

УДК 551.510.4, 551.501.8, 551.521.3, 535.338.4

РОССИЙСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В ОБЛАСТИ АТМОСФЕРНОЙ РАДИАЦИИ В 2019–2022 гг.

© 2023 г. Ю. М. Тимофеев^а, В. П. Будаков^б, Я. А. Виролайнен^{а, *}, Т. Б. Журавлева^с,
И. В. Пташник^с, А. Б. Успенский^д, Н. Н. Филиппов^а, Н. Е. Чубарова^е

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

^бНациональный исследовательский университет “МЭИ”, ул. Красноказарменная, 14, стр. 1, Москва, 111250 Россия

^сИнститут оптики атмосферы им. В.Е. Зуева Сибирского отделения Российской академии наук,
пл. Академика Зуева, 1, Томск, 634055 Россия

^дНаучно-исследовательский центр космической гидрометеорологии “Планета”,
Б. Предтеченский пер., 7, Москва, 123242 Россия

^еМосковский государственный университет им. М.В. Ломоносова, ГСП-1,
Ленинские горы, 1, стр. 2, Москва, 119991 Россия

*e-mail: yana.virolainen@spbu.ru

Поступила в редакцию 01.09.2023 г.

После доработки 09.11.2023 г.

Принята к публикации 15.11.2023 г.

Рассмотрены основные результаты научных исследований и разработок в области атмосферной радиации за период 2019–2022 гг. в Российской Федерации. Основное внимание уделено исследованиям в области теории переноса излучения, атмосферной спектроскопии, радиационной климатологии, аэрозоля и радиационного форсинга, дистанционного зондирования атмосферы и поверхности, интерпретации спутниковых измерений. Приведены списки основных публикаций в указанных областях за этот период.

Ключевые слова: теория переноса излучения, атмосферная спектроскопия, радиационная климатология, дистанционное зондирование атмосферы

DOI: 10.31857/S000235152307012X, **EDN:** CZEGHN

ВВЕДЕНИЕ

Излучение в атмосфере Земли (солнечное и собственное атмосферы и поверхности) играет важную роль в формировании погоды и климата планеты. Это излучение определяет многочисленные процессы формирования радиационного баланса Земли, процессы динамики атмосферы, фотохимии, облакообразования и т. д. Это же излучение играет важную роль в получении информации о многочисленных физических, химических, динамических и других параметрах атмосферы и поверхности Земли.

Краткий обзор, подготовленный Российской комиссией по атмосферной радиации, содержит наиболее значимые результаты работ в области исследований атмосферной радиации, выполненных в 2019–2022 гг. Он является частью Национального отчета России по метеорологии и атмосферным наукам, подготовленного для Международной ассоциации по метеорологии и атмосферным наукам (IAMAS). За истекший период Российская комиссия по атмосферной ра-

диации совместно с заинтересованными ведомствами и организациями провела два Международных симпозиума “Атмосферная радиация и динамика” (МСАРД-2019, МСАРД-2021), на которых обсуждались актуальные проблемы современной физики атмосферы – перенос излучения и атмосферная оптика, парниковые газы, облака и аэрозоли, наземные и спутниковые дистанционные методы измерений, новые данные наблюдений. В настоящем обзоре представлено пять направлений, охватывающих весь спектр исследований, проводимых в области атмосферной радиации.

1. Теория переноса излучения.
2. Атмосферная спектроскопия.
3. Аэрозоль, радиационный форсинг, радиационная климатология.
4. Дистанционное зондирование атмосферы.
5. Интерпретация спутниковых измерений.

1. ТЕОРИЯ ПЕРЕНОСА ИЗЛУЧЕНИЯ

В ИОА СО РАН разработано два новых алгоритма метода Монте-Карло, предназначенных для вычислений спектральных потоков и полей яркости теплового излучения с учетом сферичности атмосферы и 3D-эффектов облаков [Zhuravleva et al., 2019]. Алгоритмы отличаются способами учета молекулярного поглощения (метод k -распределений и метод рандомизации); реализации облачных полей моделируются на основе пуассоновской модели разорванной облачности. Алгоритмы позволяют рассчитать характеристики излучения в неоднородной атмосфере с учетом сферичности атмосферы при меньших вычислительных затратах, чем в методе k -распределения. Пуассоновская модель разорванных облаков обеспечивает эффективное моделирование множества различных мезомасштабных облачных полей, что позволяет идентифицировать 3D-эффекты облаков на исходящее излучение в верхней части атмосферы как функции конфигурации облаков и оптических характеристик в различных спектральных интервалах.

Осуществлено статистическое моделирование интенсивности пропущенного солнечного излучения в присутствии оптически тонких перистых облаков для двух геометрических схем зондирования, реализованных в фотометрической сети AERONET [Zhuravleva, 2021]. Численные эксперименты выполнены с использованием моделей кристаллической облачности: модели OPAC (гексагональные частицы с гладкой поверхностью) и модели группы авторов в составе Baum V.A., Yang P., Neumysfield A.J. и др. (смесь частиц разной формы, гексагональные столбики и агрегаты из гексагональных столбиков с сильно шероховатой поверхностью). Выявлено, что отсутствие пиков яркости в зонах возможного появления гало не означает отсутствие на небосводе перистой облачности, поскольку в присутствии сильно шероховатых гексагональных частиц угловая структура радиационного поля описывается гладкой функцией угла рассеяния. Анализ влияния микроструктуры кристаллической облачности на усредненные по множеству облачных реализаций альбедо и диффузное пропускание показал [Zhuravleva, 2021], что среднее значение неопределенности, обусловленное отсутствием информации о форме и размерах частиц, находится в пределах ~2%. Эта величина сопоставима с влиянием эффектов случайной геометрии облаков в оптически тонкой облачности, тогда как по мере увеличения оптической плотности диффузное пропускание может быть занижено более чем на 10%.

Разработан оригинальный алгоритм [Zhuravleva, 2021, 2021a] статистического моделирования переноса солнечного излучения в присутствии кристаллических облаков, оптически анизотропных относительно зенитного угла падающего излучения. Выполнено тестирование программно-алго-

ритмического обеспечения; результаты численных экспериментов свидетельствуют о том, что при моделировании переноса излучения с использованием предложенного алгоритма свойства оптической анизотропии среды учитываются адекватно.

В работе [Firsov et al., 2021] разработана широкополосная модель для переноса коротковолнового солнечного излучения в атмосфере Земли. Модель основана на параметризации функций пропускания излучения с использованием современной спектроскопической информации в виде коротких экспоненциальных рядов, что позволяет применить стандартный метод дискретных ординат к решению уравнения переноса излучения для каждой экспоненциальной составляющей.

В статье [Fomin, 2021] представлен прямой метод расчета (LBL) для быстрого вычисления компактных и точных таблиц спектрального поиска (LUT) для моделей переноса излучения LBL. Ключевой особенностью этого метода является получение и использование эффективных сеток с неоднородными волновыми числами для интерполяции профиля линии с заданной точностью.

Работа [Svetsov et al., 2019] посвящена решению системы уравнений переноса излучения совместно с уравнениями газовой динамики. Использовалось приближение радиационной теплопроводности или, если оптическая глубина Росселанда излучающего объема газа и пара была меньше единицы, приближение объемного излучения. Разработанный алгоритм применен для численного моделирования столкновений кометных тел диаметром 0.3, 1 и 3 км, которые входят в атмосферу под различными углами.

Целью работы [Soldatenko et al., 2021] являлось изучение влияния неопределенностей в радиационных обратных связях и инерции климатической системы на спектр мощности колебаний глобальной средней температуры поверхности (Global Mean Surface Temperature, GMST). Было показано, что в высокочастотном диапазоне спектра мощности колебаний GMST влияние инерции климатической системы более значительно, чем влияние обратных связей. В низкочастотном диапазоне, напротив, влияние обратных связей на спектр мощности превышает влияние климатической инерции.

В статье [Chesnokova et al., 2019] моделируются восходящий и нисходящий потоки солнечного и теплового излучения для метеорологических условий, типичных для лета в средних широтах. Оценен баланс атмосферной радиации, обусловленный перистыми облаками разной глубины, и чувствительность радиационного воздействия к различным моделям сплошного поглощения водяного пара.

В работе [Timofeev et al., 2020], основываясь на анализе уравнения переноса излучения в интегральной форме, исследуются причины измене-

ний исходящего теплового излучения Земли (Outgoing Thermal Radiation, OTR) при увеличении содержания CO_2 в атмосфере.

В исследовании [Kuchma et al., 2020] рассмотрена задача атмосферной коррекции коротковолновых каналов многоспектрального сканирующего радиометра низкого разрешения на борту спутника “Метеор-М № 2”. Предложен алгоритм атмосферной коррекции на основе специальных таблиц поиска, сгенерированных авторами. Проверка показала высокую корреляцию с эталонным коэффициентом отражения, полученным с сайтов проверки альbedo поверхности портала EUMETSAT.

В [Silant'ev et al., 2021] получено уравнение переноса излучения для всех стоковых параметров непрерывного излучения в атмосфере в однородном магнитном поле. Явные формулы для поперечных сечений и фазовых сдвигов даны с учетом эффектов поглощения. Представленная теория справедлива для магнитных полей не более 1010 Гс. В общем случае магнитное поле состоит из среднего значения и хаотической части. Система уравнений переноса для четырех усредненных параметров Стокса, I , Q , U и V , распадается на две независимые системы - для параметров I , Q и V , U .

В работе [Balugin et al., 2022] представлен метод оценки воздействия стратосферного аэрозоля на радиационный баланс стратосферы по данным аэростатного зондирования оптическим зондом обратного рассеяния аэрозоля. Методика оценки основана на использовании радиационной (line-by-line и Монте-Карло) модели переноса солнечной радиации.

В статье [Fomin et al., 2019] обсуждаются изменения в расчетах line-by-line спектров инфракрасного излучения, которые происходят при замене спектроскопической базы данных HITRAN-2012 на HITRAN-2016 и контура Фойгта на контур Хартмана-Трана.

В исследовании [Chernenkov et al., 2021] выполнена оценка концентрации сажи в снегу на основе балансовой модели снежного слоя и модели переноса излучения SNICAR. Вычисляется альbedo снега и радиационное воздействие от потемнения снега при различной концентрации сажи.

В работе [Dombrovsky et al., 2020] предложена модель распространения вирусов воздушно-капельным путем внутри микрокапель воды. Построена модель вирусного облака с учетом различных механизмов, таких как эффект солнечного облучения, динамическая релаксация движущихся капель в окружающем воздухе и гравитационное осаждение капель. Максимальная оценка спектрального потока излучения в случае безоблачного неба показала, что вклад излучения в испарение отдельных капель воды незначителен.

В статье [del Águila et al., 2020] описан метод ускорения моделей расчета гиперспектрального

переноса излучения, основанный на кластеризации спектральных излучений, вычисленных с помощью малопотоковой модели переноса и регрессионного анализа, выполненного для малопотоковой и многопотоковой моделей внутри каждого кластера. Этот подход, который мы называем методом кластерной регрессии низких потоков (Cluster Low-Streams Regression, CLSR), применяется для вычисления спектров излучения в А-диапазоне O_2 при 760 нм и CO_2 -диапазоне при 1610 нм для пяти атмосферных сценариев. Метод CLSR сравнивается с моделью переноса на основе анализа основных компонентов (Principal Component Analysis, PCA), демонстрируя улучшение по точности и вычислительной производительности.

В работе [Zhuravleva, 2021] представлен оригинальный алгоритм статистического моделирования переноса солнечного излучения в присутствии облаков из кристаллов льда, оптически анизотропных по отношению к зенитному углу падающего излучения. Численные эксперименты показали, что при использовании предложенного алгоритма при моделировании переноса излучения наиболее адекватно учитываются свойства оптически анизотропной среды.

В работах [Kataev et al., 2019, 2021, 2022] анализируются алгоритмы обработки изображения, полученные с борта беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), в режиме реального времени для оптического дистанционного зондирования поверхности земли. Применение аналога вегетационного индекса позволяет выделить на RGB изображении растения, что увеличивает вероятность правильного распознавания типов поверхности (растений). Рассматриваются методики предварительной и тематической обработки изображений, необходимой для уверенного распознавания типов поверхности.

Проведен анализ [Belov et al., 2019] эффективности оптического (фото и радиометрического) метода обнаружения нефтяных загрязнений, основанного на различии в отражательных характеристиках чистой и загрязненной нефтью водных поверхностей, при выборе длины волны зондирования в УФ, видимом, ближнем и среднем ИК диапазонах спектра.

В [Belov et al., 2019] рассмотрены результаты экспериментов с подводными бистатистическими оптико-электронными системами связи, в которых источником информации и полезным сигналом является рассеянное лазерное излучение. В полевых условиях получены дальности передачи информации до 40 м в озерной воде.

Статья [Burenkov et al., 2019] посвящена оценке погрешности определения показателя ослабления света морской водой методом Монте-Карло. Как правило, измерения показателя ослабления проводятся при небольшой базе прибора в достаточно прозрачных водах. Однако на практи-

ке встречаются случаи очень мутных вод (придонные нефелоидные слои), где погрешности измерения показателя ослабления существенно возрастают из-за многократного рассеяния в пределах базы прибора. Оценки таких погрешностей и рассматриваются в настоящей работе. Наиболее подробно рассмотрено влияние индикатрисы рассеяния на рассматриваемые погрешности. Кроме того, изучено влияние на погрешности измерения показателя ослабления длины базы прибора и угла зрения приемной системы.

В [del Águila et al., 2019, 2021] для улучшения эффективности алгоритма обработки гиперспектральных данных были проанализированы методы снижения размерности применительно к гиперспектральному дистанционному зондированию атмосферы. При снижении размерности происходит исключение из данных избыточной информации, и в настоящее время снижение размерности является неотъемлемой частью высокопроизводительных моделей переноса излучения.

В работе [Afanas'ev et al., 2019] проводится сравнительный анализ методов решения уравнения переноса для излучения и частиц. Физическая модель светового поля эквивалентна теории распространения пучков элементарных частиц в приближении классической механики. На сегодня особенно важно, что точность экспериментов в физике частиц близка к предельной, что позволяет проверять многие соотношения теории светового поля в мутной среде, где пока подобная точность недостижима. Проведено сравнение результатов расчетов с экспериментальными данными по угловым распределениям электронов, упруго отраженных от двуслойных твердотельных мишеней.

Работа [Efremenko, 2021] посвящена применению искусственных нейронных сетей для параметризации вычислительно трудоемких моделей переноса излучения (МПИ) в задачах дистанционного зондирования атмосферы. Хотя прямое замещение МПИ нейронными сетями может приводить к многократному повышению производительности, такой подход имеет определенные недостатки, такие как потеря общности, проблемы с устойчивостью и т.д. При этом нейронная сеть обычно обучается для конкретного приложения, например, для заранее определенных атмосферных сценариев и заданного спектрометра. В данной работе рассматривается новая концепция нейросетевых МПИ, в которой нейронная сеть заменяет не всю модель целиком, а только ее часть (алгоритм расчета собственных значений), тем самым сокращая общее время вычислений при сохранении общности МПИ. Из обучения исключаются зависимости от геометрии наблюдения и оптической толщины среды.

Статья [Chuprov et al., 2022] посвящена сравнению эффективности метода разложения по сингулярным числам (singular value decomposition,

SVD) и решателей обыкновенных дифференциальных уравнений (ОДУ) для нахождения матрицы отражения. Матрица отражения может находиться путем решения одномерного уравнения переноса излучения. Данное решение на основе метода дискретных ординат приводит к методу SVD. Альтернативный подход состоит в преобразовании исходной задачи в матричное уравнение Риккати, написанное специально для матрицы отражения и решаемое методами численного интегрирования ОДУ. Обнаружено, что для однослойного случая метод SVD на порядок быстрее решателей ОДУ, но по мере роста числа слоев решатели ОДУ становятся эффективнее метода SVD. Они эффективнее и при непрерывном изменении оптических свойств среды с глубиной.

В работе [Afanas'ev et al., 2020] анализируется современное состояние дискретной теории переноса излучения. Рассмотрены одномерная, трехмерная и стохастическая модели переноса излучения. Показано, что дискретная теория дает единственное решение одномерного уравнения переноса излучения. Все приближенные методы решения, основанные на формализме дискретных ординат, могут быть получены на основе синтетических итераций, малоугловой аппроксимации и метода матричных операторов. Намечены возможные направления перспективного развития переноса излучения.

2. АТМОСФЕРНАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ

Работа по данной тематике в основном велась по двум направлениям: исследование характеристик спектральных линий и полос и исследование континуального поглощения. Для моделирования атмосферного радиационного переноса и дистанционного мониторинга содержания парниковых и загрязняющих атмосферу газов требуется высокоточная информация по линиям поглощения атмосферных газов. Цикл работ по теоретическому исследованию линий полосы ν_6 CH_3I был проведен в СПбГУ совместно с ИОА им. В.Е. Зуева СО РАН и Университетом Франш-Конте (Безансон, Франция). Интерес к спектроскопическим параметрам линий йодистого метила резко возрос за последние несколько лет из-за его экологической значимости (источник атомов йода, разрушающих озоновый слой). Были рассчитаны коэффициенты самоуширения CH_3I , включая их температурную зависимость [Troitsyna et al., 2020], коэффициенты уширения азотом [Troitsyna et al., 2021a], кислородом и воздухом [Troitsyna et al., 2021b]. Лабораторные исследования, представленные коллективом авторов ИОА СО РАН, включают в себя измерения на Фурье-спектрометре Bruker и на единственном в России спектрометре внутрирезонаторного затухания. Получена новая информация о спектрах поглощения C_2H_2 , O_3 , CF_4 , CO , CH_3I , NO_2 , N_2O , HCl , H_2S , чем

внесен значительный вклад в обновление популярных спектроскопических баз данных HITRAN и GEISA [Сердюков и др., 2022; Dudaryonok et al., 2022a,b; Jacquemart et al., 2022; Lavrentieva et al., 2022; Sinita et al., 2022; Vasilchenko et al., 2022a, 2022b]. Продолжается разработка комплекса низкотемпературных кювет, с помощью которых возможно моделирование газовых сред, в том числе смесей парниковых газов, в условиях верхних слоев атмосферы [Сердюков и др., 2020; Сеница и др., 2020].

Проведен анализ влияния спектроскопической информации в современных базах данных по линиям поглощения CH_4 , CO и H_2O на определение общего содержания (ОС) метана, монооксида углерода и водяного пара в столбе атмосферы из спектров прямого солнечного излучения, измеренных наземными Фурье-спектрометрами, расположенными на станциях в Санкт-Петербурге и Коровке, в среднем и ближнем ИК диапазонах [Чеснокова и др., 2019; Chesnokova et al., 2020a, 2020b]. Обнаружено, что различия в ОС CH_4 , CO и H_2O за счет использования различных версий баз данных HITRAN, GEISA, ATM могут достигать 4% и более. Для выработки стратегий восстановления содержания CO и CH_4 , применяемых в международных сетях мониторинга парниковых газов NDACC и TCCON, получены рекомендации по применению спектроскопических баз данных в задачах дистанционного зондирования, что позволяет повысить точность определения ОС.

В области $5900\text{--}6100\text{ см}^{-1}$ на Фурье-спектрометре Bruker IFS 125 HR в ИОА СО РАН зарегистрированы лабораторные спектры поглощения водяного пара, уширенные давлением атмосферного воздуха, и определены параметры линий поглощения H_2O [Дейчули и др., 2021] для контуров линий Фойгта и модифицированного профиля Фойгта, учитывающего зависимость уширения от скоростей сталкивающихся молекул. Показано, что использование новых значений параметров линий поглощения H_2O позволяет улучшить согласие между модельными и измеренными атмосферными спектрами по сравнению с моделированием, использующим известные спектроскопические базы данных HITRAN и GEISA, что ведет к повышению качества решения обратной задачи определения содержания газов в атмосфере.

Разработана широкополосная модель [Фирсов и др., 2021] для расчета переноса излучения в атмосфере Земли в солнечном коротковолновом диапазоне спектра для спектральных каналов радиометров, установленных на спутниках Sentinel-2A. Данная модель основывается на line-by-line расчетах спектров поглощения с использованием современной спектроскопической информации и последующей параметризации функций пропускания излучения в виде короткого ряда экспонент для применения в методе дискретных

ординат при решении уравнения переноса излучения. Для каналов радиометров Sentinel-2A сделаны оценки погрешностей коэффициентов спектральной яркости поверхности, обусловленные неопределенностями аэрозольного ослабления для типичных оптико-метеорологических условий региона Нижнего Поволжья.

В работе [Kouzov et al., 2022] предложена новая немарковская теория развития диффузных спутников вокруг разрешенных (материнских) линий вращения, возмущенных буферными газами. С ростом давления буферного газа лоренцевская часть материнских линий, примыкающая к центру полосы, затухает из-за передачи интенсивности на спутеллиты. Рассмотрены различные каналы, способствующие ослаблению инфракрасных и рамановских линий линейных молекул. Простые оценки коэффициентов затухания удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными, имеющимися для спектров поглощения HCl и HF , возмущенных одноатомными газами.

В Институте прикладной физики РАН проведен ряд экспериментальных и теоретических исследований, направленных на повышение точности восстановления атмосферных профилей температуры и влажности с помощью микроволновой радиометрии. Эта задача решалась в основном за счет получения высокоточных экспериментальных данных о параметрах формы основных диагностических атмосферных линий. В частности, проведено исследование линии поглощения водяного пара вблизи 183 ГГц [Koshelev et al., 2021a] и полосы кислорода в окрестности 60 ГГц [Koshelev et al., 2021b, 2022; Makarov et al., 2020]. Полученные данные позволяют, в том числе, моделировать тонкие столкновительные молекулярные эффекты (включая, зависимость эффективного сечения столкновений от скорости) и составляют эмпирическую основу современных моделей распространения миллиметровых волн в атмосфере. В работе [Belikovich et al., 2022] продемонстрировано, что высокоточное моделирование профиля 60-ГГц кислородной полосы поглощения на основе полученных данных и формализма внезапной коррекции энергии (Enegru Correction Sudden, ECS) позволяет снизить погрешность восстановления профиля температуры атмосферы по данным радиометра HARTPRO до долей Кельвина. По результатам этих и ряда предшествующих исследований поглощения излучения атмосферной опубликована монография [Tretayakov, 2021].

