rshu.ru

Блакитная Полина Александровна, канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник департамента науки, технологий и инноваций Российского государственного гидрометеорологического университета, pzim@rshu.ru

Моцаков Максим Анатольевич, канд. физ.-мат. наук, заведующий лабораторией кафедры метеопрогнозов Российского государственного гидрометеорологического университета, maxim.motsakov@mail.ru

Яковлев Андрей Романович, младший научный сотрудник департамента науки, технологий и инноваций Российского государственного гидрометеорологического университета, endrusj@rambler.ru

Черепова Мария Васильевна, младший научный сотрудник департамента науки, технологий и инноваций Российского государственного гидрометеорологического университета, mariacherepova@yandex.ru

Information about authors

Sergei P. Smyshlyaev, Grand PhD (Phys. and Math. Sci.), full professor of the meteoforecast department of the Russian State Hydrometeorological University

Polina A. Blanitnaya, PhD (Phys. and Math. Sci.), senior researcher of the department of the science, technology and innovations of the Russian State Hydrometeorologival University

Maxim A. Motsakov, PhD (Phys. and Math. Sci.), head of laboratory of the meteoforecast department of the Russian State Hydrometeorological University

Andrei R. Jakovlev, junior researcher of the department of the science, technology and innovations of the Russian State Hydrometeorologival University

Maria V. Cherepova, junior researcher of the department of the science, technology and innovations of the Russian State Hydrometeorologival University