Ввиду отсутствия удовлетворительной теории магнитно-дипольных переходов в многоатомных молекулах, способной описать наблюдаемую в атмосфере Марса запрещенную в электро-дипольном приближении полосу $\nu_2 + \nu_3$ углекислого газа, в ИФА им А.М. Обухова РАН была построена квантовая теория магнитного момента бесспиновых молекул и приведены основные элементы

теории магнитно-дипольных колебательно-вращательных переходов [Kazakov et al., 2021]. В дальнейшем, был разработан метод расчета магнитно-дипольных спектров, выполнены необходимые квантово-химические расчеты и проведены вариационные расчеты магнитно-дипольного и квадрупольного спектров в области 3.3 мкм углекислого газа. Показано хорошее согласие теоретических спектров и данных лабораторных измерений, выполненных с использованием высокочувствительного метода CRDS [Fleurbay et al., 2021] и метода Фурье-спектроскопии [Borkov et al., 2021].

В работе [Ptashnik et al., 2019], выполненной совместно сотрудниками ИОА им. В.Е. Зуева СО РАН и ИФА им А.М. Обухова РАН, было предложено описание континуального поглощения водяного пара в области 2.7 и 6.25 мкм с использованием модельных представлений о формировании континуума в результате суммирования вкладов связанных и квазисвязанных димеров воды и далеких крыльев колебательно-вращательных линий в спектре поглощения мономеров. В ИФА им А.М. Обухова РАН проведен цикл экспериментальных исследований, направленный на повышения точности описания континуального атмосферного поглощения в области вращательной полосы молекулы воды [Koroleva et al., 2021; Odintsova et al., 2019, 2020] и предложен подход к его физически обоснованному моделированию на основе современных представлений о бимолекулярном поглощении и поведении далеких крыльев резонансных линий водяного пара [Odintsova et al., 2022].

В ИОА им. В.Е. Зуева СО РАН сделаны оценки влияния континуального поглощения водяного пара в атмосфере на радиационный форсинг CO_2 на основе массовых расчетов потоков теплового излучения для летних месяцев 2021 г. в регионе Нижнего Поволжья [Фирсов и др., 2022]. Результаты показали, что с ростом влажности вклад CO_2 в радиационное воздействие на поверхность Земли уменьшается, что приводит к меньшему нагреву поверхности и к увеличению нагрева атмосферы. При этом доминирующую роль играет континуум водяного пара, а не селективное поглощение в полосах H_2O .

Впервые получены экспериментальные спектры континуального поглощения чистого водяного пара в полосах поглощения 1.14 и 0.94 мкм при повышенной температуре (400–430 К) совместно с сотрудниками из Университета г. Рединга (Великобритания) [Симонова, 2022; Симонова и др., 2019; Simonova et al., 2022]. Разработана полупирическая модель димеров воды для прогнозирования величины и спектральных особенностей континуума чистого водяного пара в ИК полосах поглощения в диапазоне температур от 280 до 430 К [Симонова, 2022; Simonova et al., 2022]. На основе лабораторных измерений и анализа теоретических расчетов получена оценка вклада

простейших комплексов воды – димеров – в континуум водяного пара в полосах поглощения ИК диапазона: от 40 до 90% в температурном диапазоне от 280 до 430 К [Симонова, 2022; Симонова и др., 2022; Simonova et al., 2022].

Отдельно стоит отметить теоретические работы, использующие метод классических траекторий для расчета вкладов в континуальное поглощение. Первые работы по использованию этого метода для получения индуцированных спектров атмосферных молекул начались в 2014 году почти одновременно в ИФА им А.М. Обухова РАН и в СПбГУ. Успешное развитие этого теоретического подхода в работах [Chistikov et al., 2019, 2021; Serov et al., 2020] привело к появлению совместной публикации [Odintsova et al., 2021], в которой результаты теоретического моделирования рототрансляционной полосы CO_2 -Ar, полученные в ИФА им А.М. Обухова РАН и в СПбГУ, сопоставлены с имеющимися в литературе данными, а также с результатами высокоточных измерений, проведенных в ИПФ РАН. Оказалось, что, несмотря на некоторые различия в методике траекторных расчетов, проводившихся в ИФА им А.М. Обухова РАН и в СПбГУ, полученные независимо теоретические спектры хорошо согласуются с данными измерений. Это позволило включить рототрансляционные спектры поглощения CO_2 -Ar и N_2 - N_2 , полученные в ИФА им А. М. Обухова РАН, в основной блок базы данных HITRAN [Gordon et al., 2022]. В работе [Finenko et al., 2022] с помощью траекторного метода в ИФА им А.М. Обухова РАН были получены рототрансляционные спектры CH_4 - N_2 при температурах от 70 до 400 К. Спектры CH_4 - N_2 и полученные ранее спектры N_2 - N_2 были использованы в этой работе для интерпретации спектральной яркости излучения в атмосфере Титана. Показано очень хорошее согласие теоретических данных и результатов измерений с борта космического аппарата Кассини. Можно полагать, что полученные в ИФА им А.М. Обухова РАН бинарные коэффициенты поглощения для CH_4 - N_2 и N_2 - N_2 окажутся полезными для моделирования радиационных процессов в некоторых экзопланетных атмосферах, предположительно состоящих из азота с примесью метана. В работе [Oparin et al., 2020], выполненной в СПбГУ, предложен метод расчета далеких крыльев полос, основанный на траекторных расчетах. Метод с успехом применен для расчета поглощения в области высокочастотного крыла полосы $\nu_3\text{CO}_2$ в смесях с благородными газами.

3. АЭРОЗОЛЬНОЕ РАДИАЦИОННОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ И КЛИМАТИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ

В институте физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН проведен анализ пылевого минераль-

ного аэрозоля. Показано, что наряду с песчаной фракцией и фракцией частиц минеральной пыли ветрово-песчаный поток содержит алевритовую фракцию частиц размером примерно от 10 до 100 мкм [Gorchakov et al., 2019a]. Установлены статистические зависимости между концентрациями частиц алеврита и песка в ветрово-песчаном потоке и скоростью ветра в приземном слое атмосферы [Gorchakov et al., 2020a]. Были предложены аппроксимации вертикальных распределений концентраций частиц алеврита и песка в квазистационарных условиях [Gorchakov et al., 2021a, 2021b]. Показано, что в верхнем слое засоления, в отличие от нижнего слоя толщиной около 9 см, вертикальный градиент концентрации солеобразующих частиц зависит от скорости ветра в приземном слое атмосферы [Gorchakov et al., 2021a, 2021b]. Разработана эмпирическая модель функции распределения частиц алеврита и песка по размерам в ветрово-песчаном потоке в опустыниваемом районе [Gorchakov et al., 2021c]. Измерения вертикальных турбулентных потоков пылевого аэрозоля проводились корреляционным методом в опустыниваемой местности [Gorchakov et al., 2020b; Karpov et al., 2021]. Были получены оценки скорости подъема пылевого аэрозоля с подстилающей поверхности (до 6–7 см/с) [Gorchakov et al., 2020b; Karpov et al., 2021]. Низкочастотные вариации плотности турбулентного потока пылевого аэрозоля определяются конвективно обусловленной изменчивостью горизонтальной и вертикальной составляющих скорости ветра в приземном слое атмосферы [Gorchakov et al., 2020b; Karpov et al., 2021]. Данные показали, что ветрово-песчаный поток характеризуется аномально высокой электризацией [Gorchakov et al., 2022a, 2022b]. Представлены результаты измерений напряженности электрического поля, солевых электрических токов и электрических токов, обусловленных переносом заряженных пылевых аэрозольных частиц [Gorchakov et al., 2022a, 2022b]. Получена оценка плотности электрических зарядов на подстилающей поверхности (до +25 нК/м²). Был предложен новый механизм инициирования засоления электрическими (коронными) разрядами на подстилающей поверхности, который может обеспечить удаление солеобразующих частиц с подстилающей поверхности со скоростью 1 м/с и более [Gorchakov et al., 2022a, 2022b].

Были изучены свойства и радиационные эффекты пылевой дымки из пустыни Такламакан на Северо-Китайской равнине [Gorchakov et al., 2022c]. По данным AERONET на станции Пекин за период 2001–2021 гг. получены значения аэрозольных оптических толщин (АОТ) до 4.0–4.5. Показано, что оптические и микрофизические характеристики пылевого аэрозоля определяются его крупной фракцией с модалным радиусом объемного распределения частиц 2–4 мкм при массовом содержании в атмосфере до 10–12 г/м².

Согласно данным мониторинга на станциях Синлун и Пекин в апреле 2006 года и на станции Пекин-SAMS в марте 2021 г., мнимая часть показателя преломления пылевого аэрозоля в большинстве случаев не превышала 0.003 в условиях оптически плотной пылевой дымки. Показано, что при интенсивных заносах пылевого аэрозоля в район Пекина эффективность аэрозольного радиационного воздействия достигала 85 Вт/м² на верхней границе атмосферы и 135–140 Вт/м² на нижней границе [Gorchakov et al., 2022c]. Используя данные реанализа по ветру, данные спутникового мониторинга оптической толщины аэрозоля (MODIS) и вертикального распределения коэффициента ослабления (CALIOP), а также данные AERONET, показано, что массовый поток пылевого аэрозоля из пустыни Такламакан на Северо-Китайскую равнину в апреле 2006 г. составляет 1.5 т/с или около 1.5 млн т в день.

Оценена степень распространения оптически плотной дымки в Евразии в июле 2016 года, включая рекордную сибирскую дымку, которая распространилась на площади около 16 млн км² [Gorchakov et al., 2019b]. Общая масса дымового аэрозоля в дымке на территории Северной Евразии достигла примерно 3.2 млн т. Среднее радиационное воздействие аэрозоля в период максимального задымления в Сибири составило –67 Вт/м² на верхней границе атмосферы и –98 Вт/м² на нижней границе. Согласно данным MODIS и AERONET установлены пространственные распределения смога и дымового аэрозоля на Северо-Китайской равнине в июне 2007 г. [Gorchakov et al., 2019c]. Выявлено сходство оптических и микрофизических характеристик дымового аэрозоля в крупномасштабной дымке в России и в дымке на Северо-Китайской равнине. Показано, что в летнем смоге на Северо-Китайской равнине альbedo однократного рассеяния в среднем ниже (0.91), чем в дымной атмосфере на территории России (0.95–0.98). Эффективность аэрозольного радиационного воздействия на верхней границе атмосферы в смоге составляет 45 Вт/м², что примерно на 30% меньше (58–62 Вт/м²), чем в дымовом аэрозоле в России, а на нижней границе атмосферы эффективность радиационного воздействия в смоге – 144 Вт/м², что примерно на 30% больше, чем в условиях дымового аэрозоля (102–118 Вт/м²).

С использованием самолетной лаборатории Института оптики атмосферы СО РАН [Panchenko et al., 2020a; Petäjä et al., 2020] был проведен детальный анализ свойств аэрозоля в приземном слое атмосферы и в тропосфере в фоновых условиях Западной Сибири. Развивая идеи Розенберга о классификации аэрозольных состояний в приземном слое атмосферы для различных типов “оптической погоды”, предложен новый вариант разделения наборов данных наблюдений на типы “аэрозольной погоды”. Этот подход основан на

том факте, что основной (“сухой”) микрофизический состав частиц формируется под воздействием множества относительно длительных процессов, в то время как оптические характеристики частиц сильно зависят от быстро меняющейся относительной влажности воздуха. В рамках этого подхода весь набор данных наблюдений можно разделить на четыре типа аэрозольной погоды, условно обозначаемых как фон, дымка, смог и дымовой аэрозоль [Панченко и др., 2019a]. Анализ показал, что основные типы аэрозольной погоды могут быть надежно выделены в сезонных наборах данных по изученным оптическим и микрофизическим характеристикам [Panchenko et al., 2020b]. Анализ долгосрочных наблюдений [Полькин и др., 2022a, 2022b; Kabanov et al., 2019, 2020; Panchenko et al., 2021] и классификация состояний приземной атмосферы в соответствии с типами аэрозольной погоды значительно снизили неопределенность измеряемых входных параметров эмпирической модели аэрозольных оптических характеристик приземного слоя атмосферы. Это играет важную роль в разработке современной версии обобщенной эмпирической модели оптических характеристик тропосферного аэрозоля в Западной Сибири [Зенкова и др., 2021].

В 2019–2022 гг. ИАО СО РАН продолжило регулярные самолетные наблюдения в фоновом регионе Западной Сибири [Arshinov et al., 2021]. В осенние сезоны 2020 и 2022 гг. с помощью летающей лаборатории Optik Tu-134 были проведены крупномасштабные комплексные измерения парниковых газов и аэрозолей в российском секторе Арктики [Белан и др., 2022]. По данным самолетного зондирования тропосферы, полученным в ходе комплексного эксперимента по изучению состава тропосферы в российском секторе Арктики в сентябре 2020 г. над Баренцевым, Карским, Лаптевых, Восточно-Сибирским, Чукотским и Беринговым морями, получены вертикальные профили массовой концентрации субмикронного аэрозоля и поглощающего вещества (черный углерод) [Зенкова и др., 2022]. В ходе кампании 2020 г. впервые удалось провести воздушное зондирование аэрозоля в Арктическом регионе при переходе из тропосферы в стратосферу [Antokhin et al., 2021]. Было обнаружено, что при пересечении тропопаузы плотность аэрозольных частиц увеличивается. Выше тропопаузы в элементном и ионном составе преобладают Si и SO_4^{2-} соответственно, в то время как в тропосфере доминируют терригенные элементы Al, Cu и Fe [Antokhin et al., 2021]. В ходе самолетных кампаний ИАО СО РАН совместно с Государственным научным центром вирусологии и биотехнологии “ВЕКТОР” был накоплен уникальный набор данных о содержании микроорганизмов в атмосферном аэрозоле в тропосфере Западной Сибири на высотах от 0 до 7 км. Сравнение данных, по-

лученных в период 2006–2008 гг., с измерениями 2012–2016 гг. показало, что содержание микроорганизмов, опасных для здоровья человека, в атмосферном аэрозоле на юге Западной Сибири не менялось в течение десяти лет (тенденции неотличимы от нуля с доверительной вероятностью выше 95%) [Safatov et al., 2022].

Исследователи ИАО СО РАН совместно с коллегами из других научно-исследовательских институтов продолжили измерения характеристик аэрозоля и обобщили результаты, полученные на полярных станциях и в морских районах [Радионов и др., 2019; Сакерин и др., 2019, 2022; Golobokova et al., 2020; Kabanov et al., 2020; Radionov et al., 2020; Sakerin et al., 2020, 2020a, 2020b, 2022]. На основе многолетних полевых исследований (2007–2018 гг.) впервые показано, что средние характеристики атмосферного аэрозоля снижаются с запада на восток в российском секторе Северного Ледовитого океана, что указывает на преобладание влияния адвекции антропогенного и природного аэрозоля из Европы [Radionov et al., 2019; Sakerin et al., 2020, 2020a]. Анализ серий долгосрочных наблюдений на полярных станциях Баренцбург и Ny-Alesund показал, что сезонная и межгодовая изменчивость АОТ определяется изменением содержания мелкодисперсного аэрозоля при значительном влиянии дымового аэрозоля. Колебания АОТ от года к году на двух станциях являются постоянными [Сакерин и др., 2022; Golobokova et al., 2020; Radionov et al., 2020]. Многолетние исследования, проведенные в двадцати антарктических экспедициях, выявили особенности пространственного распределения аэрозольной оптической толщины атмосферы, плотности распределения аэрозольных частиц и содержания поглощающего вещества (черного углерода) в высоких широтах Индо-Атлантического сектора океана. Общей тенденцией является снижение концентрации в широтном направлении в соответствии с распространением шлейфа пыли и антропогенных аэрозолей, переносимых из Африки. Показано, что пространственное распределение определяется циклоническим переносом аэрозоля с континента в зону Субантарктической депрессии (55° – 60° ю.ш.), действием антарктического антициклона, препятствующего дальнейшему переносу воздуха, и широтным изменением скорости ветра и ледяного покрова океана, которые влияют на образование морского аэрозоля [Sakerin et al., 2022b].

В связи с растущим числом масштабных природных пожаров, которые распространяются на обширные территории Сибири и вторгаются в Арктический регион, очень актуальной задачей является точное определение их радиационного воздействия [Kononov et al., 2021; Zhuravleva et al., 2020]. В рамках этой задачи был начат новый цикл измерений и моделирования рассеивающих и поглощающих свойств дымового аэрозо-

ля вблизи источника пожара с акцентом на ежедневную трансформацию свойств аэрозоля [Журавлева и др., 2022; Uzhegov et al., 2022; Zhuravleva et al., 2021]. Измерения оптических и микрофизических характеристик дымов различного состава в большой аэрозольной камере ИАО СО РАН позволили выявить тенденцию изменения соотношения коричневого и черного углерода в массовой концентрации смешанных дымов на стадии дымообразования и двух-трехдневной выдержки при ультрафиолетовом облучении и в темноте [Uzhegov et al., 2022]. Серия модельных расчетов радиационного воздействия дымового аэрозоля в зависимости от фотохимической эволюции его органической компоненты, условий облучения и типов подстилающей поверхности (вода, смешанный лес и снег/лед) показала, что увеличение альбедо подстилающей поверхности и уменьшение оптической толщины аэрозоля может привести к изменению эффекта охлаждения/нагрева. Было обнаружено, что, пренебрегая изменчивостью оптических характеристик органического аэрозоля, можно переоценить или недооценить радиационное воздействие на верхней границе атмосферы на несколько десятков Вт/м² или даже неправильно получить его знак [Журавлева и др., 2022; Zhuravleva et al., 2019, 2021]. С помощью модели переноса химических веществ CHIMERE в сочетании с метеорологической моделью WRF рассчитано радиационное воздействие дымового аэрозоля в восточной части Арктики для периода сибирских мощных пожаров 16–31 июля 2016 г. Получены модельные оценки среднесуточного прямого радиационного воздействия дымового аэрозоля в солнечном спектральном диапазоне по данным аэрозольных наблюдений на станции Тикси в период аномально высокой концентрации черного углерода в приземном слое атмосферы (июль 2014 г.) [Zhuravleva et al., 2019]. Показано, что среднесуточные значения радиационных эффектов, обусловленные изменчивостью оптических характеристик фонового аэрозоля и кратковременными выбросами черного углерода от лесных пожаров в месте наблюдения, вполне сопоставимы.

Исследования в аэрозольной лаборатории Санкт-Петербургского государственного университета охватывали широкий спектр исследований и разработок [Vlasenko, 2020; Vlasenko et al., 2019; Volkova et al., 2020; Mikhailov and Vlasenko, 2020; Mikhailov et al., 2021]. Лаборатория включает наземный мониторинг дисперсных характеристик аэрозолей, их химического состава и оптических свойств вблизи Санкт-Петербурга. Проводилось усовершенствование аэрозольного оборудования и расширение перечня измеряемых параметров аэрозолей, в частности: гравиметрические измерения PM₁₀, определение органического и элементарного углерода, определение дисперсных параметров аэрозолей, измерение коэффициентов рассеяния и поглощения аэрозолей. Особое

внимание было уделено развитию измерительной инфраструктуры и получению новых данных о распределении ультрамалых частиц по размерам (<100 нм). Были проведены модельные расчеты и проанализированы потенциальные источники загрязнения с использованием моделей рецепторов. Впервые в Российской Федерации был налажен мониторинг и регулярные измерения содержания сверхмалых частиц (<100 нм), важного компонента урбанизированных территорий, влияющего на здоровье населения. Проведенные исследования и разработки позволили нам изучить временную изменчивость концентраций PM₁₀, органического и элементарного углерода в течение 2013–2021 гг. Показано, что концентрации PM₁₀ в Петергофе заметно ниже российских и европейских предельно допустимых концентраций (ПДК). Значительное снижение концентраций PM₁₀, органического и элементарного углерода наблюдалось в период с апреля 2020 г. по июнь 2021 г., что, вероятно, связано с пандемическими ограничениями. В целом, хотя измеренные концентрации аэрозольных веществ не превышают допустимого порога для PM₁₀, анализ данных показывает, что Петербургский регион испытывает систематическую антропогенную нагрузку. Так, зимой загрязненные воздушные массы составляют ~69%, и только ~31% случаев относится к фоновым условиям. В пригородном районе Санкт-Петербурга в Петергофе, где расположена аэрозольная станция, основными источниками аэрозольных частиц являются выхлопные газы транспортных средств (близость к кольцевой автодороге) и биогенная активность летом. В холодное время года (осень, зима, весна) высокая концентрация сверхмалых частиц (<100 нм) поддерживается выбросами транспортных средств в виде продуктов сгорания моторного топлива. Относительно высокая концентрация аэрозольных частиц в летний сезон обусловлена дополнительным вкладом в аэрозоли биогенных источников, образующих вторичный аэрозоль в результате фотохимической конверсии летучих органических соединений. Были изучены сезонные распределения расчетных и объемных концентраций частиц по размерам за период с января 2018 г. по декабрь 2021 г. Показано преобладание частиц с размером менее 0.1 мкм. Распределение аэрозоля по объему имеет две моды: мелкодисперсную (0.1–1.0 мкм) и крупнодисперсную (>1 мкм).

Важные аэрозольные исследования были проведены учеными из Института Арктики и Антарктики. Были получены оценки интегральной прозрачности и аэрозольной оптической толщины атмосферы в Антарктиде и проанализирована их долговременная изменчивость за весь период наблюдений. Сравнение полученных данных с оценками для других природных регионов и условий показало, что в периоды без воздействия извержений вулканов уровни аэрозольного содержания в Ан-

тарктиде за последние десятилетия являются минимальными на планете и могут рассматриваться как глобальные фоновые характеристики [Radionov et al., 2020]. Учитывая значительные изменения климата на планете в целом, базы данных и архивы данных об основных климатообразующих характеристиках атмосферы, собранные за длительные периоды времени в различных регионах земного шара и, в частности, в полярных регионах, приобретают особую роль. Поскольку суммарная солнечная радиация является одним из важнейших параметров, влияющих на энергетический баланс системы Земля-атмосфера, была создана база данных ее часовых и суточных сумм на пяти российских антарктических станциях (Беллинсгаузен, Восток Мирный, Новолазаревская и Прогресс). База включает данные с начала актинометрических наблюдений по 2019 г. [Сибир и др., 2021].

Ученые МГУ имени М.В. Ломоносова в сотрудничестве с Гидрометцентром России оценили уровень городского аэрозольного загрязнения в Московском мегаполисе с использованием модельной системы COSMO-ART и интенсивных измерительных кампаний в 2018 и 2019 гг. [Chubarova et al., 2022]. Были изучены PM₁₀, черный углерод (BC), предшественники аэрозольных газов (NO_x, SO₂, CH_x), а также параметры мелкодисперсного и грубодисперсного аэрозоля в столбе атмосферы, а также индекс, характеризующий интенсивность рассеяния частиц (IPD). Была показана корреляция BC с массовыми концентрациями NO₂ и PM₁₀ и выраженное увеличение отношения BC/PM₁₀ с 0.7 до 5.9% при снижении индекса IPD, связанного с усилением устойчивости атмосферной стратификации. Получена обратная зависимость между соотношением BC/PM₁₀ и альбедо однократного рассеяния для условий интенсивного перемешивания воздуха. Используя многолетние параллельные измерения АОТ в Москве и в фоновых условиях, была оценена городская составляющая АОТ (АОТ_{urb}), которая составила 15–19% от общей АОТ при 550 нм. Выявлен суточный цикл городской компоненты PM_{10urb} и BC_{urb} и их корреляция с индексами IPD. При изменении индекса IPD с 3 на 1 ночью наблюдалось примерно четырехкратное увеличение PM_{10urb} и трехкратный рост BC_{urb}.

Анализ изменений содержания аэрозоля в период карантина из-за COVID-19 был проведен в [Chubarova et al., 2021a]. Снижение выбросов транспортных средств в период карантина с 30 марта по 8 июня 2020 года сыграло важную роль в снижении (до 70%) концентраций многих газообразных веществ и аэрозолей (PM₁₀) и в увеличении содержания приземного озона (до 18%). Анализ концентраций загрязняющих веществ во время карантина показал гораздо более плавный суточный цикл для большинства веществ из-за снижения интенсивности дорожного движения, особен-

но в часы пик, по сравнению с таковым до и после карантина. Однако особые метеорологические условия с низкими температурами в периоды карантина, а также наблюдаемая адвекция дымового аэрозоля внесли значительный вклад в изменение качества воздуха в этот период. Анализ коэффициентов частичной корреляции Пирсона с фиксированным температурным фактором выявил статистически значимую отрицательную корреляцию между индексами самоизоляции Яндекса (SI), которые могут использоваться в качестве показателя интенсивности дорожного движения, и суточными концентрациями всех загрязняющих веществ, за исключением приземного озона, который имеет статистически значимую положительную корреляцию с SI за счет фотохимических реакций.

Аэрозольное городское загрязнение над Москвой также изучалось с использованием спутниковых данных MODIS/MAIAC и наземных измерений AERONET (Zhdanova et al., 2020). Для наземных измерений городской эффект АОТ составил около 0.02. В последние годы городской аэрозоль начал снижаться из-за уменьшения выбросов загрязняющих веществ. В некоторых районах Московской области городская компонента АОТ составила 0.02–0.04, что может быть связано с действием местных источников выбросов аэрозоля (строительство на территории Новой Москвы, автотрассы, сельскохозяйственная деятельность). Наиболее выраженные пространственные различия АОТ на территории Москвы наблюдались на уровне 5% квантиля (до 0.05–0.06).

Непрямые аэрозольные эффекты играют важную роль за счет взаимодействия аэрозоля с облачностью и оказывают значительное влияние на радиационный баланс. Они были детально изучены исследователями из МГУ имени М.В. Ломоносова и Гидрометцентра России с использованием модели COSMO, а также с применением наземных и спутниковых данных для типичных условий [Shatunova et al., 2020] и для условий карантинных мер в период пандемии COVID-19 [Shuvalova et al., 2022]. Показано, что в период карантина, при аналогичных условиях северной адвекции, наблюдалось снижение концентрации количества частиц на 40–50 см³ (или на 14–16%), при увеличении эффективного радиуса капель на 8% и уменьшении оптической толщины облака на 5%, по сравнению с условиями 2018–2019 гг. Согласно численным экспериментам наблюдаемое снижение концентрации облачных капель на 50 см⁻³ обеспечивает увеличение суммарной радиации у земной поверхности на 5–9 Вт/м² (или на 9–11%) в условиях сплошного покрова облаков при водосодержании облаков 200–400 г/м².

Непрямые эффекты аэрозоля также были изучены с использованием модели INMCM48 при сотрудничестве МГУ с ИВМ РАН [Poliukhov et al., 2022]. Была усовершенствована параметризация

взаимодействия аэрозоля с облаком в модели INMCM48. Проведена оценка влияния сульфатного аэрозоля на концентрацию количества облачных капель, облачный покров, суммарную радиацию и пропускание солнечной радиации облаками. Показано, что включение сульфатного аэрозоля в параметризацию взаимодействия аэрозоль–облако обеспечивает корректное воспроизведение увеличения облачного пропускания с 1980 по 2005 год в модели INMCM48 в соответствии с реанализом ERA-Interim и данными модели реконструкции солнечной радиации. Согласно предварительным оценкам, среднее глобальное радиационное воздействие, обусловленное непрямым аэрозольным эффектом, составляет -0.13 Вт/м^2 в 2005 г. по сравнению с 1850 г. Были внесены некоторые улучшения в схему расчета естественного сульфатного аэрозоля (DMS) в климатической модели ИВМ РАН, которые обеспечивают лучшее соответствие между новыми модельными оценками АОТ и данными реанализа CAMS [Chubarova et al., 2021b]. Максимальный (по абсолютной величине) радиационный эффект природного сульфатного аэрозоля наблюдается над морским побережьем Антарктиды из-за высоких концентраций DMS, где среднегодовое значение RFE (radiative forcing efficiency) составляет -0.14 Вт/м^2 (до -0.45 Вт/м^2 в январе). Среднегодовое глобальное значение радиационного эффекта сульфатного аэрозоля за 2005 г. составляет -0.36 Вт/м^2 с небольшими сезонными изменениями. В целом, доля RFE за счет природного сульфатного аэрозоля равна 20%, однако наблюдаются ее значительные сезонные колебания с максимумом в январе, когда она достигает 37%.

Радиационный климат и особенности естественной освещенности в Москве были изучены по данным многолетних измерений в метеорологической обсерватории (МО) МГУ [Gorbarenko, 2019, 2020]. С 2021 года в МО МГУ начаты высококачественные измерения с использованием автоматической станции RAD-MSU (BSRN) с помощью разработанного программного обеспечения для визуализации и обработки данных измерений, включая оценки критериев качества данных [Чубарова и др., 2022].

Разработана новая модель реконструкции коротковолнового солнечного излучения [Volpert and Chubarova, 2021]. Анализ временной изменчивости солнечной радиации, обусловленной различными факторами, над территорией Северной Евразии ($40\text{--}80^\circ$ с.ш., 10° з.д. – 180° в.д.) показал, что в большинстве случаев наблюдается тенденция к ее увеличению с 1979 года, что в основном объясняется изменениями эффективного количества облаков, за исключением загрязненных районов регионов Сибири и Китая, а также некоторых пунктов в Северной Европе, где преобладало влияние аэрозольного фактора.

Выполнен комплекс исследований по измерениям и расчетам УФ радиации. Временная изменчивость эритемной УФ радиации (Eery) над Северной Евразией ($40\text{--}80^\circ$ с.ш., 10° з.д. – 180° в.д.), обусловленная общим содержанием озона (X) и облачностью, была оценена с использованием реанализа ERA-Interim, спутниковых измерений TOMS/OMI и химико–климатической модели ИВМ-РГМУ за период 1979–2015 гг. [Chubarova et al., 2020]. Кроме того, сделан прогноз изменения УФ радиации до 2059 г. [Pastukhova et al., 2019]. Для условий ясного неба весной и летом наблюдаются положительные тренды Eery, (+3% за десятилетие) за счет снижения озона, связанного, главным образом, с увеличением выбросов озоноразрушающих веществ. В дополнение, вулканический аэрозоль и температура поверхности моря также играют важную роль в многолетних изменениях Eery. Для средних условий облачности по данным ERA-Interim и TOMS/OMI над территорией Восточной Европы, Сибири и Северо-Восточной Азии наблюдаются более выраженные положительные тренды Eery (до +5–8% за десятилетие) из-за снижения содержания озона и облачности. В то же время по данным химико-климатического моделирования максимальный рост Eery составил всего +3–4% за десятилетие. Наблюдаемое увеличение Eery привело к заметному сокращению площади с УФ-оптимальным для типов кожи 1 и 2, особенно в апреле, на территории Евразии. В то же время в центральных арктических регионах снижение Eery в июле привело к изменению УФ ресурсов с “избытка УФ-излучения” на “оптимум УФ-излучения” для типов кожи 2 и 3 [Chubarova et al., 2020]. Оценки прогноза Eery с 1979 по 2059 г., свидетельствуют о нелинейном характере изменения общего содержания озона и Eery в 21 веке. Значения Eery за 2016–2020 гг. на 2–5% выше, чем его значения за 1979–1983 гг. в среднем по всей Северной Евразии (с максимумом в 6% в полярных широтах). Они выравниваются в 2035–2039 гг., а затем к 2055–2059 гг. постепенно снижаются (по сравнению с показателями 1979–1983 гг.) на 4–6% для Азии и на 6–8% для Северной Европы. К середине 21 века также наблюдаются различия в пространственном распределении ультрафиолетовых ресурсов, особенно весной и летом. Эти различия проявляются в расширении зон с дефицитом ультрафиолетового излучения на севере и сокращении зон с избытком ультрафиолетового излучения на юге [Pastukhova et al., 2019].

В Сибири многолетние измерения УФ-В радиации на станции TOR ИАО СО РАН за 2003–2016 гг., были использованы для изучения взаимосвязи между УФ-излучением и влияющими на него факторами, такими как ОС озона, балл облаков, оптическая толщина аэрозоля и альbedo поверхности [Belan et al., 2020, 2021]. Показано, что в условиях чистой атмосферы при ясном небе уве-

личение ОС озона на 1% приводит к снижению среднего уровня УФ-В излучения на 1.45%. Средний вклад АОТ в изменение суточного притока УФ-В излучения составляет 4.3–10.9%. Облачность может уменьшить УФ-излучение в среднем на 0.7–28.7%. Увеличение альбедо подстилающей поверхности способствует увеличению УФ-В излучения в среднем на 4–8% при ОС озона 300–400 е.Д. и на 9–13% при ОС озона 400–500 е.Д. при зенитном угле Солнца в диапазоне от 52 до 68°. В дни со свежеснежившим снегом увеличение UV-В излучения может достигать 66%. Разработан новый детектор ультрафиолетового излучения на основе искусственных нанокристаллов периклаза (MgO) [Tentukov et al., 2022]. В последние годы в Фоновой обсерватории расширен набор измеряемых параметров, которые теперь включают измерения коротковолнового излучения и радиационного баланса в диапазонах 0.3–2.8 и 4.5–42 мкм [Belan et al., 2022a]. Показано, что суточный радиационный баланс составляет 1.20 ± 1.18 МДж/м² с ноября по март, когда поверхность земли покрыта устойчивым снежным покровом, и 8.83 ± 4.49 МДж/м² с мая по сентябрь, когда поверхность свободна от снега. В период стабильного снежного покрова с декабря по март суточное поглощение солнечной радиации поверхностью не превышало 2 МДж/м², в то время как в летний период оно колебалось от 10 до 25 МДж/м² [Belan et al., 2022b].

Научно-производственное объединение “Тайфун” разработало лидарную сеть АК-3 для зондирования параметров средней атмосферы на длинах волн 308, 355 и 532 нм [Ivanov et al., 2020]. Сеть оснащена лидарными станциями Росгидромета, на основе измерений которых был проведен цикл исследований характеристик стратосферного аэрозоля. В [Korshunov, 2022; Korshunov and Zubachev, 2021] было проведено исследование многократного рассеяния лазерного излучения в перистых облаках. Было проведено сравнение результатов моделирования с экспериментальными данными. Результаты измерений параметров перистых облаков с использованием двухволнового поляризационного лидара на длинах волн 355 и 532 нм в Обнинске (55° с.ш.) с 2012 по 2020 г. представлены в [Grebennikov et al., 2022]. Исследовались также измерения вулканического аэрозоля в слое с 13 до 18 км после извержения вулкана Райкоке (Курильские острова, 48.29° с.ш., 153.25° в.д.) на лидарных станциях Росгидромета в Обнинске, Знаменске, Новосибирске и Петропавловске-Камчатском в июне 2019 г. Влияние солнечной активности на аэрозоль средней атмосферы по данным лидарных наблюдений на длинах волн 532 и 355 нм в Обнинске с 2014 по 2018 г. обсуждается [Korshunov and Zubachev, 2022]. В нижней стратосфере в период от 0 до 2 дней после магнитной бури было обнаружено в среднем незначительное (~7%) уменьшение обратного рас-

сеяния, что связано с резким уменьшением потока галактических космических лучей. За солнечно-протонными событиями с запаздыванием в 3–8 дней следует увеличение обратного рассеяния аэрозоля в диапазоне от 20 до 70%. Результаты лидарных наблюдений на длине волны 532 нм в Обнинске за период с 2012 по 2021 г. представлены в [Korshunov, 2021]. Они продемонстрировали, что максимумы аэрозоля связаны с извержениями вулканов и лесными пожарами. Отмечено, что в некоторых эпизодах добавление дымового аэрозоля к АОТ на высоте 10–30 км к типичному стратосферному аэрозолю приводит к дополнительному росту на 50–150%. В то же время, в среднегодовом выражении эта добавка в среднем за 2014–2021 гг. составляет около 10%.

В исследовании [Kulikov et al., 2019] было показано, что солнечное излучение с длиной волны 121.6 нм может приводить к образованию заметного количества H₂O₂ внутри частиц полярных мезосферных облаков. В этой работе впервые были проведены комплексные измерения образования H₂O₂ внутри тонких (50 нм) образцов льда из H₂O и H₂O : O₂ с помощью вакуумного ультрафиолетового излучения с длиной волны 121.6 нм в широком диапазоне температур (20–140 К).

4. ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ АТМОСФЕРЫ

В ИОА СО РАН, начиная с 90-х гг. прошлого века, проводится лидарный мониторинг средней атмосферы для исследования особенностей поведения аэрозольной компоненты и температурного режима. По лидарным данным 2011–2021 гг. проведена оценка изменчивости содержания фонового аэрозоля в стратосфере на основе использования оптических параметров [Маричев и Бочковский, 2020; Marichev and Bochkovskii, 2022a]. Выявлена устойчивая тенденция максимального наполнения нижней стратосферы (10–30 км) фоновым аэрозолем зимой, малым содержанием, вплоть до полного отсутствия, летом и промежуточным значением с убыванием весной и ростом осенью. В верхней стратосфере (30–50 км) фоновый аэрозоль в летний период года практически отсутствует. Тем самым показана внутригодовая цикличность наполнения стратосферы Западной Сибири фоновым аэрозолем.

Предложена оптико-локационная модель стратосферного аэрозоля Западной Сибири для разных сезонов и месяцев года [Маричев и др., 2022]. При сравнении предложенной модели с известными выявлено несоответствие последних реальному состоянию стратосферного аэрозоля Западной Сибири, что в свою очередь может приводить к грубым погрешностям расчета лидарных сигналов и ослабления радиации. В работе [Черемисин и др., 2021] представлены результаты лидарных

наблюдений аэрозольного наполнения верхней тропосферы и стратосферы пирокумулятивными выбросами аэрозолей горения от пожаров в Сибири, проведенных на территории Западной Сибири, в Томске, в течение августа 2019 г. Полученная информация расширяет знания об источниках наполнения стратосферы аэрозолями и, в итоге, может использоваться для более достоверной оценки влияния этого аэрозоля на климат.

В лидарном исследовании термического режима стратосферы над Томском выявлено ежегодное проявление зимних внезапных стратосферных потеплений (ВСП). Как показала статистика наблюдений, чаще происходят слабые (минорные) ВСП в отличие от сильных (мажорных). ВСП отличаются как по длительности проявления — от нескольких дней до месяца и более, так и по амплитуде положительных отклонений от среднемесячных значений для мажорных ВСП с максимумом до 60° К. Высота стратосферы при сильных ВСП может опускаться до 27 км (стандартная высота: 50–55 км). Для региона Западной Сибири для длительного периода года апрель — ноябрь в подавляющем большинстве случаев вертикальное распределение температуры хорошо согласуется с распределением по международной модели CIRA-86 [Marichev and Vochkovskii, 2020, 2022b].

На Сибирской лидарной станции ИОА СО РАН в августе–октябре 2017 г. зафиксированы стратосферные аэрозольные слои невулканического происхождения, отношение рассеяния R(H) которых в максимуме на длине волны 532 нм достигало 5.8. Построенные обратные траектории движения воздушных масс показали, что источником этих аэрозольных слоев в стратосфере над Томском, явились канадские лесные пожары Северной Америки, которые имели место в середине августа. За счет пироконвекции продукты горения биомассы были подняты на стратосферные высоты и распространились по всему северному полушарию. Наличие результатов лазерного зондирования на двух длинах волн 355 и 532 нм дало возможность более полно проанализировать динамику наблюдаемых аномальных аэрозольных слоев, а также на основе этих данных получить качественную информацию о размерах аэрозольных частиц, формирующих эти слои. Анализ результатов наблюдений на основе параметра Ангрестрема, позволил предположить, что его значение для фонового ансамбля рассеивающих аэрозольных частиц на высотах 16–19 км примерно 2.8, а выше (на высотах 23–25 км) приближается к четырем ($X = 3.6–3.8$). На высотах локализации выработанных аэрозольных слоев его значение достигает единицы ($X = 1$) [Невзоров и др., 2019].

В 2019–2022 гг. научная группа ИФА им. А.М. Обухова РАН продолжила исследования состава атмосферы спектроскопическими методами и получила следующие результаты. Получены уточненные оценки трендов общего со-

держания СО в разных районах Евразии и, в частности, России. Установлено замедление скорости снижения ОС СО в фоновых районах Евразии [Rakitin et al., 2020]. Установлен вклад климатических изменений в продолжающееся снижение ОС СО в Москве [Ракитин и др., 2021]. Исследовано влияние метеорологических условий на снижение концентраций основных атмосферных загрязнителей в Москве в период действия локдауна во время пандемии COVID-19 в 2020 г. [Скорород и др., 2022].

Разработан многофункциональный программно-вычислительный комплекс TROPOMI_tools, позволяющий проводить автоматический сбор, обработку и анализ измерительных данных нескольких космических систем мониторинга (MODIS, AIRS, OMI, TROPOMI). Результаты апробации TROPOMI_tools опубликованы в нескольких работах [Ракитин и др., 2021; Скорород и др., 2022]. Выполнены валидационные исследования измерений новейшего орбитального спектрометра высокого пространственного разрешения Sentinel-5P TROPOMI наземными спектроскопическими данными ИФА РАН в пунктах Москва и Звенигород (Звенигородская научная станция - ЗНС) по тропосферному и стратосферному содержанию NO_2 и ОС СО. Получены характеристики соответствия между орбитальными и наземными спектроскопическими измерениями в зависимости от пространственного разрешения, облачных условий, сезонов, наблюдаемых углов, высоты пограничного слоя атмосферы (ПСА). Полученные характеристики соответствия находятся в хорошем согласии с результатами валидации TROPOMI данными международных наблюдательных сетей NDACC, MAXDOAS, Pandora по NO_2 , NDACC и TCCON по СО.

Выполнены сопоставления и валидация орбитальных измерений общего содержания NO_2 прибором OMI по измерениям 10 станций NDACC в период 2004–2020 гг. Получены оценки линейных трендов ОС NO_2 на указанных станциях, а также оценки сезонной и широтной зависимости характеристик сопоставления измерений ОС NO_2 OMI и пунктов NDACC. Для пункта ЗНС также получены характеристики соответствия орбитальных измерений OMI наземным данным по тропосферному и стратосферному содержанию NO_2 ; установлено соответствие трендов тропосферного и стратосферного содержания, полученных на основе данных OMI и измерений ЗНС. Для других 9 станций NDACC, измеряющих только ОС NO_2 соответствие между трендами, полученными по данным OMI и наземных пунктов, в целом намного хуже.

В ИФА РАН продолжается развитие и усовершенствование наземного метода многоугловой дифференциальной спектроскопии (ДОАС) определения содержания NO_2 , H_2CO и других химиче-

ски активных газов в ПСА. В 2016 году группа ИФА РАН приняла участие в международных сравнениях приборов и методик измерения NO_2 и других газов методом ДОАС – CINDI-2. На сравнениях CINDI-2 были представлены 36 спектральных приборов от 26 различных научных групп. В статьях [Kreher et al., 2020; Wang et al., 2020] рассматриваются результаты сравнений методик восстановления таких химически активных веществ, влияющих на химию озона, как NO_2 , O_4 , O_3 , H_2CO , HNO_2 . По результатам сравнений сформулированы рекомендации по режимам измерений и параметрам обработки измерений метода ДОАС.

По результатам наблюдений на ЗНС ИФА РАН и в ИОА СО РАН (г. Томск) получены оценки временной изменчивости ОС формальдегида H_2CO [Бручковский и др., 2019]. Показано существование статистически значимого положительного тренда ОС формальдегида в зависимости от температуры при $T > 5^\circ\text{C}$ в обоих пунктах наблюдений. Наблюдаемый положительный тренд, по видимому, связан с ростом биогенных выбросов изопрена и др. неметановых летучих органических соединений с ростом температуры, а также площадей лесных и торфяных пожаров. В воздушных массах, приходящих на ЗНС из Москвы, наблюдается устойчивое превышение ОС формальдегида в среднем на $0.4 \pm 0.1 \times 10^{16} \text{ см}^{-2}$ при положительных температурах и на $0.8 \pm 0.2 \times 10^{16} \text{ см}^{-2}$ при отрицательных температурах. Несмотря на значительную удаленность от Москвы, наблюдаемые на ЗНС значения в целом на 10% выше наблюдаемых в Томске. По наблюдениям в Томске статистически значимое превышение ОС формальдегида при ветрах с направления основной городской застройки ($3.24 \pm 0.3 \times 10^{16} \text{ см}^{-2}$) величин, наблюдаемых при других направлениях ($2.63 \pm 0.2 \times 10^{16} \text{ см}^{-2}$) зафиксировано только при температурах выше 25°C .

Облачность и аэрозоль оказывают существенное влияние на возможности восстановления содержания малых газовых составляющих (МГС) (NO_2 , H_2CO и др.) в нижней тропосфере методами ДОАС. Поскольку имеется большой объем оптических наблюдений методом ДОАС, которые не сопровождаются прямыми измерениями их характеристик, решение задачи определения свойств облачности и аэрозоля по самим спектральным измерениям могло бы повысить точности измерения МГС. В цикле работ [Chulichkov et al., 2021; Nikitin et al., 2019, 2020; Postulyakov et al., 2020b,] рассматриваются задачи определения характеристик облачности (нижняя граница, оптическая толщина и др.) и аэрозоля (оптическая толщина и др.) по характеристикам измеренного рассеянного солнечного излучения (оптическая толщина O_4 , индекс цветности, абсолютная интенсивность и др.). В качестве методов решения возникающих нелинейных задач оценивания используются ме-

тоды машинного обучения: искусственных нейронных сетей и случайного леса.

На кафедре физики атмосферы и в Лаборатории исследования озонового слоя и верхней атмосферы СПбГУ проводятся исследования различных параметров атмосферы, в том числе и ее газового состава, с помощью наземной аппаратуры в УФ, видимой, ИК и МКВ областях спектра.

Наблюдательная станция СПбГУ в Петергофе оснащена спектральным комплексом на базе Фурье-спектрометра Bruker IFS 125HR. Регулярные измерения спектров солнечного ИК-излучения с 2009 г. позволяют исследовать временные вариации ОС и элементов вертикальной структуры различных климатически и экологически важных МГС атмосферы. Использование наземных измерений наряду со спутниковыми позволяет изучать пространственно-временные вариации содержания МГС, а также оценивать их долговременные тренды [Тимофеев и др., 2020a]. Применяемые методики интерпретации наземных спектральных измерений постоянно совершенствуются для достижения более высокой точности и однородности измерений [Виролайнен и др., 2020a, 2020b; Поляков и др., 2019, 2020; Polyakov et al., 2021].

За период 2019–2022 гг. проведены комплексные исследования пространственно-временных вариаций ОС различных МГС с использованием наземных и спутниковых измерений, а также результатов численного моделирования в окрестностях Санкт-Петербурга [Виролайнен и др., 2021; Неробелов и др., 2020, 2022a, 2022b; Никитенко и др., 2021; Тимофеев и др., 2019; Nerobelov et al., 2021, 2022; Polyakov et al., 2020, 2021]. Измерительная станция СПбГУ участвовала в комплексных экспериментах по валидации спутниковых измерений прибором TROPOMI ОС формальдегида [Vigoroux et al., 2020], а также метана и СО [Sha et al., 2021]. Измерения СО, HCN и C_2H_6 были использованы для определения и исследования загрязнения воздуха от лесных пожаров в районах Арктики и средних широт Северного полушария [Lutsch et al., 2020].

Изучена информативность наземных ИК-измерений относительно элементов вертикальной структуры ряда МГС [Виролайнен и др., 2022; Тимофеев и др., 2020b]. В результате проведенных исследований получена новая информация об элементах вертикального распределения содержания озона, CO_2 и HNO_3 , проведены сопоставления наземных и спутниковых измерений с данными численного моделирования [Бордовская и др., 2022; Виролайнен и др., 2022; Никитенко и др., 2022; Тимофеев и др., 2021]. Получены результаты по определению вертикального распределения метана в тропосфере Западной Сибири [Макарова и др., 2020].

С использованием спектрометров OceanOptics, выполняющих зенитные измерения при низ-

ких углах Солнца в УФ и ВИД-областях спектра, с помощью методики ДООС проводятся исследования содержания NO_2 и их эмиссий в Петергофе и в окрестностях мегаполиса Санкт-Петербурга [Ионов и Поберовский, 2020; Ionov et al., 2022].

Исследования в области наземного МКВ зондирования атмосферы в СПбГУ были направлены на совершенствование методик интерпретации измерений радиометра RPG-NATPRO, зондирование облачной атмосферы, определение влагосодержания и водозаписа облаков [Бирюков и Косцов, 2019; Kostsov et al., 2019, 2020].

В рамках европейской программы VERIFY в СПбГУ в 2019–2020 гг. были проведены мобильные измерительные кампании EMMЕ (Emission Monitoring Mobile Experiment) с помощью приборов Bruker EM27/SUN, а также мобильных ДООС-измерений. Программа была выполнена международным коллективом сотрудников СПбГУ (Россия), Karlsruhe Institute of Technology (Germany) и the University of Bremen (Germany). В ходе кампаний были получены данные о распределении вокруг мегаполиса Санкт-Петербург ОС метана, CO , CO_2 и NO_x [Makarova et al., 2021]. Проведенные измерения позволили оценить удельные и интегральные эмиссии важнейшего антропогенного парникового газа — CO_2 в мегаполисе Санкт-Петербурга [Неробелов и др., 2021; Тимофеев и др., 2020в, 2022; Ionov et al., 2021; Makarova et al., 2021]. Измерения показали существенное занижение антропогенных эмиссий CO_2 в мегаполисе Санкт-Петербурга по данным инвентаризационного метода. Также были проведены сопоставления различных спутниковых измерений XH_2O , XCO_2 , XCH_4 и XCO с наземными измерениями в рамках программы COCCON [Alberti et al., 2022].

Продолжены дистанционные измерения оптических и микрофизических параметров атмосферного аэрозоля с помощью аппаратуры CIMEL и локальных измерений вблизи Санкт-Петербурга [Власенко и др., 2019; Волкова и др., 2020].

Совместно с ГГО продолжались исследования вариаций ОС озона с использованием спектрофотометра Добсона и озонметра М-124 в том числе сравнения различных наземных измерений ОСО [Неробелов и др., 2022а; Nerobelov et al., 2022]. Проведены первые попытки интерпретации измерений нового российского озонметра УФОС для получения данных по ОС озона [Ионов и Привалов, 2021].

В работах [Устинов и др., 2019, 2020] коллектив НПО “Тайфун” представил результаты систематических (2003–2017 гг.) измерений ОС и средней по высоте концентрации метана и окиси углерода на Антарктической станции Новолазаревская с использованием дифракционного спектрометра с разрешением 0.2 см^{-1} . За период измерений средняя по высоте объемная концентрация CH_4 и CO

составила $(1663 \pm 34) \text{ ppb}$ и $(37 \pm 8) \text{ ppb}$, соответственно. Приведены оценки трендов и характеристик сезонных вариаций и результаты сопоставления с наземными и спутниковыми данными.

В ФГБУ “ГГО” продолжается обеспечение работы наземной озонметрической сети Росгидромета. Наблюдения на 28 станциях ведутся с 1973 г. [Соломатникова и др., 2020, 2021, 2022]. Отдельно проведен анализ для станций Арктического региона. На 12 станциях продолжаются измерения эритемной УФ радиации. Значительную роль в обеспечении наземных измерений играет калибровка измерительной аппаратуры. Привязка озонметров М-124 к мировой шкале осуществляется путем регулярных калибровок по эталону озонметрической сети Росгидромета (Спектрофотометр Добсона № 108).

Продолжаются работы по переоснащению озонметрической сети Росгидромета. В ходе опытной эксплуатации новых спектрометров УФОС, предназначенных для комплексных измерений спектрального состава суммарной УФР и общего содержания озона, усовершенствованы программное обеспечение, методы калибровки и расчета ОС озона.

Анализ наземных наблюдений на 38 европейских станциях позволил оценить реакцию озонового слоя над Европой на экстремальное истощение озонового слоя в Арктике в 2020 г. Ежегодно пополняется массив данных об ОС озона, поступающий с российских антарктических станций (ААНИИ) Мирный, Новолазаревская и Восток и с научно-экспедиционных судов ААНИИ. До начала 2000-х гг. на антарктических станциях отмечалась устойчивая тенденция уменьшения общего содержания озона антарктической весной, в настоящее время наблюдается тенденция возвращения содержания озона к значениям, характерным для периода, предшествующего проявлению эффекта озоновой дыры [Сибир и др., 2020].

С 1972 г. Главная Геофизическая обсерватория им. А.И. Воейкова участвует в международных программах глобального фонового мониторинга состава атмосферы (Программа Глобальной службы атмосферы – ГСА ВМО). В настоящее время исследование парниковых газов (ПГ) входит в обязательную программу наблюдений на станциях фонового мониторинга, а данные российских станций представляются в международных центрах данных [Ивахов и др., 2019; Парамонова и др., 2020].

В работе [Kulikov et al., 2020] были сопоставлены значения 15 конвективных индексов, полученных по одновременно измеренным радиозондовым и микроволновым профилям температуры и водяного пара над Нижним Новгородом в течение 5 конвективных сезонов 2014–2018 гг. Для большинства индексов была обнаружена высокая корреляция (с коэффициентами ~ 0.7 – 0.85).

В работе [Беликович и др., 2019] описан математический аппарат метода оптимальной оценки для восстановления профилей температуры тропосферы (0–10 км) по радиометрическим данным с параметризацией искоемых профилей в виде разложения по эмпирическим ортогональным функциям, получаемым путем сингулярного анализа ковариационной матрицы данных радиозондовых измерений.

В работе [Belikovich et al., 2021] проанализированы различия между наблюдаемыми и смоделированными микроволновыми спектрами теплового излучения атмосферы в диапазоне 20–59 ГГц, полученными в результате более чем 4-летних наземных микроволновых и радиозондовых наблюдений над Нижним Новгородом. В последующей работе [Belikovich et al., 2022] было показано, что использование технически более сложной модели поглощения, основанной на применении формализма ECS, позволяет минимизировать систематическое рассогласование моделируемых и измеренных спектров до 0.6 К.

Результаты разработки мобильного твердотельного микроволнового спектрорадиометра, работающего в 5-мм полосе поглощения молекулярного кислорода, представлены в работе [Швецов и др., 2020].

5. ИНТРЕПРЕТАЦИЯ СПУТНИКОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Исследования по широкому кругу современных проблем спутникового дистанционного зондирования атмосферы (ДЗА) и подстилающей поверхности проводились в следующих направлениях:

1. Спутниковая целевая аппаратура, калибровка и валидация спутниковых данных и информационных продуктов.

2. Определение характеристик атмосферы и подстилающей поверхности по данным спутниковых измерений в различных спектральных диапазонах.

3. Использование данных спутниковых измерений и информационных продуктов для изучения различных процессов и явлений в атмосфере, океане и на суше, в задачах численного прогноза погоды (ЧПП) и климатических исследованиях.

За отчетный период группировка отечественных метеоспутников была пополнена за счет запуска новых полярно-орбитальных (п/о) и геостационарных космических аппаратов (КА) серий “Метеор-М” и “Электро-Л”. Кроме того, 28 февраля 2021 г. на высокоэллиптическую орбиту типа “Молния” запущен КА Арктика-М № 1, первый из создаваемой высокоэллиптической гидрометеорологической космической системы “Арктика-М”, см. [Асмус и др., 2021], дополняющей п/о и геостационарные метеоспутники в части оперативного получения в квазинепрерыв-

ном режиме гидрометеорологических данных по Арктическому региону Земли.

К первому направлению можно отнести обзор исследований по контролю бортовой радиометрической калибровки целевой аппаратуры отечественных оперативных метеоспутников [Rublev et al., 2019], выполненных в рамках модернизации созданной в НИЦ космической гидрометеорологии “Планета” (кратко НИЦ “Планета”) системы калибровки/валидации спутниковых данных и продуктов. Информационные и технические характеристики гиперспектрального ИК-зондирующего (ИК Фурье-спектрометра) ИКФС-2 за период 4-летней эксплуатации на борту Метеор-М № 2, включая погрешности радиометрической и спектральной калибровок, обсуждаются в [Timofeev et al., 2019]. Результаты исследования ковариационной матрицы шума в измерениях ИКФС-2 представлены в [Козлов и др., 2022]. Изучение климатических изменений Земли на основе анализа спектров уходящего теплового ИК-излучения, регистрируемых различной спутниковой аппаратурой, требует тщательной взаимной калибровки приборов. В работе [Козлов и др., 2019] описана взаимная калибровка Фурье-спектрометров SI-1 (устанавливались на спутниках “Метеор-28” и “Метеор-29”, 1977 и 1979 гг.) и ИКФС-2 (КА “Метеор-М” № 2), необходимая для анализа изменений ИК-спектров атмосферы за прошедшие 40 лет. В статьях [Заболотских, 2021; Заболотских и Балашова, 2021] приведено описание метода взаимной калибровки микроволнового радиометра МТВЗА-ГЯ на борту КА “Метеор-М” № 2-2 в восьми каналах сканера (диапазон частот 10.6–36.5 ГГц) и микроволнового радиометра AMSR2 (КА GCOM-W, JAXA).

Ряд публикаций специалистов СПбГУ посвящен валидации различных спутниковых информационных продуктов ДЗА, а также сравнению наземных и спутниковых методов измерений. Так, в работе [Kostsov et al., 2019] осуществлены сравнения оценок количества жидко-капельной воды в облаках (cloud liquid water path) для территории Сев. Европы по данным наземных микроволновых (радиометр RPG-NATPRO) и спутниковым (радиометры – имаджеры SEVIRI и AVHRR) измерений. В работе [Бордовская и др., 2022] проведено сопоставление измерений вертикальных профилей содержания озона в атмосфере Санкт-Петербурга с помощью наземного инфракрасного спектроскопического метода и спутникового микроволнового метода (аппаратура MLS/EOSAura) за период 2018–2020 гг. Анализ точности определения ОС озона по данным ИКФС-2 КА Метеор-М № 2 выполнен в работах [Nerobelov et al., 2022; Polyakov et al., 2021].

Несколько статей посвящены результатам сравнения наземных и спутниковых спектроскопических измерений ОС CO₂ (XCO₂). В статье

[Виролайнен и др., 2020] проведено сопоставление наземных (Фурье-спектрометр Bruker I25HR) и спутниковых (спектрометр ОСО на борту КА ОСО-2) измерений ХСО₂ вблизи Санкт-Петербурга. Сравнения наземных и спутниковых (аппаратура АСЕ) измерений содержания углекислого газа в тропосфере и стратосфере [Никитенко и др. 2022] показало, что между двумя типами измерений наблюдается хорошее согласие. Результаты сравнения спутниковых (по данным КА Sentinel-5P) и наземных (сети TCCON и NDACC-IRWG) спектроскопических измерений содержания СН₄ и СО в атмосфере приведены в [Sha et al., 2021]. Погрешности результатов температурно-влажностного зондирования атмосферы по данным ИКФС-2 КА Метеор-М № 2 оценены в статье [Филей и др., 2019].

Исследования по второму направлению в последние годы характеризуется активным использованием алгоритмов нейронных сетей (ANN в англоязычной литературе) или машинного обучения (МО).

Значительное внимание в отчетный период уделялось традиционной задаче спутниковой метеорологии [Успенский, 2021] – развитию методов спутникового мониторинга параметров облачности и осадков. Общие технологические аспекты применения алгоритмов МО для классификации облачности и выделения снежного покрова по данным радиометров-имаджеров КА серий Метеор-М, Электро-Л и Himawari рассмотрены в [Крамарева и др., 2019]. Обзор различных методов (пороговых, с использованием алгоритмов МО) дистанционного определения характеристик облачного покрова и осадков по данным радиометров-имаджеров с п/о и геостационарных спутников представлен в работе [Волкова и др., 2021]. В статье также анализируются результаты валидации спутниковых продуктов, полученные в результате сравнения с наземными метеорологическими наблюдениями и независимыми спутниковыми оценками. К этой же тематике относятся статьи [Андреев и др., 2019; Волкова и Косторная и др., 2020; Волкова и Кухарский, 2020; Филей, 2019, 2020а; Чурсин и Кужевская, 2022]. В статье [Кучма и Шамилова, 2022] предложен алгоритм детектирования областей тумана по данным измерений радиометра-имаджера АНИ с геостационарного КА Himawari-8. В работах [Кучма и др., 2022; Филей, 2020б; Филей и Маренцо, 2021] рассмотрены новые алгоритмы дистанционного определения параметров морского аэрозоля и вулканического пепла по данным измерений радиометров-имаджеров п/о и геостационарных метеоспутников.

Специалисты ИОА им. В.Е. Зуева СО РАН провели серию исследований по спутниковому мониторингу параметров облачности. В работе [Астафуров и др., 2021а] на основе результатов классификации облачности по данным спутни-

ковых радиометров-имаджеров MODIS/EOSTerга и VIIRS/S-NPP разработаны статистические модели характеристик (оптическая толщина, эффективный радиус частиц, водозапас, высота ВГО) облачного покрова для 14 типов облачных образований над территорией Зап. Сибири в летнее время. Согласно [Астафуров и др., 2021б], указанные модели могут быть использованы для параметризации и учета влияния облачности в задачах климатического моделирования на территории Зап. Сибири. В статьях [Скорыходов и др., 2022а, 2022б] предложен алгоритм ANN для оценки высоты нижней границы однослойной облачности над территорией Зап. Сибири по данным MODIS, причем для обучения ANN использованы в качестве эталона данные спутникового лидера CALIOP (КА CALIPSO), радиолокатора CPR (КА CloudSat) и наблюдения наземной сети ASOS. В статьях [Тарасенков и др., 2021а, 2021б; Tarasenkov et al., 2021b, 2022] разработаны и апробированы алгоритмы оценки размера области влияния разорванной облачности на результат восстановления по данным MODIS коэффициентов отражения безоблачных участков земной поверхности при наблюдении через просветы в поле разорванной облачности.

Обзор работ по развитию методов и средств (современных и перспективных) температурно-влажностного зондирования атмосферы (ТВЗА) со спутников выполнен в [Успенский и др., 2021]. Дано краткое описание существующих и планируемых к запуску атмосферных зондирующих, а также алгоритмов и технологий обработки спутниковых данных. Использование алгоритмов ANN для получения продуктов ТВЗА по данным микроволнового радиометра МТВЗА-ГЯ рассмотрено в [Филей и др., 2021, 2022]. Регрессионный алгоритм определения влагосодержания в безоблачной атмосфере над океаном по измерениям МТВЗА-ГЯ описан в [Косторная и др., 2020].

Были продолжены исследования по важному направлению спутникового ДЗА – развитию методов дистанционного определения ОС озона и ряда малых газовых составляющих атмосферы, включая парниковые газы. В статьях [Поляков и др., 2019; Тимофеев и др., 2021] описан алгоритм обработки данных ИКФС-2 спутника Метеор-М № 2, основанный на применении ANN и спутниковых измерений спектрометра ОМІ, используемых для обучения ANN. В работе [Блошинский и др., 2022] рассматривается алгоритм ANN оценки ОС озона по данным радиометра-имаджера МСУ-ГС геостационарного КА Электро-Л № 3, причем для обучения ANN используются оценки ОС озона по данным спектрометра OMPS КА S-NPP.

Статья [Успенский, 2022] содержит обзор работ последнего двадцатилетия, посвященных развитию в нашей стране и за рубежом методов и средств измерения со спутников полей концентрации дол-

гоживущих углеродсодержащих парниковых газов в атмосфере – диоксида углерода CO_2 и метана CH_4 . Рассмотрены методы интерпретации измерений современных спутниковых гиперспектрометров ближнего инфракрасного и инфракрасного диапазонов спектра. Приведены сведения о программах развития отечественных и зарубежных спутниковых систем мониторинга содержания CO_2 и CH_4 в атмосфере. В статье [Голомолзин и др., 2022] описана регрессионная методика определения XCO_2 в атмосфере по данным ИКФС-2 КА Метеор М № 2, предикторами в которой являются эффективные спектральные оптические толщины атмосферы в области спектра 8–14 мкм, а референсными значениями XCO_2 для построения регрессии – результаты контактных измерений концентраций CO_2 на высотной мачте международной обсерватории ZOTTO (Центральная Сибирь) и фоновые измерения в обсерватории NOAA на вулкане Мауна-Лоа (остров Гавайи), полученные в 2015–2016 гг. Валидация методики проводилась сопоставлением полученных усредненных оценок XCO_2 с данными параллельных измерений над Сибирью спутниковыми спектрометрами ОСО КА ОСО-2 и CrIS КА NOAA-20 (США).

Коллективом специалистов ИФА РАН выполнен цикл исследований по дистанционному определению интегрального содержания двуоксида азота NO_2 в тропосфере с высоким пространственным разрешением по данным измерений спектрометра ГСА со спутников наблюдения Земли серии Ресурс-П. Разработанная методика позволяет получать оценки распределения NO_2 в тропосфере с пространственным разрешением около 2.4 км на сетке 120 м. Для валидации крупномасштабных структур, выявляемых на восстановленных полях распределения NO_2 , в [Postylyakov et al., 2019a, 2019b; 2020] выполнено сравнение с аналогичными оценками по данным спектрометров TROPOMI (КА Sentinel-5P) и OMI (КА Aura), которое подтвердило достоверность получаемых результатов. Для валидации мелкомасштабных структур и для нахождения источников выбросов NO_2 коллективом ИФА РАН совместно с физическим факультетом МГУ им. М.В. Ломоносова ведется разработка химико - транспортных моделей соответствующего масштаба [Davydova et al., 2021; Mukhartova et al., 2019, 2021; Zakharova et al., 2021], с помощью которых продемонстрирована возможность на основе данных ГСА/Ресурс-П детектировать точечные источники загрязнения и определять их мощность.

В Институте естественных наук и математики Уральского федерального университета предложены методы решения обратных задач ДЗА для определения вертикального профиля и общего содержания CH_4 [Zadvornyykh et al., 2019], а также отношения концентраций $\text{HDO}/\text{H}_2\text{O}$ [Zadvornyykh et al., 2021] в атмосфере Земли по данным

измерений спектров уходящего излучения теплового и ближнего ИК-диапазонов (спектрометр TANSO-FTS) со спутника GOSAT-2. Впервые данным методом восстановлен вертикальный профиль относительного содержания изотопологов $\text{HDO}/\text{H}_2\text{O}$ (δD) в атмосферном водяном паре по данным TANSO-FTS, причем одновременное использование спектров уходящего излучения атмосферы в тепловом и ближнем ИК диапазоне дает более высокую корреляцию спутниковых оценок δD с данными наземного зондирования на FTIR станциях международной сети TCCON [Задворных и др., 2022]. В статье [Gribanov et al., 2021] исследована возможность определения относительного содержания $^{13}\text{CO}_2/^{12}\text{CO}_2$ в атмосфере по данным спутникового Фурье-спектрометра типа IASI/Metop. Эксперименты с использованием моделированных измерений Фурье-спектрометра IASI-NG, показали, что вертикальные профили концентрации $^{13}\text{CO}_2$ и относительного содержания $^{13}\text{CO}_2/^{12}\text{CO}_2$ в атмосфере удовлетворительно восстанавливаются в тропосфере для интервала высот 2–11 км.

В ИОА СО РАН разработан алгоритм восстановления коэффициентов отражения земной поверхности с учетом влияния поляризации излучения [Tarasenkova et al., 2020]. Для оценки погрешности алгоритма используются измерения MODIS в пяти каналах и тестовые точки в центре хвойных лесных массивов в летний период года на трех участках (юг Томской обл., Иркутская и Московская обл.). Сопоставление результатов применения алгоритмов с учетом и без учета поляризации, известного алгоритма NASA MOD09 с измерениями, принятыми за эталонные, показывает, что средние значения новых оценок (с учетом влияния поляризации) ближе к эталонным, чем получаемые с помощью алгоритма NASA MOD09.

В НПО “Тайфун” исследованы характеристики высотных струйных течений и поля ветра в верхней тропосфере, а также их связи с климатическими параметрами и крупномасштабными атмосферными явлениями по данным измерений радиометра – имаджера SEVIRI, установленного на европейских геостационарных метеоспутниках второго поколения Meteosat-8,-9,-10 [Nerushchev et al., 2019]. В статье [Nerushchev et al., 2021a] предложена статистическая модель временной изменчивости характеристик высотных струйных течений Северного полушария, определенных по данным SEVIRI. В работе [Nerushchev et al., 2021b] рассмотрена связь аномалий среднемесячной приземной температуры воздуха на метеорологических станциях Европы и Европейской территории России с характеристиками высотных струйных течений. В работах [Nerushchev et al., 2022] предложен метод определения зон турбулентности в верхней тропосфере по данным измерений SEVIRI и постро-

ена статистическая модель временной изменчивости площадей зон турбулентности.

Из большого количества публикаций по различным приложениям результатов спутникового ДЗА остановимся на тех из них, которые относятся к мониторингу опасных природных явлений и антропогенных эмиссий парниковых газов, а также подготовке численных прогнозов погоды и климатическим исследованиям.

В статье [Асмус и др., 2019] представлены примеры использования спутниковой информационной продукции НИЦ “Планета” для мониторинга опасных природных явлений на территории России, включая наводнения, пожарную обстановку, выходы тропических циклонов, загрязнения природной среды, вулканическую активность и др. В работе [Гирина и др., 2019] дано описание созданной информационной системы “Дистанционный мониторинг активности вулканов Камчатки и Курил”, с помощью которой выполнен анализ дистанционных наблюдений эксплозивно-эффузивного извержения вулкана Ключевской в 2019–2020 гг. [Гирина и др., 2021]. В упомянутой выше статье [Волкова и Кухарский, 2020] описано использование данных измерений SEVIRI/Meteosat для диагноза опасных явлений погоды. В статье [Фролова и др., 2022] представлены первые результаты мониторинга мезомасштабных циклонов в Арктическом регионе в виде карты их повторяемости по данным радиометра–имаджера МСУ-ГС КА Арктика-М № 1.

Примеры использования спутниковых измерений ХСО₂ в атмосфере по данным КА ОСО-2 для исследований пространственно-временных вариаций и оценок антропогенных эмиссий в различных городах РФ приведены в работах [Никитенко и др., 2020; Тимофеев и др., 2019а, 2019б; 2020а, 2020б].

В статьях [Цырульников и др., 2019, 2021] дано описание системы оперативного усвоения данных метеорологических наблюдений Гидрометцентра России на основе трехмерного вариационного подхода и представлены результаты усвоения в этой системе данных измерений атмосферных микроволновых и ИК-зондировщиков, поступающих с КА серии Метеор-М. Приводятся методика и результаты адаптивной коррекции каналов микроволнового радиометра МТВЗА-ГЯ. Описывается методика усвоения данных ИК-зондировщика ИКФС-2 КА серии Метеор-М, включающая новую схему выбора наиболее информативных каналов. Сравнение результатов усвоения данных ИКФС-2 и европейского Фурье-спектрометра IASI (КА Metop) показывает, что данные ИКФС-2 и IASI оказывают примерно одинаковое положительное влияние на краткосрочный прогноз погоды.

В статье [Успенский и др., 2022] обсуждается использование измерений ИК-зондировщика

ИКФС-2 КА серии Метеор-М для дистанционного определения параметров состояния атмосферы, относящихся к основным климатическим переменным (концентрации основных парниковых газов, характеристики облачности и аэрозолей, вертикальные профили температуры и др.), мониторинг которых необходим для характеристики климатической системы и ее изменений. Проанализирована возможность формирования многолетних однородных рядов, содержащих измерения ИКФС-2 и спутниковые оценки вышеупомянутых атмосферных климатических переменных. В уже цитированной выше статье [Астафуров и др., 2021б] на основе результатов классификации облачности по спутниковым данным (измерения MODIS и VIIRS) исследована многолетняя изменчивость структуры полей облачности и их характеристик над природными зонами Западной Сибири в летнее время периода 2001–2019 гг. В работе [Покровский, 2019] представлены результаты анализа климатических рядов глобальной и региональной облачности за 1983–2009 гг., полученных в рамках международного спутникового проекта ISCCP. Результаты анализа показывают, что глобальная и региональная облачность демонстрируют убывание на 2–6%. В статьях [Покровский и др., 2020, 2022] на основе наземных наблюдений и данных дистанционного зондирования атмосферы, океана и криосферы выявлены и исследованы медленные климатические колебания температуры вод поверхностного океанического слоя и для глубин океана до 700 м в северном полушарии за последние полтора века как отклик на модуляции солнечной активности.

В ИПФ РАН выполнены исследования фотохимических реакций и их влияния на важнейшие характеристики и составляющие атмосферы в области мезопаузы (на высотах 80–100 км) по спутниковым данным – измерениям 10-канального ИК-радиометра SABER, работающего в лимбовом режиме (спутник TIMED, США). В статье [Kulikov et al., 2019] показано, что нарушение известного предположения о химическом равновесии “ночного” озона на нижней границе мезопаузы (77–86 км в зависимости от сезона и широты) приводит к грубым ошибкам при дистанционном определении атомарного кислорода O по данным SABER. В статье [Kulikov et al., 2020] данные SABER за период 2003–2005 гг. использованы для дистанционного определения пространственно-временных распределений O (¹D) в области мезопаузы. В работе [Kulikov et al., 2021] на основе анализа данных SABER получено первое экспериментальное подтверждение возбуждения нелинейных фотохимических осцилляций с периодом 2 суток как отклика на суточные вариации освещенности. В статьях [Kulikov et al., 2022a, b] проанализирована точность восстановления дневных распределений атомарного кислорода O и

атомарного водорода Н в области мезопаузы по данным SABER за 2003–2015 гг. при учете реакции озона с атомарным водородом в уравнении баланса для озона.

Обзор подготовлен на основе материалов, представленных: С.С. Власенко, Е.Ф. Михайловым, Д.И. Нагирнером, Г.М. Неробеловым (СПбГУ), А.А. Вигасиным, Г.И. Горчаковым, Е.И. Гречко, О.В. Постыляковым, В.С. Ракитиным (ИФА), В.Г. Астафуровым, Б.Д. Беланом, В.В. Беловым, С.М. Бобровниковым, В.Н. Маричевым, М.В. Панченко, А.А. Симоновой, Л.Н. Синицей, Т.Ю. Чесноковой (ИОА), Ю.В. Киселевой, А.Н. Рублевым (НИЦ Планета), А.Ф. Нерушевым (НПО “Тайфун”), О.М. Покровским (РГГМУ), В.М. Иваховым, Н.Н. Парамоновой, А.А. Соломатниковой (ГГО им. Воейкова А.И.), В.Ф. Радионовым (ААНИИ), В.И. Захаровым (ИЕНМ УФУ).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Андреев А.И., Шамилова Ю.А., Холодов Е.И.* Применение сверточной нейронной сети для детектирования облачности по данным прибора МСУ-МР спутника “Метеор-М” № 2 // Метеорология и гидрология. 2019. № 7. С. 44–53.
- Асмус В.В., Иоффе Г.М., Крамарева Л.С. и др.* Космический мониторинг опасных природных явлений на территории России // Метеорология и гидрология. 2019. № 11. С. 20–32.
- Асмус В.В., Милехин О.Е., Крамарева Л.С. и др.* Первая в мире высокоэллиптическая гидрометеорологическая космическая система “Арктика-М” // Метеорология и гидрология. 2021. № 12. С. 11–26.
- Астафуров В.Г., Скороходов А.В.* Использование результатов классификации облачности по спутниковым данным для решения задач климатологии и метеорологии // Метеорология и гидрология. 2021б. № 12. С. 5–10.
- Астафуров В.Г., Скороходов А.В., Курьянович К.В.* Статистические модели характеристик облачности над западной Сибирью в летний период по данным MODIS // Метеорология и гидрология. 2021а. № 11. С. 20–35.
- Афанасьев В.П., Будак В.П., Ефременко Д.С., Капля П.С.* Применение фотометрической теории светового поля в задачах рассеяния электронов // Светотехника, 2019. № 1. С. 44–50.
- Белан Б.Д., Ивлев Г.А., Козлов А.В., Пестунов Д.А., Складнева Т.К., Фофанов А.В.* Радиационный блок измерительного комплекса обсерватории «Фоновая». Часть I. Методические аспекты и технические характеристики // Оптика атмосферы и океана. 2022а. Т. 35. № 9. С. 759–765.
- Белан Б.Д., Ивлев Г.А., Козлов А.В., Пестунов Д.А., Складнева Т.К., Фофанов А.В.* Радиационный блок измерительного комплекса обсерватории “Фоновая”. Часть II. Результаты измерений в 2021 г. // Оптика атмосферы и океана. 2022б. Т. 35. № 10. С. 843–849.
- Белан Б.Д., Ивлев Г.А., Складнева Т.К.* Исследование взаимосвязи ультрафиолетовой радиации с влияющими на нее факторами. Часть I. Роль общего содержания озона, облачности и аэрозольной оптической толщи // Оптика атмосферы и океана. 2020а. Т. 33. № 8. С. 649–655.
- Белан Б.Д., Ивлев Г.А., Складнева Т.К.* Исследование взаимосвязи ультрафиолетовой радиации с метеорологическими факторами и замутнением атмосферы. Часть II. Роль альbedo подстилающей поверхности // Оптика атмосферы и океана. 2020б. Т. 33. № 12. С. 926–931.
- Беликович М.В., Куликов М.Ю., Рыскин В.Г., Швецов А.А., Красильников А.А., Скальга Н.К., Серов Е.А., Фейгин А.М.* Применение параметризации эмпирическими ортогональными функциями в задаче восстановления термической структуры тропосферы по радиометрическим данным // Известия вузов. Радиофизика. 2019. Т. 62. № 9. С. 664–680.
- Белов В.В., Абрамочкин В.Н., Гриднев Ю.В., Кудрявцев А.Н., Тарасенков М.В., Федосов А.В.* Бистатистическая подводная оптико-электронная связь. Полевые эксперименты в 2017–2018 гг. // Светотехника. 2019. № 2. С. 67–70.
- Белов М.Л., Всякова Ю.И., Городничев В.А.* Оптический метод обнаружения нефтяных загрязнений на водной поверхности в УФ спектральном диапазоне // Светотехника. 2019. № 3. С. 15–21.
- Бирюков Е.Ю., Коцков В.С.* Использование линейных регрессионных соотношений, полученных на основе модельных и экспериментальных данных, для определения водозапаса облаков из наземных микроволновых измерений // Оптика атмосферы и океана. 2019. Т. 32. № 5. С. 386–394.
- Блощинский В.Д., Кучма М.О., Кухарский А.В.* Определение общего содержания озона в столбе атмосферы по данным КА Электро-Л № 3 с использованием нейронных сетей // Исследования Земли из космоса. 2022. № 4. С. 79–85.
- Бордовская Ю.И., Виролайнен Я.А., Тимофеев Ю.М.* Сравнение наземного и спутникового методов определения вертикальных профилей содержания озона // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 2. С. 225–231.
- Бручковский И.И., Боровский А.Н., Джола А.В., Еланский Н.Ф., Постыляков О.В., Баженов О.Е., Романовский О.А., Садовников С.А., Капауа У.* Наблюдения интегрального содержания формальдегида в нижней тропосфере в городских агломерациях Москвы и Томска методом дифференциальной спектроскопии // Оптика атмосферы и океана. 2019. Т. 32. № 1. С. 11–19.
- Буренков В.И., Шеберстов С.В., Артемьев В.А., Таскаев В.Р.* Оценка погрешности измерения показателя ослабления света морской водой в мутных водах арктических морей // Светотехника. 2019. № 2. С. 55–60.
- Виролайнен Я.А., Никитенко А.А., Тимофеев Ю.М.* Взаимная калибровка спутниковых и наземных спектроскопических измерений содержания CO₂ на станции NDACC St. Petersburg // Журнал прикладной спектроскопии. 2020. Т. 87. № 5. С. 816–820.
- Виролайнен Я.А., Поляков А.В., Кирнер О.* Оптимизация методики определения содержания нитрата хлора в атмосфере по наземным спектроскопическим измерениям // Журнал прикладной спектроскопии. 2020а. Т. 87. № 2. С. 306–313.

- Виролайнен Я.А., Поляков А.В., Тимофеев Ю.М.* Анализ изменчивости стратосферных газов по данным наземных спектроскопических наблюдений в районе Санкт-Петербурга // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2021. Т. 57. № 2. С. 163–174.
- Виролайнен Я.А., Тимофеев Ю.М., Поляков А.В., Поберовский А.В.* ИК-спектроскопические измерения атмосферного содержания азотной кислоты на станции NDACC St. Petersburg // Оптика атмосферы и океана. 2022. Т. 35. № 11. С. 906–911.
- Власенко С.С., Волкова К.А., Ионов Д.В., Рышкевич Т.И., Иванова О.А., Михайлов Е.Ф.* Изменчивость углеродсодержащей фракции атмосферного аэрозоля вблизи Санкт-Петербурга // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2019. Т. 55. № 6. С. 147–156.
- Волкова Е.В., Андреев А.И., Косторная А.А.* Мониторинг характеристик облачного покрова и осадков по данным измерений с полярно-орбитальных и геостационарных спутников // Метеорология и гидрология. 2021. № 12. С. 45–56.
- Волкова Е.В., Косторная А.А., Амикишиева Р.А.* Определение параметров облачного покрова системами автоматической обработки спутниковых данных // Географический вестник. 2020. № 3. С. 124–134.
- Волкова Е.В., Кухарский А.В.* Автоматизированная технология диагноза параметров облачного покрова, осадков и опасных явлений погоды для Европейской территории России по данным радиометра SEVIRI с геостационарных метеоспутников серии Meteosat MSG // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2020. № 4 (378). С. 43–62.
- Волкова К.А., Аникин С.С., Михайлов Е.Ф., Ионов Д.В., Власенко С.С., Рышкевич Т.И.* Сезонная и суточная изменчивость концентраций аэрозольных частиц вблизи Санкт-Петербурга // Оптика атмосферы и океана. 2020. Т. 33. № 5. С. 407–414.
- Гирина О.А., Лупян Е.А., Маневич А.Г., Мельников Д.В., Крамарева Л.С., Романова И.М., Нурбаев А.А., Кашицкий А.В., Марченков В.В., Уваров И.А., Мальковский С.И., Королев С.П.* Дистанционные наблюдения эксплозивно-эффузивного извержения вулкана Ключевской в 2019–2020 гг. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 1. С. 81–91.
- Гирина О.А., Лупян Е.А., Мельников Д.В., Кашицкий А.В., Уваров И.А., Бриль А.А., Константинова А.М., Бурцев М.А., Маневич А.Г., Гордеев Е.И., Крамарева Л.С., Сорокин А.А., Мальковский С.И., Королев С.П.* Создание и развитие информационной системы “Дистанционный мониторинг активности вулканов Камчатки и Курил” // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 3. С. 249–265.
- Голомолзин В.В., Рублев А.Н., Киселева Ю.В., Козлов Д.А., Прокушкин А.С., Панов А.В.* Определение общего содержания диоксида углерода над территорией России по данным отечественного космического аппарата Метеор-М № 2 // Метеорология и гидрология. 2022. № 4. С. 79–95.
- Дейчули В.М., Петрова Т.М., Солодов А.М., Солодов А.А., Чеснокова Т.Ю., Трифонова-Яковлева А.М.* Параметры линий поглощения молекулы воды в спектральной области 5900–6100 см⁻¹ // Оптика атмосферы и океана. 2021. Т. 34. № 1. С. 20–25.
- Дель Агила А., Ефременко Д.С.* Повышение точности двухпотоковой модели переноса излучения для расчета оптических спектров поглощения в присутствии аэрозолей // Светотехника. 2021. № 2. С. 44–49.
- Дель Агила А., Ефременко Д.С., Траутманн Т.* Обзор методов снижения размерности при обработке гиперспектральных оптических сигналов // Светотехника. 2019. № 4. С. 60–70.
- Ефременко Д.С.* Модель переноса излучения на основе метода дискретных ординат с вычислением собственных значений с помощью нейронной сети: доказательство концепции // Светотехника. 2021. № 1. С. 64–68.
- Журавлева Т.Б.* Влияние формы и размеров кристаллических частиц на угловые распределения пропущенной солнечной радиации в двух геометрических схемах зондирования: результаты численного моделирования // Оптика атмосферы и океана. 2020. Т. 33. № 10. С. 798–804.
- Журавлева Т.Б.* Имитационное моделирование полей яркости солнечной радиации в присутствии оптически анизотропной кристаллической облачности: алгоритм и результаты тестирования // Оптика атмосферы и океана. 2020. Т. 33. № 12. С. 937–943.
- Журавлева Т.Б., Насртдинов И.М.* Влияние микроструктуры и горизонтальной неоднородности разорванной кристаллической облачности на средние потоки солнечной радиации в видимой области спектра: результаты численного моделирования // Оптика атмосферы и океана. 2021. Т. 34. № 10. С. 792–802.
- Журавлева Т.Б., Насртдинов И.М., Коновалов И.Б., Гололушкин Н.А.* Радиационный форсинг дымового аэрозоля с учетом фотохимической эволюции его органической компоненты: влияние условий освещенности и альбедо подстилающей поверхности // Оптика атмосферы и океана. 2022. Т. 35. № 09. С. 748–758.
- Заболотских Е.В.* Внешняя калибровка измерений российского спутникового микроволнового радиометра МТВ3А-ГЯ в каналах сканера. Часть 1. Моделирование // Метеорология и гидрология. 2021. № 10. С. 57–65.
- Заболотских Е.В., Балашова Е.А.* Внешняя калибровка измерений российского спутникового микроволнового радиометра МТВ3А-ГЯ в каналах сканера. Часть 2. Эксперимент // Метеорология и гидрология. 2021. № 11. С. 47–55.
- Задворных И.В., Грибанов К.Г., Захаров В.И., Itasu R.* Определение относительного содержания Н₂O в атмосфере по данным одновременных измерений спутника GOSAT-2 в тепловом и ближнем ИК-диапазонах // Оптика атмосферы и океана, 2022. Т. 35. № 12 (407). С. 999–1003.
- Зенкова П.Н., Терпугова С.А., Польшин Вас. В., Польшин В.В., Ужegov В.Н., Козлов В.С., Яушева Е.П., Панченко М.В.* Развитие эмпирической модели оптических характеристик аэрозоля Западной Сибири. // Оптика атмосферы и океана. 2021. Т. 34. № 3. С. 192–198.
- Зенкова П.Н., Чернов Д.Г., Шмаргунов В.П., Панченко М.В., Белан Б.Д.* Субмикронный аэрозоль и поглощающее вещество в тропосфере российского сектора Арктики по данным измерений самолета-

- лаборатории Ту-134 “Оптик” в 2020 г. // Оптика атмосферы и океана. 2021. Т. 34. № 11. С. 882–890.
- Ивахов В.М., Парамонова Н.Н., Привалов В.И., Зинченко А.В., Лоскутова М.А., Макитас А.П., Кустов В.А., Лаурилла Т., Аурела М., Асми Э.* Атмосферная концентрация диоксида углерода на станциях Тикси и Мыс Баранова в 2010–2017 гг. // Метеорология и гидрология. 2019. № 4. С. 110–122.
- Ионов Д.В., Поберовский А.В.* Изменчивость содержания оксидов азота в приземном слое атмосферы по данным наблюдений в Петергофе // Метеорология и Гидрология. 2020. № 10. С. 73–81.
- Ионов Д.В., Привалов В.И.* Методика дифференциальной спектроскопии DOAS в задаче определения общего содержания озона из измерений наземного ультрафиолетового спектрометра УФОС. Оптика атмосферы и океана. 2021. № 11. С. 842–848.
- Катаев М.Ю., Даданова М.М.* Методика распознавания растительности на основе цветового и текстурного анализа RGB изображений // Светотехника. 2019. № 2. С. 34–39.
- Катаев М.Ю., Даданова М.М., Ефременко Д.С.* Коррекция освещенности многовременных RGB-изображений, получаемых с помощью беспилотного летательного аппарата // Светотехника. 2020. № 6. С. 19–25.
- Катаев М.Ю., Карташов Е.Ю., Карпов Р.К.* Методика оценки цветового качества производства кирпичной продукции на основе RGB-изображений // Светотехника. 2022. № 3. С. 63–67.
- Козлов Д.А., Завелевич Ф.С., Тимофеев Ю.М., Поляков А.В., Козлов И.А., Черкашин И.С.* Интеркалибровка бортовых инфракрасных фурье-спектрометров SI-1 и ИКФС-2 // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 6. С. 72–80.
- Козлов Д.А., Козлов И.А., Успенский А.Б., Рублев А.Н., Тимофеев Ю.М., Поляков А.В., Колесников М.В.* Оценка ковариационной матрицы шума в измерениях бортового инфракрасного фурье-спектрометра ИКФС-2 // Исследования Земли из космоса. 2022. № 1. С. 53–67.
- Коношонкин А.В., Кустова Н.В., Шишко В.А., Тимофеев Д.Н., Кан Н., Ткачев И.В., Боровой А.Г., Коханенко Г.П., Балин Ю.С.* Расчет сигнала сканирующего лидара при зондировании перистых облаков, содержащих преимущественно горизонтально ориентированные кристаллы. // Оптика атмосферы и океана. 2023. Т. 36. № 2. С. 116–121.
- Косторная А.А., Рублев А.Н., Голомолзин В.В.* Определение влагосодержания в безоблачной атмосфере над океаном по измерениям микроволнового радиометра МТВЗА-ГЯ // Вычислительные технологии. 2020. Т. 25. № 4. С. 83–98.
- Крамарева Л.С., Андреев А.И., Блощинский В.Д. и др.* Использование нейронных сетей в задачах гидрометеорологии // Вычислительные технологии. 2019. Т. 24. № 6. С. 50–59.
- Кучма М.О., Блощинский В.Д.* Алгоритм атмосферной коррекции коротковолновых каналов прибора МСУ-МР спутника “Метеор-М” // Исследование земли из космоса. 2019. № 6. С. 3–12.
- Кучма М.О., Холодов Е.И., Амельченко Ю.А.* Двухканальный алгоритм определения аэрозольной оптической толщины над морской поверхностью по данным прибора МСУ-МР спутника “Метеор-М” № 2 // Исследования Земли из космоса. 2022. № 2. С. 88–94.
- Кучма М.О., Шамилова Ю.А.* Оперативное детектирование областей потенциального тумана по данным геостационарного спутника Himawari-8 // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2022. № 3 (385). С. 113–126.
- Макарова М.В., Сердюков В.И., Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Воронин Б.А., Никитин А.В., Щербаков А.П., Гриднев Ю.В.* Первый комплексный эксперимент по определению элементов вертикального распределения метана в тропосфере Западной Сибири по солнечным спектрам с использованием Фурье-спектрометра FTS 125M и натурных измерений с борта самолета-лаборатории // Оптика атмосферы и океана. 2020. Т. 33. № 9. С. 728–734.
- Маричев В.Н., Бочковский Д.А.* Лидарный комплекс малой станции высотного зондирования атмосферы ИОА СО РАН // Оптика атмосферы и океана. 2020. Т. 33. № 5. С. 399–406.
- Маричев В.Н., Бочковский Д.А., Елизаров А.И.* Оптические характеристики стратосферного аэрозоля Западной Сибири по результатам лидарного мониторинга в 2010–2021 гг. // Оптика атмосферы и океана. 2022. Т. 35. № 9. С. 717–721.
- Невзоров А.В., Долгий С.И., Макеев А.П., Ельников А.В.* Результаты лидарных наблюдений аэрозоля от лесных пожаров Северной Америки в стратосфере над Томском в конце лета и осенью 2017г. // Оптика атмосферы и океана. 2019. Т. 32. № 02. С. 162–167.
- Неробелов Г.М., Аль-Субариа О.Х., Тимофеев Ю.М., Виролainen Я.А., Поберовский А.В., Соломатникова А.А.* Сравнения результатов наземных измерений общего содержания озона вблизи Санкт-Петербурга // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2022а. Т. 58. № 5. С. 1–7.
- Неробелов Г.М., Тимофеев Ю.М.* Оценки эмиссий и поглощения CO₂ водной поверхностью вблизи мегаполиса Санкт-Петербурга // Оптика атмосферы и океана. 2021. Т. 34. № 5. С. 374–379.
- Неробелов Г.М., Тимофеев Ю.М., Смышляев С.П., Виролainen Я.А., Макарова М.В., Фока С.Ч.* Сопоставление данных SAMS по содержанию CO₂ с результатами измерений в Петергофе // Оптика атмосферы и океана. 2020. Т. 33. № 10. С. 805–810.
- Неробелов Г.М., Тимофеев Ю.М., Поберовский А.В., Филиппов Н.Н., Имхасин Х.Х.* Наземные спектроскопические измерения общего содержания аммиака в районе Санкт-Петербурга // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2022б. Т. 58. № 6. С. 658–66
- Нерушев А.Ф., Вишератин К.Н., Ивангородский Р.В.* Статистическая модель временной изменчивости характеристик высотных струйных течений северного полушария на основе спутниковых измерений // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2021а. Т. 57. № 4. С. 401–413.
- Нерушев А.Ф., Вишератин К.Н., Кулижникова Л.К., Ивангородский Р.В.* О связи температурных аномалий с характеристиками высотных струйных течений // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021б. Т. 18. № 1. С. 199–209.
- Нерушев А.Ф., Ивангородский Р.В.* Определение зон турбулентности в верхней тропосфере на основе

- спутниковых измерений // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 1. С. 205–215.
- Никитенко А.А., Неробелов Г.М., Тимофеев Ю.М., Поберовский А.В. Анализ наземных спектроскопических измерений содержания CO_2 в Петергофе // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 6. С. 57–70.
- Никитенко А.А., Тимофеев Ю.М., Березин И.А., Виротайнен Я.А., Поляков А.В. Анализ содержания CO_2 вблизи российских городов по спутниковым измерениям ОСО-2. // Оптика атмосферы и океана. 2020. Т. 33. № 7. С. 538–543.
- Никитенко А.А., Тимофеев Ю.М., Виротайнен Я.А., Неробелов Г.М., Поберовский А.В. Сравнения измерений стратосферного содержания CO_2 наземным и спутниковым методами // Оптика атмосферы и океана. 2022. Т. 35. № 3. С. 191–194.
- Панченко М.В., Кабанов М.В., Пхалагов Ю.А., Белан Б.Д., Козлов В.С., Сакерин С.М., Кабанов Д.М., Ужегов В.Н., Щелканов Н.Н., Польшкин В.В., Терпугова С.А., Толмачев Г.Н., Яушева Е.П., Аршинов М.Ю., Симоненков Д.В., Шмаргунов В.П., Чернов Д.Г., Турчинович Ю.С., Польшкин В.В., Журавлева Т.Б., Насртдинов И.М., Зенкова П.Н. Комплексные исследования тропосферного аэрозоля в ИОА СО РАН (этапы развития) // Оптика атмосферы и океана. 2019а. Т. 32. № 9. С. 703–716.
- Панченко М.В., Польшкин В.В., Польшкин В.В., Козлов В.С., Яушева Е.П., Шмаргунов В.П. Распределение по размерам “сухой основы” частиц в приземном слое атмосферы пригородного района г.Томска в рамках эмпирической классификации типов “аэрозольной погоды” // Оптика атмосферы и океана. 2019б. Т. 32. № 07. С. 539–547.
- Парамонова Н.Н., Привалов В.И., Ивахов В.М., Русина Е.Н., Боброва В.К., Соколенко Л.Г., Зайнетдинов Б.Г., Соломатникова А.А., Ромашикина К.И., Волохина Д.Ю., Вязанкин А.С., Цветкова Н.Д., Банкова Т.В., Кирюшов Б.М., Лукьянов А.Н., Глазков В.Н., Юшков В.А. Физические и химические характеристики атмосферы // В сборнике: Обзора фонового состояния окружающей природной среды на территории стран СНГ за 2019 г. Ежегодный обзор. Под редакцией Г.М. Черногаевой. Москва, 2020. С. 13–30.
- Покровский О.М. Изменение облачности в период глобального потепления по результатам международного спутникового проекта // Исследования Земли из космоса. 2019. № 1. С. 3–13.
- Покровский О.М. Когерентность колебаний компонентов глобальной климатической системы с медленными флуктуациями солнечной активности по данным наземных и спутниковых наблюдений // Исследования Земли из космоса. 2022. № 3. С. 1–14.
- Покровский О.М., Покровский И.О. Идентификация фундаментального климатического колебания с помощью вейвлет – анализа комбинированных данных наземных и спутниковых наблюдений // Исследования Земли из космоса. 2020. № 6. С. 59–72.
- Польшкин В.В., Панченко М.В. Временная изменчивость концентраций субмикронных и крупнодисперсных частиц в приземном слое атмосферы на Аэрозольной станции ИОА СО РАН г. Томска (2000–2020 гг.) // Оптика атмосферы и океана. 2022. Т. 35. № 6. С. 471–476.
- Польшкин В.В., Польшкин В.В., Панченко М.В. Многолетние наблюдения ореолевой индикатрисы рассеяния в приземном слое пригорода Томска (2010–2021 гг.) // Оптика атмосферы и океана. 2022б. Т. 35. № 12. С. 987–992.
- Поляков А.В., Поберовский А.В., Виротайнен Я.А., Макарова М.В. Методика обращения спектров прозрачности для оценки содержания фреона CCl_3F в атмосфере. // Журнал прикладной спектроскопии. 2020. Т. 86. № 1. С. 108–115.
- Поляков А.В., Тимофеев Ю.М., Виротайнен Я.А., Козлов Д.А. Мониторинг общего содержания озона в атмосфере с использованием российской аппаратуры ИКФС-2 // Журнал прикладной спектроскопии. 2019. Т. 86. № 4. С. 597–601.
- Поляков А.В., Виротайнен Я.А., Макарова М.В. Методика обращения спектров прозрачности для оценки содержания фреона CCl_2F_2 в атмосфере // Журнал прикладной спектроскопии. 2019. Т. 86. № 3. С. 417–424.
- Радионова В.Ф., Кабанов Д.М., Польшкин В.В., Сакерин С.М., Изосимова О.Н. Характеристики аэрозоля над арктическими морями Евразии: результаты измерений 2018 г. и среднее пространственное распределение в летне-осенние периоды 2007–2018 гг. // Проблемы Арктики и Антарктики. 2019. Т. 65. № 4. С. 405–421.
- Ракитин В.С., Еланский Н.Ф., Скороход А.И., Джола А.В., Ракитина А.В., Шилкин А.В., Кириллова Н.С., Казаков А.В. Долговременные тенденции общего содержания окиси углерода в атмосфере Московского мегаполиса // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2021. Т. 57. № 1. С. 126–136.
- Сакерин С.М., Голобокова Л.П., Кабанов Д.М., Калашникова Д.А., Козлов В.С., Круглинский И.А., Макаров В.И., Макштас А.П., Попова С.А., Радионова В.Ф., Симонова Г.В., Турчинович Ю.С., Ходжер Т.В., Хуриганова О.И., Чанкина О.В., Чернов Д.Г. Результаты измерений физико-химических характеристик атмосферного аэрозоля на научно-исследовательском стационаре “Ледовая база “Мыс Баранова” в 2018 г. // Оптика атмосферы и океана. 2019. Т. 32. № 6. С. 421–429.
- Сакерин С.М., Круглинский И.А., Кабанов Д.М., Калашникова Д.А., Кравчишина М.Д., Макаров В.И., Попова С.А., Почуфаров А.О., Симонова Г.В., Турчинович Ю.С., Дарьин Ф.А. Пространственно-временная изменчивость характеристик атмосферного аэрозоля над Карским, Баренцевым, Норвежским и Гренландским морями (экспедиции 2018–2021 гг.) // Оптика атмосферы и океана. 2022. Т. 35. № 6. С. 447–455.
- Сердюков В.И., Сеница Л.Н., Емельянов Н.М. Исследование R-ветви полосы $3\nu_3$ $^{13}\text{CH}_4$ в области от 9000 до 9200 cm^{-1} . // Оптика атмосферы и океана. 2022. Т. 35. № 8. С. 619–625.
- Сердюков В.И., Сеница Л.Н., Луговской А.А., Емельянов Н.М. Охлаждаемая жидким азотом оптическая кювета для исследования спектров поглощения на Фурье-спектрометре // Оптика атмосферы и океана. 2020. Т. 33. № 2. С. 146–152.
- Сибир Е.Е., Радионова В.Ф., Русина Е.Н. База данных часовых и суточных сумм суммарной радиации на российских антарктических станциях: анализ из-

- менения суммарной радиации за весь период наблюдений в Антарктиде // Проблемы Арктики и Антарктики. 2021. Т. 67. № 3. С. 249–260.
- Сибир Е.Е., Радионов В.Ф., Русина Е.Н.* Результаты многолетних наблюдений за общим содержанием озона в Антарктиде и над акваториями Атлантического и Южного океанов Метеорология и Гидрология. 2020. Т. 3. С. 33–43.
- Симонова А.А.* Механизмы формирования спектра континуального поглощения водяного пара в ИК полосах поглощения молекулы воды: дис. канд. физ.-мат. наук: 01.04.05. – ИОА СО РАН, Томск, 2022 – 148 с.
- Симонова А.А., Пташник И.В.* Вклад димеров воды в континуальное поглощение чистого водяного пара в полосах фундаментальных изгибного и валентного колебаний молекулы воды // Оптика атмосферы и океана. 2022. Т. 35. № 1. С. 5–11.
- Симонова А.А., Пташник И.В.* Вклад погрешностей параметров линий поглощения водяного пара в определение континуального поглощения в полосах 0.94 и 1.13 мкм. // Оптика атмосферы и океана. 2019. Т. 32. № 3. С. 175–177.
- Синица Л.Н., Сердюков В.И., Луговской А.А.* Спектр поглощения полосы (0120)–(0000) I^3CN_4 при низкой температуре. Идентификация спектра // Оптика атмосферы и океана. 2020. Т. 33. № 9. С. 668–676.
- Скорород А.И., Ракитин В.С., Кириллова Н.С.* Влияние мер по сдерживанию пандемии COVID-19 и метеорологических условий на состав атмосферного воздуха в Москве в 2020 г. // Метеорология и гидрология. 2022. № 3. С. 36–46.
- Скорородов А.В., Курьянович К.В.* Использование данных CALIOP для оценки высоты нижней границы облаков на спутниковых снимках MODIS // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022а. Т. 19. № 2. С. 43–56.
- Скорородов А.В., Курьянович К.В.* Использование данных CloudSatCPR для повышения эффективности нейросетевого подхода к восстановлению высоты нижней границы облаков на спутниковых снимках Aqua MODIS // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса 2022б. Т. 19. № 5. С. 63–75.
- Солдатенко С.А., Колман Р.А.* Влияние обратных связей и тепловой инерции климатической системы на спектр мощности флуктуаций приповерхностной температуры по данным ансамбля моделей проекта SMIP5 и малопараметрических моделей // Известия Российской Академии наук. Физика атмосферы и океана, 2022. Т. 58. № 2. С. 230–232.
- Соломатникова А.А., Волохина Д.Ю., Жукова М.П.* Особенности состояния озонового слоя над регионами РФ // Обзор состояния и загрязнения окружающей среды в Российской Федерации за 2021 год. Росгидромет, 2022. С. 36–39.
- Соломатникова А.А., Ромашкина К.И., Волохина Д.Ю.* Особенности состояния озонового слоя над регионами РФ // Обзор состояния и загрязнения окружающей среды в Российской Федерации за 2019 год. Росгидромет. 2020. С. 36–39.
- Тарасенков М.В., Зонов М.Н., Белов В.В., Энгель М.В.* Пассивное спутниковое зондирование земной поверхности в просветы облачных полей // Оптика атмосферы и океана. 2021б. Т. 34. № 8. С. 621–628.
- Тарасенков М.В., Зонов М.Н., Энгель М.В., Белов В.В.* Оценка влияния разорванной облачности на восстановление коэффициентов отражения безоблачных участков земной поверхности по снимкам прибора MODIS // Метеорология и гидрология. 2021а. № 11. С. 36–46.
- Тентюков М.П., Лютюев В.П., Белан Б.Д., Симоненков Д.В., Головатая О.С.* Детектор ультрафиолетового излучения на основе ультрадисперсного оксида магния с кристаллической структурой периклаза // Оптика атмосферы и океана. 2021. Т. 34. № 11. С. 916–923.
- Тимофеев Ю.М., Виролайн Я.А., Поляков А.В.* Оценки вариаций радиационного форсинга для углекислого газа в последнее столетие и в будущем // Оптика атмосферы и океана. 2019. Т. 32. № 10. С. 856–859.
- Тимофеев Ю.М., Неробелов Г.М., Поляков А.В., Виролайн Я.А.* Спутниковый мониторинг озоносферы // Метеорология и гидрология. 2021. № 12. С. 71–79.
- Тимофеев Ю.М., Поляков А.В., Виролайн Я.А., Макарова М.В., Ионов Д.В., Поберовский А.В., Имхасин Х.Х.* Оценки трендов содержания климатически важных атмосферных газов вблизи Санкт-Петербурга // Известия РАН. Физика атмосферы и океана 2020а. Т. 56. № 1. С. 97–103.
- Тимофеев Ю.М., Березин И.А., Виролайн Я.А., Макарова М.В., Никитенко А.А.* Анализ мезомасштабных вариаций содержания углекислого газа вблизи мегаполиса Москвы по спутниковым данным // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019б. Т. 16. № 4. С. 263–270.
- Тимофеев Ю.М., Березин И.А., Виролайн Я.А., Поберовский А.В., Макарова М.В., Поляков А.В.* Оценки антропогенных эмиссий CO_2 для Москвы и Санкт-Петербурга по данным спутниковых измерений ОСО-2 // Оптика атмосферы и океана. 2020а Т. 33. № 4. С. 261–265.
- Тимофеев Ю.М., Березин И.А., Виролайн Я.А., Макарова М.В., Поляков А.В., Поберовский А.В., Филиппов Н.Н., Фока С.Ч.* Пространственно-временные вариации содержания CO_2 по данным спутниковых и наземных измерений вблизи Санкт-Петербурга // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2019а. Т. 55. № 1. С. 65–72.
- Тимофеев Ю.М., Неробелов Г.М., Поберовский А.В., Филиппов Н.Н.* Определение содержания CO_2 в тропосфере и стратосфере наземным ИК методом. // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. Т. 57. № 3. С. 322–333.
- Тимофеев Ю.М., Неробелов Г.М., Виролайн Я.А., Поберовский А.В., Фока С.Ч.* Оценки антропогенных эмиссий CO_2 мегаполиса Санкт-Петербурга // Доклады РАН. Науки о Земле. 2020в. Т. 494. № 1. С. 97–100.
- Тимофеев Ю.М., Березин И.А., Виролайн Я.А., Макарова М.В., Поляков А.В., Поберовский А.В., Филиппов Н.Н., Фока С.Ч.* Пространственно-временные вариации содержания CO_2 по данным спутниковых и наземных измерений вблизи Санкт-Петербурга // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2019. Т. 55. № 1. С. 65–72.
- Тимофеев Ю.М., Филиппов Н.Н., Поберовский А.В.* Анализ информативности и вертикального разрешения наземного спектроскопического ИК-метода

- определения вертикальной структуры CO₂ // Оптика атмосферы и океана. 2020б. Т. 33. № 11.
- Тимофеев Ю.М., Неробелов Г.М., Поберовский А.В. Экспериментальные оценки интегральных антропогенных эмиссий CO₂ города Санкт-Петербурга // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2022. Т. 58. № 3. С. 282–291.
- Тимофеев Ю.М., Поляков А.В., Виролайнен Я.А., Делер В., Эртель Д., Шпенкух Д. Первые спутниковые измерения содержания углекислого газа в земной атмосфере (1977 и 1979 гг., спутник “МЕТЕОР”, прибор SI-1) // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2020б. Т. 56. № 4. С. 458–461.
- Успенский А.Б. 60 лет спутниковой метеорологии // Метеорология и гидрология. 2021. № 12. С. 5–10.
- Успенский А.Б. Измерения распределения содержания парниковых газов в атмосфере со спутников // Фундаментальная и прикладная климатология. 2022. Т. 8. № 1. С. 122–144.
- Успенский А.Б., Рублев А.Н., Козлов Д.А., Голомолзин В.В., Киселева Ю.В., Козлов И.А., Никулин А.Г. Мониторинг основных климатических переменных атмосферы по данным спутникового ИК-зондирования ИКФС-2 // Метеорология и гидрология. 2022. № 11. С. 5–18.
- Успенский А.Б., Тимофеев Ю.М., Козлов Д.А., Черный И.В. Развитие методов и средств дистанционного температурно-влажностного зондирования земной атмосферы // Метеорология и гидрология. 2021. № 12. С. 33–44.
- Устинов В.П., Баранова Е.Л., Вишератин К.Н., Грачев М.И., Кальсин А.В. Вариации окиси углерода в атмосфере Антарктиды по данным наземных и спутниковых измерений // Исследование Земли из космоса. 2019. № 2. С. 97–106.
- Устинов В.П., Баранова Е.Л., Вишератин К.Н., Грачев М.И., Кальсин А.В. Вариации метана в атмосфере Антарктиды в 2009–2017 гг. по данным наземных и спутниковых измерений // Проблемы Арктики и Антарктики. 2020. Т. 66. № 1. С. 66–81.
- Филей А.А. Восстановление высоты верхней границы облачности по данным спутникового прибора МСУ-МР КА “Метеор-М” № 2 // Оптика атмосферы и океана. 2020а. Т. 33. № 12. С. 918–925.
- Филей А.А. Восстановление оптической толщины и эффективного радиуса частиц облачности по данным дневных измерений спутникового радиометра МСУ-МР // Оптика атмосферы и океана. 2019. Т. 32. № 8. С. 650–656.
- Филей А.А. Построение моделей оптических параметров вулканических облаков для задач дистанционного зондирования Земли из космоса. // Оптика атмосферы и океана. 2020б. Т. 33. № 2. С. 127–134.
- Филей А.А., Андреев А.И., Кучма М.О., Успенский А.Б. Применение искусственных нейронных сетей для определения общего содержания водяного пара в атмосфере по данным микроволнового радиометра МТВЗА-ГЯ со спутника “Метеор-М” № 2-2 // Метеорология и гидрология. 2022. № 4. С. 34–45.
- Филей А.А., Андреев А.И., Успенский А.Б. Использование искусственных нейронных сетей для восстановления температурно-влажностного состояния атмосферы по данным спутникового микроволнового радиометра МТВЗА-ГЯ КА Метеор-М № 2-2 // Исследование Земли из космоса. 2021. № 6. С. 83–95.
- Филей А.А., Давиденко А.Н., Киселева Ю.В., Козлов Д.А., Холодов Е.И. Оценка точности температурно-влажностного зондирования атмосферы по данным фурье-спектрометра на ИСЗ “Метеор-М” № 2 // Метеорология и гидрология. 2019. № 3. С. 110–118.
- Филей А.А., Маренцо Ф. Восстановление параметров вулканического пепла по спутниковым данным // Метеорология и гидрология. 2021. № 4. С. 86–101.
- Фирсов К.М., Чеснокова Т.Ю., Размолов А.А. Влияние аэрозоля и облаков на характеристики подстилающей поверхности, измеряемые Sentinel-2A в регионе Нижнего Поволжья // Оптика атмосферы и океана. 2021. Т. 34. № 04. С. 285–291.
- Фирсов К.М., Чеснокова Т.Ю., Размолов А.А. Влияние континуального поглощения паров воды на радиационный форсинг углекислого газа в атмосфере для региона нижнего Поволжья // Оптика атмосферы и океана. 2022. Т. 35. № 12. С. 1029–1035.
- Фомин Б.А., Колокутин Г.Э. Новая спектроскопическая база HITRAN-2016 в полинейных моделях, применяемых в дистанционном зондировании Земли методами инфракрасной спектроскопии // Современные проблемы дистанционного зондирования земли из космоса. 2019. Т. 16. № 1. С. 17–24.
- Фролова Е.А., Нестеров Е.С., Салагина А.А. Использование данных МСУ – ГС КА “Арктика М” № 1 для мониторинга и анализа мезомасштабных циклонов в Арктическом регионе // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 4. С. 293–305.
- Цырульников М.Д., Гайфулин Д.Р., Свиренко П.И., Успенский А.Б. Усвоение данных спутниковых метеорологических наблюдений в Гидрометцентре России // Метеорология и гидрология. 2021. № 12. С. 80–93.
- Цырульников М.Д., Свиренко П.И., Гайфулин Д.Р., Горбунов М.Е., Успенский А.Б. Развитие системы оперативного усвоения данных метеорологических наблюдений в Гидрометцентре России // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2019. № 4. С. 112–126.
- 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.
- Черненко А.Ю., Кострыкин С.В. Оценка радиационного форсинга от загрязнения снега черным углеродом по данным климатической модели // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2021. Т. 57. № 2. С. 146–155.
- Чеснокова Т.Ю., Фирсов К.М., Размолов А.А. Вклад континуального поглощения водяного пара в радиационный баланс атмосферы при наличии перистых облаков // Оптика атмосферы и океана. 2018. Т. 31. № 9. С. 743–751.
- Чеснокова Т.Ю., Макарова М.В., Ченцов А.В., Воронина Ю.В., Захаров В.И., Рокотян Н.В., Langerock V. Определение содержания монооксида углерода в атмосфере из атмосферных спектров высокого разрешения. // Оптика атмосферы и океана. 2019. Т. 32. № 4. С. 257–265.
- Чубарова Н.Е., Розенталь В.А., Жданова Е.Ю., Полюхов А.А. Новый радиационный комплекс Метеоро-

- логической обсерватории МГУ стандарта BSRN: методические аспекты и первые результаты измерений // Оптика атмосферы и океана. 2022. Т. 35. № 8. С. 670–678.
- Чупров И.А., Константинов Д.Н., Ефременко Д.С., Земляков В.В., Гао Ц. Решение уравнения переноса излучения для вертикально неоднородных сред методами численного интегрирования: сравнительный анализ // Светотехника. 2022. № 4. С. 63–70.
- Чурсин В.В., Кужевская И.В. Выделение с помощью нейронных сетей вероятностных зон развития грозы по данным спутникового зондирования // Географические исследования. 2022. № 3. С. 162–171.
- Швецов А.А., Беликович М.В., Красильников А.А., Куликов М.Ю., Кукин Л.М., Рыскин В.Г., Большаков О.С., Леснов И.В., Щитов А.М., Фейгин А.М., Хайкин В.Б., Петров И.В. Спектрорадиометр 5-миллиметрового диапазона для исследования атмосферы и подстилающей поверхности // Приборы и техника эксперимента. 2020. № 6. С. 100–104.
- Afanas'ev V.P., Vasov A.Yu., Budak V.P., Efremenko D.S., Kokhanovsky A.A. Analysis of the Discrete Theory of Radiative Transfer in the Coupled “Ocean–Atmosphere” System: Current Status, Problems and Development Prospects // Journal of Marine Science and Engineering. 2020. V. 8. Art. 202.
- Alberti C., Tu O., Hase F., Makarova M.V., Gribanov K., Foka S.C., Zakharov V., Blumenstock T., Buchwitz M., Diekmann C., Ertl B., Frey M.M., Imhasin H.K., Ionov D.V., Khosrawi F., Osipov S.I., Reuter M., Schneider M., and Warneke T. Investigation of spaceborne trace gas products over St Petersburg and Yekaterinburg, Russia, by using COllaborative Column Carbon Observing Network (COCCON) observations Atmos. Meas. Tech. 2022. V. 15. P. 2199–2229.
- Antokhin P.N., Arshinova V.G., Arshinov M.Yu., Belan B.D., Belan S.B., Golobokova L.P., Davydov D.K., Ivlev G.A., Kozlov A.V., Kozlov A.S., Otmakhov V.I., Rasskazchikova T.M., Simonenkov D.V., Tolmachev G.N., Fofonov A.V. Change in the Air Composition upon the Transition from the Troposphere to the Stratosphere // Atmospheric and Oceanic Optics. 2021. V. 34. № 6. P. 567–576.
- Arshinov M.Yu., Arshinova V.G., Belan B.D., Davydov D.K., Ivlev G.A., Kozlov A.S., Kuibida L.V., Rasskazchikova T.M., Simonenkov D.V., Tolmachev G.N. and Fofonov A.V. Anomalous Vertical Distribution of Organic Aerosol over the South of Western Siberia in September 2018 // Atmospheric and Oceanic Optics. 2021. V. 34. № 5. P. 495–502.
- Balugin N.V., Fomin B.A., Lykov A.D., Yushkov V.A. Stratospheric Radiation Budget According to Optical Balloon Backscatter Probe and Radiation Modeling // (2022) Russian Meteorology and Hydrology. 2022. V. 47. № 10. P. 812–817.
- Belan B.D., Ancellet G., Andreeva I.S., Antokhin P.N., Arshinova V.G., Arshinov M.Y., Balin Y.S., Barsuk V.E., Belan S.B., Chernov D.G., Davydov D.K., Fofonov A.V., Ivlev G.A., Kotel'nikov S.N., Kozlov A.S., Kozlov A.V., Law K., Mikhal'chishin A.V., Moseikin I.A., Nasonov S.V., Néédélec P., Okhlopko O.V., Ol'kin S.E., Panchenko M.V., Paris J.-D., Penner I.E., Ptashnik I.V., Rasskazchikova T.M., Reznikova I.K., Romanovskii O.A., Safatov A.S., Savkin D.E., Simonenkov D.V., Sklyadnaya T.K., Tolmachev G.N., Yakovlev S.V., Zenkova P.N. Integrated airborne investigation of the air composition over the Russian sector of the Arctic // Atmos. Meas. Tech. 2022. V. 15. № 13. P. 3941–3967.
- Belikovich M.V., Kulikov M.Yu., Makarov D.S., Skalyga N.K., Ryskin V.G., Shvetsov A.A., Krasil'nikov A.A., Dementyeva S.O., Serov E.A., Feigin A.M. Long-term Observations of Microwave Brightness Temperatures over a Metropolitan Area: Comparison of Radiometric Data and Spectra Simulated with the use of Radiosonde Measurements // Remote Sensing. 2016. V. 13. P. 2021.
- Belikovich M.V., Makarov D.S., Serov E.A., Kulikov M.Y., Feigin A.M. Validation of Atmospheric Absorption Models within the 20–60 GHz Band by Simultaneous Radiosonde and Microwave Observations: The Advantage of Using ECS Formalism // Remote Sensing. 2022. V. 14. P. 6042.
- Belikovich M.V., Makarov D.S., Serov E.A., Kulikov M.Yu., Feigin A.M. Validation of atmospheric absorption models within the 20–60 GHz band by simultaneous radiosonde and microwave observations: the advantage of using ECS formalism // Remote Sensing. 2022. V. 14. P. 6042.
- Borkov Y.G., Solodov A.M., Solodov A.A., Perevalov V.I. Line intensities of the 01111–00001 magnetic dipole absorption band of $^{12}\text{C}_{16}\text{O}_2$: Laboratory measurements // Journal of Molecular Spectroscopy. 2021. V. 376. P. 111418.
- Chesnokova T.Yu., Chentsov A.V., Firsov K.M. Impact of spectroscopic information on total column water vapor retrieval in the near-infrared spectral region // Journal of Applied Remote Sensing. 2020. V. 14. № 3. P. 34510.
- Chesnokova T.Yu., Makarova M.V., Chentsov A.V., Kostsov V.S., Poberovskii A.V., Zakharov V.I., Rokotyan N.V. 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 // Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer. 2020. V. 254. P. 107187.
- Chistikov D.N., Finenko A.A., Kalugina Y.N., Lokshtanov S.E., Petrov S.V., Vigasin A.A. Simulation of collision-induced absorption spectra based on classical trajectories and ab initio potential and induced dipole surfaces. II. CO_2 –Ar rototranslational band including true dimer contribution // The Journal of Chemical Physics. 2021. V. 155. P. 064301.
- Chistikov D.N., Finenko A.A., Lokshtanov S.E., Petrov S.V., and Vigasin A.A. Simulation of collision-induced absorption spectra based on classical trajectories and ab initio potential and induced dipole surfaces. I. Case study of N_2 – N_2 rototranslational band // Journal of Chemical Physics. 2019. V. 151. P. 194106.
- Chubarova N.Y., Androsova Y.Y., Lezina Y.A. The Dynamics Of The Atmospheric Pollutants During The Covid-19 Pandemic 2020 And Their Relationship With Meteorological Conditions In Moscow // GEOGRAPHY, ENVIRONMENT, SUSTAINABILITY. 2021a. V. 14. № 4. P. 168–182.
- Chubarova N.E., Vogel H., Androsova E.E., Kirsanov A.A., Popovicheva O.B., Vogel B., and Rivin G.S. Columnar and surface urban aerosol in the Moscow megacity according to measurements and simulations with the COSMO-ART model // Atmos. Chem. Phys. 2022. V. 22. P. 10443–10466.
- Chubarova N.E., Poliukhov A.A., Volodin E.M. Improving the Calculation of the Sulfate Aerosol Evolution and

- Radiative Effects in the Institute of Numerical Mathematics, Russian Academy of Sciences, Climate Model. *Izv. Atmos. Ocean. Phys.* 2021b. V. 57. P. 370–378.
- 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.
- Chulichkov A.I., Nikitin S.V., Borovski A.N., Postlyakov O.V. Computer-aided measuring system based on an artificial neural network for estimating atmospheric parameter // *Proc. IEEE, 2021 International Conference on Information Technology and Nanotechnology (ITNT)/ 20-24 Sept. 2021. ISBN:978-1-6654-3217-7.*
- Vigouroux C., Langerock B., Aquino C.A.B., Blumenstock T., Cheng Z., De Maziere M., De Smedt I., Grutter M., Hannigan J.W., Jones N., Kivi R., Loyola D., Lutsch E., Mahieu E., Makarova M., Metzger J.-M., Morino I., Murata I., Nagahama T., Notholt J., Ortega I., Palm M., Pinardi G., Rohling A., Smale D., Stremme W., Strong K., Sussmann R., Te Y., van Roozendael M., Wang P., and Winkler H. TROPOMI–Sentinel-5 Precursor formaldehyde validation using an extensive network of ground-based Fourier-transform infrared stations // *Atmos. Meas. Tech.* 2020. V. 13. № 1. P. 3751–3767.
- Davydova M.A., Elansky N.F., Zakharova S.A., Postlyakov O.V. Application of a Numerical-Asymptotic Approach to the Problem of Restoring the Parameters of a Local Stationary Source of Anthropogenic Pollution // *Doklady Mathematics.* 2021. V. 103. № 1. P. 26–31.
- del Águila A., Efremenko D.S., García V.M., Kataev M.Y. Cluster low-streams regression method for hyperspectral radiative transfer computations: Cases of O₂ a-And CO₂ bands // *Remote Sensing.* 2020. V. 12. № 8. P. 1250.
- Dombrovsky L.A., Fedorets A.A., Levashov V.Y., Kryukov A.P., Bormashenko E., Nosonovsky M. Modeling evaporation of water droplets as applied to survival of airborne viruses // *Atmosphere.* 2020. V. 11. № 8. P. 965.
- Dudaryonok A., Buldyreva J., Lavrentieva N., Troitsyna L. Temperature-dependence parameters for CH₃I-O₂ and CH₃I-air line-broadening coefficients // *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer.* 2022. V. 277. P. 108164.
- Dudaryonok A.S., Buldyreva J.A., Lavrentieva N.N., Troitsyna L. Temperature-dependence exponents for CH₃I-N₂ line-broadening coefficients // *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer.* 2022. V. 277. P. 107956.
- Finenko A.A., Bézard B., Gordon I.E., Chistikov D.N., Lokshitanov S.E., Petrov S.V., Viasin A.A. Trajectory-based Simulation of Far-infrared Collision-induced Absorption Profiles of CH₄-N₂ for Modeling Titan's Atmosphere // *The Astrophysical Journal Supplement Series.* 2022. V. 258:33.
- Flourbaey H., Grilli R., Mondelain D., Kassi S., Yachmenev A., Yurchenko S.N., Campargue A. Electric-quadrupole and magnetic-dipole contributions to the v₂ + v₃ band of carbon dioxide near 3.3 μm // *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer.* 2021. V. 266. P. 107558.
- Fomin B.A. Efficient line-by-line technique for calculating accurate and compact spectral lookup tables for satellite remote sensing // (2021) *International Journal of Remote Sensing.* V. 42. № 8. P. 3074–3089.
- Golobokova L.P., Khodzher T.V., Izosimova O.N., Zenkova P.N., Pochyufarov A.O., Khuriganova O.I., Onishyuk N.A., Marinayte I.I., Polkin V.V., Radionov V.F., Sakerin S.M., Lisitzin A.P., Shevchenko V.P. Chemical Composition of Atmospheric Aerosol in the Arctic Region and Adjoining Seas along the Routes of Marine Expeditions in 2018–2019 // *Atmospheric and Oceanic Optics.* 2020. V. 33. № 5. P. 480–489.
- Gorbarenko E.V. Radiation Climate of Moscow // *Russian Meteorology and Hydrology, Allerton Press Inc. (United States).* 2020. V. 45. P. 478–487.
- Gorbarenko E.V. Sunshine Variability in Moscow in 1955–2017. *Russian Meteorology and Hydrology, Allerton Press Inc. (United States).* 2019. V. 44. № 6. P. 384–393.
- Gorchakov G.I., Buntov D.V., Karpov A.V., Kopeikin V.M., Mirsaitov S.F., Gushchin R.A. and Datsenko O.I. The Saltating Particle Aleurite Mode in Wind–Sand Flux over a Desertified Area // *Doklady Earth Sciences.* 2019a. V. 488. № 1. P. 1103–1106.
- 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. V. 35. № 2. P. 125–132.
- Gorchakov G.I., Karpov A.V., Gushchin R.A. Turbulent fluxes of the dust aerosol on the desertified area // *Doklady Earth Sciences.* 2020b. V. 494. P. 799–802.
- Gorchakov G.I., Karpov A.V., Gorchakova I.A., Gushchin R.A., and Datsenko O. I. Smog and Smoke Haze over the North China Plain in June 2007 // *Atmospheric and Oceanic Optics.* 2019. V. 32. № 6. P. 643–649.
- 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.* 2021a. V. 496. № 2. P. 119–124.
- 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.* 2021b. V. 57. № 5. P. 486–494.
- Gorchakov G.I., Karpov A.V., Gushchin R.A., Datsenko O.I., Buntov D.V. Stratification of Aleurite and Sand Particle Size Distribution in Windsand Flux over Desertified Areas // *Atmospheric and Oceanic Optics.* 2021. V. 34. № 5. P. 438–442.
- Gorchakov G.I., Kopeikin V.M., Karpov A.V., Gushchin R.A., Datsenko O.I., Buntov D.V. Dusty Plasma of a Wind–Sand Flux in Desertified Areas // *Atmospheric and Oceanic Physics.* 2022b. V. 58. № 5. P. 466–475
- Gorchakov G.I., Kopeikin V.M., Karpov A.V., Gushchin R.A., Datsenko O.I., Buntov D. V. Wind–Sand Flux Electrization over Desertified Areas // *Doklady Earth Sciences.* 2022a. Part 1. P. 483–488.
- Gorchakov G.I., Sitnov S.A., Karpov A.V., Gorchakova I.A., Gushchin R.A., Datsenko O.I. Eurasian Large-Scale Hazes in Summer 2016 // *Izv. Atmos. Ocean. Phys.* 2019b. V. 55. № 3. P. 261–270.
- Gorchakov G.I., Buntov D.V., Karpov A.V., Gushchin R.A., Datsenko O.I. Wind Effect on the Size Distribution of Saltating Particles // *Atmospheric and Oceanic Optics.* 2020a. V. 33. № 2. P. 198–205.
- Gordon I.E., Rothman L.S., Hargreaves R.J., Hashemi R., Karlovets E.V., Skinner F.M., Conway E.K., Hill C., Kochanov R.V., Tan Y., Wcislo P., Finenko A.A., Nelson K., Bernath P.F., Birk M., Boudon V., Campargue A., Chance K.V., Coustenis A., Drouin B.J., Flaud J.-M., Gamache R.R., Hodges J.T., Jacquemart D., Mlawer E.J., Nikitin A.V., Perevalov V.I., Rotger M., Tennyson J.,

- Toon G.C., Tran H., Tyuterev V.G., Adkins E.M., Baker A., Barbe A., Cane E., Csaszar A.G., Dudaryonok A., Egorov O., Fleisher A.J., Fleurbaey H., Foltynowicz A., Furtenbacher T., Harrison J.J., Hartmann J.-M., Horneman V.-M., Huang X., Karman T., Karns J., Kass S., Kleiner I., Kofman V., Kwabia-Tchana F., Lavrentieva N.N., Lee T.J., Long D.A., Lukashetskaya A.A., Lyulin O.M., Makhnev V.Yu., Matt W., Massie S.T., Melosso M., Mikhailenko S.N., Mondelain D., Mueller H.S.P., Naumenko O.V., Perrin A., Polyansky O.L., Raddaoui E., Raston P.L., Reed Z.D., Rey M., Richard C., Tobias R., Sadiek I., Schwenke D.W., Starikova E., Sung K., Tamassia F., Tashkun S.A., Vander Auwera J., Vasilenko I.A., Vigin A.A., Villanueva G.L., Vispoel B., Wagner G., Yachmenev A., Yurchenko S.N. The HITRAN2020 molecular spectroscopic database // *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer.* 2022. V. 277. P. 107949.
- Grebennikov V.S., Zubachev D.S., Korshunov V.A., Sakhigbareev D.G., Chernikh I.A. C. Observations of Stratospheric Aerosol at Rosgidromet Lidar Stations after the Eruption of the Raikoke Volcano in June 2019 // *Atmospheric and Oceanic Optics.* 2020. V. 33. № 5. P. 519–523.
- Gribanov K.G., Zadornykh I.V., Zakharov V.I. On the Feasibility of $^{13}\text{CO}_2$ Retrieval from the Spectra of Satellite Fourier Transform Spectrometers of the IASI/Metop Type // *Atmos. Ocean Opt.* 2021. V. 34. № 1. P. 1–5.
- Ionov D.V., Makarova M.V., Hase F., Foka S.C., Kostsov V.S., Alberti C., Blumenstock T., Warneke T., Virolainen Y.A. The CO_2 integral emission by the megacity of St Petersburg as quantified from ground-based FTIR measurements combined with dispersion modelling // *Atmos. Chem. Phys.* 2021. V. 21. P. № 14. P. 10939–10963.
- Ionov D.V., Makarova M.V., Kostsov V.S., Foka S.F. Assessment of the NO_x integral emission from the St. Petersburg megacity by means of mobile DOAS measurements combined with dispersion modelling // *Atmospheric Pollution Research.* 2022. V. 13. № 12. P. 101598.
- Ivanov V.N., Zubachev D.S., Korshunov V.A., Sakhigbareev D.G. Network lidar AK-3 for middle atmosphere sensing: design, methods of measurements, results. // *Proceedings of MGO.* 2020. V. 598. P. 155–187.
- Jacquemart D., Lyulin O.M., Solodov A.M., Petrova T.M., Solodov A.A. The Q-branch of $v_1 + v_3 + 3v_4$ band of $^{12}\text{C}_2\text{H}_2$ located at 8330 cm^{-1} // *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer.* 2022. V. 288. P. 108272.
- Kabanov D.M., Ritter C., Sakerin S.M. Interannual and seasonal variations in aerosol optical depth of the atmosphere in two regions of Spitsbergen Archipelago (2002–2018) // *Atmospheric Measurement Techniques.* 2020. V. 13. P. 5303–5317.
- Kabanov D.M., Sakerin S.M., Turchinovich Yu.S. Interannual and Seasonal Variations in the Atmospheric Aerosol Optical Depth in the Region of Tomsk (1995–2018) // *Atmospheric and Oceanic Optics.* 2019. V. 32. № 6. P. 663–670.
- Karpov A.V., Gorchakov G.I., Gushchin R.A., Datsenko O.I. Vertical Turbulent Dust-Aerosol Fluxes // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics.* 2021. V. 57. № 5. P. 495–503.
- Kazakov K.V., Vigin A.A. Vibrational magnetism and the strength of magnetic dipole transition within the electric dipole forbidden $v_2 + v_3$ absorption band of carbon dioxide // *Molecular Physics.* 2021. V. 119. P. e1934581.
- Konovalov I.B., Golovushkin N.A., Beekmann M., Panchenko M.V., Andreeva M.O. Inferring the absorption properties of organic aerosol in Siberian biomass burning plumes from remote optical observations // *Atmos. Meas. Tech.* 2021. V. 14. № 10. P. 6647–6673.
- Koroleva A.O., Odintsova T.A., Tretyakov M.Yu., Pirali O., Campargue A. The Foreign-Continuum Absorption of Water Vapour in the Far-Infrared ($50\text{--}500\text{ cm}^{-1}$) // *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer.* 2021. V. 261. P. 107486.
- Korshunov V.A. Lidar observations of stratospheric aerosols at Obninsk in 2012–2021: influence of volcanic eruptions and biomass burning // *Fundamental and Applied Climatology.* V. 8. № 3. P. 31–51.
- Korshunov V.A. Multiple scattering in cirrus clouds and taking it into account when interpreting lidar measurements in the stratosphere // *Atmospheric and Oceanic Optics.* 2022. V. 35. № 2. P. 151–157.
- Korshunov V.A., Zubachev D.S. Manifestation of Solar Activity Effects in Lidar Observations of Stratospheric Aerosol // *Geomagnetism and Aeronomy.* 2022. V. 62. № 1. P. 67–74.
- Korshunov V.A., Zubachev D.S. Characteristics of cirrus clouds from lidar measurements at Obninsk // *Proceeding of MGO.* 2021. V. 602. P. 68–78.
- Koshelev M.A., Golubyatnikov G.Yu., Vilkov I.N., Tretyakov M.Yu. Molecular Oxygen Fine Structure with Sub-kHz Accuracy // *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer.* 2022. V. 278. P. 108001.
- Koshelev M.A., Vilkov I.N., Makarov D.S., Tretyakov M.Yu., Rosenkranz P.W. Speed-Dependent Broadening of the O_2 Fine-Structure Lines // *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer.* 2021. V. 264. P. 107546.
- Koshelev M.A., Vilkov I.N., Makarov D.S., Tretyakov M.Yu., Vispoel B., Gamache R.R., Cimini D., Romano F., Rosenkranz P.W. Water Vapor Line Profile at 183 GHz: Temperature Dependence of Broadening, Shifting, and Speed-Dependent Shape Parameters // *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer.* 2021. V. 262. P. 107472.
- Kostsov V.S., Kniffka A., Stenge M., Ionov D.V. Cross-comparison of cloud liquid water path derived from observations by two space-borne and one ground-based instrument in Northern Europe // *Atmospheric Measurement Techniques.* 2019. V. 12. № 11. P. 5927–5946.
- Kostsov V.S., Ionov D.V., Kniffka A. Detection of the cloud liquid water path horizontal inhomogeneity in a coastline area by means of ground-based microwave observations: feasibility study // *Atmospheric Measurement Techniques.* 2020. V. 13. № 8. P. 4565–4587.
- Kouzov A.P., Sokolov A.V., Filippov N.N. Non-Markovian approach to pressure broadening of isolated lines in spectra of light rotators // *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer.* 2022. V. 278. P. 108043.
- Kreher K., Van Roozendaal M., Hendrick F., Apituley A., Dimitropoulou E., Frieß U., Richter A., Wagner T., Lampel J., Abuhassan N., Ang L., Angus M., Bais A., Benavent N., Bösch T., Bognar K., Borovski A., Bruchkouski I., Ced A., Chan K. L., Donne S., Drosoglou T., Fayt C., Finkenzeller H., Garcia-Nieto D., Gielen C., Gómez-Martín L., Hao N., Henzinger B., Herman J. R., Hermans C., Hoque S., Irie H., Jin J., Johnston P., Khayyam Butt J., Khokhar F., Koenig T.K., Kuhn J., Kumar V., Liu C., Ma J., Merlaud A., Mishra A.K., Müller M., Navarro-Comas M.,

- Ostendorf M., Pazmino A., Peters E., Pinardi G., Pinharranda M., Piters A., Platt U., Postlyakov O., Prados-Roman C., Puentedura O., Querel R., Saiz-Lopez A., Schönhardt A., Schreier S. F., Seyler A., Sinha V., Spinei E., Strong K., Tack F., Tian X., Tiefengraber M., Tirpitz J.-L., van Gent J., Volkamer R., Vrekoussis M., Wang S., Wang Z., Wenig M., Wittrock F., Xie P. H., Xu J., Yela M., Zhang C., Zhao X.* Intercomparison of NO₂, O₄, O₃ and HCHO slant column measurements by MAX-DOAS and zenith-sky UV-visible spectrometers during CINDI-2 // *Atmospheric Measurement Techniques*. 2020. V. 13. № 5. P. 2169–2208.
- Kulikov M. Yu., Belikovich M. V., Grygalashvyly M. et al.* Retrieving daytime distributions of O, H, OH, HO₂, and chemical heating rate in the mesopause region from satellite observations of ozone and OH* volume emission: The evaluation of the importance of the reaction H+O₃ → O₂ + OH in the ozone balance // *Advances in Space Research*. 2022a. V. 69. № 9. P. 3362–3373.
- Kulikov M. Y., Belikovich M. V., Feigin A. M.* The 2-day photochemical oscillations in the mesopause region: the first experimental evidence? // *Geophysical Research Letters*. 2021. V. 48. e2021GL092795.
- Kulikov M. Y., Belikovich M. V., Grygalashvyly M., Sonnenmsnn G. R., Feigin A. M.* The revised method for retrieving daytime distributions of atomic oxygen and odd-hydrogens in the mesopause region from satellite observations // *Earth Planets Space*. 2022b. V. 74. P. 44.
- Kulikov M. Yu. and Belikovich M. V.* Nighttime O (¹D) distributions in the mesopause region derived from SABER data // *Ann. Geophys.* 2020. V. 38. P. 815–822.
- Kulikov M. Yu., Feigin A. M., Schrems O.* H₂O₂ photoproduction inside H₂O and H₂O:O₂ ices at 20–140 K // *Scientific Reports*. 2019. V. 9. P. 11375.
- Kulikov M. Yu., Belikovich M. V., Skalyga N. K., Shatalina M. V., Demytyeva S. O., Ryskin V. G., Shvetsov A. A., Krasil'nikov A. A., Serov E. A., Feigin A. M.* Skills of Thunderstorm Prediction by Convective Indices over a Metropolitan Area: Comparison of Microwave and Radiosonde Data // *Remote Sensing*. 2020. V. 12. № 4. P. 604.
- Kulikov M. Yu., Nechaev A. A., Belikovich M. V., Vorobeva E. V., Grygalashvyly M., Sonnenmsnn 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 // *Geophysical Research Letters*. 2019. V. 46. № 2. P. 997–1004.
- Lavrentieva N. N., Dudaryonok A. S.* Nitrogen dioxide line shift coefficients induced by air pressure // *Molecular Physics*. 2022. V. 120. № 9. P. 2052370.
- Lutsch E., Strong K., Jones D. B. A., Blumenstock T., Conway S., Fisher J. A., Hannigan J. W., Hase F., Kasai Y., Mahieu E., Makarova M., Morino I., Nagahama T., Notholt J., Ortega I., Palm M., Poberovskii A. V., Sussmann R., Warneke T.* Detection and attribution of wildfire pollution in the Arctic and northern midlatitudes using a network of Fourier-transform infrared spectrometers and GEOS-Chem // *Atmos. Chem. Phys.* 2020. V. 20. № 21. P. 12813–12851.
- Makarov D. S., Tretyakov M. Yu., Rosenkranz P. W.* Revision of the 60-GHz Atmospheric Oxygen Absorption Band Models for Practical Use // *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*. 2020. V. 242. P. 106798.
- Makarova M. V., Alberti C., Ionov D. V., Hase F., Foka S. C., Blumenstock T., Warneke T., Virolainen Ya. A., Kostsov V. S., Frey M., Poberovskii A. V., Timofeyev Yu. M., Paramonova N. N., Volkova K. A., Zaitsev N. A., Biryukov E. Y., Osipov S. I., Makarov B. K., Polyakov A. V., Ivakhov V. M., Imhasin H. Kh., Mikhailov E. F.* Emission Monitoring Mobile Experiment (EMME): an overview and first results of the St. Petersburg megacity campaign-2019 // *Atmos. Meas. Tech.* 2021. V. 14. № 2. P. 1047–1073.
- Marichev V. N., Bochkovskii D. A.* Lidar monitoring of stratospheric aerosol over Tomsk in 2021 // *Proc. SPIE 12341*, 28th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics, 123417A. 2022a.
- Marichev V. N., Bochkovskii D. A.* Investigations of the thermal regime of the stratosphere over Tomsk in 2021 based on lidar monitoring // *Proc. SPIE 12341*, 28th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics, 123417B. 2022b.
- Marichev V. N., Bochkovskii D. A.* Lidar studies of winter stratospheric warming over Tomsk // *Proceedings of SPIE*. 2020. V. 11560. CID: 1156087.
- Mikhailov E. F., Pöhlker M. L., Reinmuth-Selzle K., Vlasenko S. S., Krüger O. O., Fröhlich-Nowoisky J., Pöhlker C., Ivanova O. A., Kiselev A. A., Kremper L. A., Pöschl, U.* Water uptake of subpollen aerosol particles: hygroscopic growth, cloud condensation nuclei activation, and liquid–liquid phase separation // *Atmos. Chem. Phys.* 2021. V. 21. № 9. P. 6999–7022.
- Mikhailov E. F., Vlasenko S. S.* High-humidity tandem differential mobility analyzer for accurate determination of aerosol hygroscopic growth, microstructure, and activity coefficients over a wide range of relative humidity // *Atmos. Meas. Tech.* 2020. V. 13. № 4. P. 2035–2056.
- Mukhartova Y. V., Davydova M. A., Elansky N. F. et al.* On application of nonlinear reaction-diffusion-advection models to simulation of transport of chemically - active impurities // *Proc. SPIE*. 11157, 111570X, 2019 (2 October 2019). <https://doi.org/10.1117/12.2535489>
- Mukhartova Y. V., Postlyakov O. V., Davydova M. A., Elansky N. F., Postlyakov O. V., Zakharova S. A., Borovski A. N.* High-detailed tropospheric transport of NO_x from ground sources: comparison of model data and satellite imagery // *Proc. SPIE*. 11859. 1185906. 2021.
- Nerobello G., Timofeyev Y., Smyshlyaev S., Foka S., Mammarella I., Virolainen Y.* Validation of WRF-Chem Model and CAMS Performance in Estimating Near-Surface Atmospheric CO₂ Mixing Ratio in the Area of Saint Petersburg (Russia) // *Atmosphere*. 2021. V. 12. № 3. P. 387.
- Nerobello G., Timofeyev Y., Virolainen Y., Polyakov A., Solomatnikova A., Poberovskii A., Kirner O., Al-Subari O., Smyshlyaev S., Rozanov E.* Measurements and Modelling of Total Ozone Columns near St. Petersburg, Russia // *Remote Sensing* 2022. V. 14. № 16. P. 3944.
- Nerushev A. F., Visheratin K. N., Ivangorodsky R. V.* Satellite-derived estimations of the clear-air turbulence in the upper troposphere // *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. 2022. 1040 012025.
- Nerushev A. F., Visheratin K. N., Ivangorodsky R. V.* Characteristics of the upper troposphere wind field according to the satellite measurements and their connection with climatic parameters // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2020. V. 606. 012041.

- Nerushev A.F., Visheratin K.N., Ivangorodsky R.V.* Dynamics of High-Altitude Jet Streams from Satellite Measurements and Their Relationship with Climatic Parameters and Large-Scale Atmospheric Phenomena // *Izv. Atmospheric and Oceanic Physics*. 2019. V. 55. № 9. P. 1198–1209.
- Nikitin S.V., Chulichkov A.I., Borovski A.N., Postilyakov O.V.* Estimation of cloudiness and aerosol characteristics in the atmosphere from spectral measurements of scattered solar radiation using a neural network // *Proc. SPIE*, 11152, 111521H, 2019.
- Nikitin S.V., Chulichkov A.I., Borovski A.N., Postilyakov O.V.* On estimation of atmospheric scattering characteristics from spectral measurements of solar radiation using machine learning algorithms // *Proc. SPIE* 11531, 115310V; 2020.
- Odintsova T.A., Koroleva A.O., Simonova A.A., Campargue A., Tretyakov M.Yu.* The atmospheric continuum in the “terahertz gap” region (15–700 cm^{-1}): Review of experiments at SOLEIL synchrotron and modeling // *J. Mol. Spectrosc.* 2022. V. 386. P. 111603.
- Odintsova T.A., Serov E.A., Balashov A.A., Koshelev M.A., Koroleva A.O., Simonova A.A., Tretyakov M.Yu., Filippov N.N., Chistikov D.N., Finenko A.A., Lokshitanov S.E., Petrov S.V., Vigin A.A.* CO₂–CO₂ and CO₂–Ar continua at millimeter wavelengths // *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*. 2021. V. 258. P. 107400.
- Odintsova T.A., Tretyakov M.Yu., Simonova A.A., Ptashnik I.V., Pirali O., Campargue A.* Measurement and Temperature Dependence of the Water Vapor Self-Continuum Between 70 and 700 cm^{-1} // *J. Mol. Struct.* 2020. V. 1210. P. 128046.
- Odintsova T.A., Tretyakov M.Yu., Zibarova A.O., Pirali O., Roy P., Campargue A.* Far-Infrared Self-Continuum Absorption of H₂16O and H₂18O (15–500 cm^{-1}) // *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*. 2019. V. 227. P. 190–200.
- Oparin D.V., Filippov N.N., Grigoriev I.M., Kouzov A.P.* Non-empirical calculations of rovibrational band wings: Carbon dioxide-rare gas mixtures // *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*. 2020. V. 247. 106950.
- Panchenko M.V., Kozlov V.S., Polkin V.V., Polkin Vas.V., Terpugova S.A., Uzhegov V.N., Chernov D.G., Shmargunov V.P., Yausheva E.P., Zenkova P.N.* Aerosol characteristics in the near-ground layer of the atmosphere of the city of Tomsk in different types of aerosol weather // *Atmosphere*. 2020. V. 11. № 1. P. 20–39.
- Panchenko M.V., Yausheva E.P., Chernov D.G., Kozlov V.S., Makarov V.I., Popova S.A., Shmargunov V.P.* Submicron aerosol and Black Carbon in the troposphere of South-western Siberia (1997–2018) // *Atmosphere*. 2021. V.12. № 3. P. 351–370.
- Pastukhova A.S., Chubarova N.E., Zhdanova Y.Y., Galin V.Y., Smyshlyaev S.P.* The forecast of erythemal UV irradiance over the territory of Northern Eurasia according to the INM-RSHU chemical-climate model // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2019. V. 55. № 3. P. 242–250.
- Petäjä T., Duplissy E.-M., Tabakova K., Arshinov M., Balin Y., Belan B., Panchenko M.* Itergrative and comprehensive Understanding on Polar Environments (iCUPE): the concept and initial results // *Atmos. Chem. Phys*. 2020. V. 20. № 14. P. 8551–8592.
- Poliukhov A.A., Chubarova N.Y., Volodin E.M.* Impact of Inclusion of the Indirect Effects of Sulfate Aerosol on Radiation and Cloudiness in the INMCM Model // *Izv. Atmos. Ocean. Phys.* 2022. V. 58. № . P. 486–493 (2022).
- Polyakov A., Poberovsky A., Makarova M., Virolainen Y., Timofeyev Y., Nikulina A.* Measurements of CFC-11, CFC-12, and HCFC-22 total columns in the atmosphere at the St. Petersburg site in 2009–2019 // *Atmos. Meas. Tech.* 2021. V. 14. № 8. P. 5349–5368.
- Polyakov A., Virolainen Y., Nerobelov G., Timofeyev Y., Solomatnikova A.* Total ozone measurements using IKFS-2 spectrometer aboard Meteor M N2 satellite in 2019–2020 // *Intern. Journal of Remote Sensing*. 2021. V. 42. № 22. P. 8709–8733.
- Polyakov A., Virolainen Ya., Poberovskiy A., Makarova M., Timofeyev Yu.* Atmospheric HCFC-22 total columns near St. Petersburg: stabilization with start of a decrease // *International Journal of Remote Sensing*. 2020. V. 41. № 11. P. 34365–4371.
- Postilyakov O.V., A.N. Borovski, A.I. Chulichkov, S.V. Nikitin.* On estimation of cloudiness characteristics and parameters of DOAS retrieval from spectral measurements using a neural network // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2020b. V. 489. P. 012031.
- Postilyakov O.V., Borovski A.N., Davydova M.A. et al.* Preliminary validation of high-detailed GSA/Resurs-P tropospheric NO₂ maps with alternative satellite measurements and transport simulations // *Proc. SPIE*. 11152. 111520F. 2019b. <https://doi.org/10.1117/12.2535487>
- Postilyakov O.V., Borovski A.N., Elansky N.F., Davydova M.A., Zakhharova S.A., Makarenkov A.A.* Comparison of space high-detailed experimental and model data on tropospheric NO₂ distribution // *Proc. SPIE*. 11208. 112082S. 2019a.
- Postilyakov O.V., Borovski A.N., Shukurov K.A., Muhartova Y.V., Davydova M.A., Makarenkov A.A.* On validation high-detail mapping of tropospheric NO₂ using GSA/Resurs-P observations with simulated data // *Proc. SPIE*. 11531. 1153109. 2020.
- Ptashnik I.V., Klimeshina T.E., Solodov A.A., Vigin A.A.* Spectral composition of the water vapour self-continuum absorption within 2.7 and 6.25 μm bands // *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*. 2019. V. 228. P. 97–105.
- Radionov V.F., Rusina E.N., Sibir E.E.* Long-term variability of integral and spectral transparency of the atmosphere at Mirny observatory, Antarctica // *Russian Meteorology and Hydrology*. 2020. V. 45. № 2. P. 74–80.
- Radionov V.F., Sidorova O.R., Golobokova L.P., Khuriganova O.I., Khodzher T.V., Sakerin S.M., Kabanov D.M., Chernov D.G., Kozlov V.S., Panchenko M.V. – 5.2.* Aerosol component of the Atmosphere in Barentsburg. P. 282–304 // *Current State of Environment of the Svalbard Archipelago: Collective monograph* [ed. by L.M. Savatyugin]. St. Petersburg: AARI, 2020. 304 pp.
- Rakitin V.S., Skorokhod A.I., Pankratova N.V., Shtabkin Yu.A., Rakitina A.V., Wang G., Vasiliyeva A.V., Makarova M.V., Wang P.* Recent changes of atmospheric composition in background and urban Eurasian regions in XXI-th century // 2020 IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 606 012048.
- Rublev A., Kiseleva Ju., Uspensky A., Golomolzin V., Gayfulin D., Tsyrlunikov M.* On-orbit calibration of Russian satellite instruments: New issues // *GSICS Quarterly Spring Issue* 2021. 2021. V. 15. № 1. P. 4–6.

- Safatov A.S., Andreeva I.S., Buryak G.A., Olkin S.E., Reznikova I.K., Belan B.D., Panchenko M.V., Simonenkov D.V.* Long-Term Studies of Biological Components of Atmospheric Aerosol: Trends and Variability // *Atmosphere*. 2022. V. 13. № 5. P. 651.
- Sakerin S.M., Golobokova L.P., Kabanov D.M., Khuriganowa O.I., Pol'kin V.V., Radionov V.F., Sidorova O.R., Turchinovich Yu.S.* Spatial distribution of aerosol characteristics over the South Atlantic and Southern Ocean, using multiyear (2004–2021) measurements in Russian Antarctic expeditions // *Atmosphere*. 2022. V. 13. № 3. P. 427.
- Sakerin S.M., Kabanov D.M., Makarov V.I., Polkin V.V., Popova S.A., Chankina O.V., Pochufarov A.O., Radionov V.F., Rize D.D.* Spatial distribution of atmospheric aerosol physicochemical characteristics in Russian sector of the Arctic Ocean // *Atmosphere*. 2020. V. 11. № 11. P. 1170.
- Sakerin S.M., Kruglinsky I.A., Kabanov D.M., Kalashnikova D.A., Kravchishina M.D., Makarov V.I., Novigatinsky A.N., Popova S.A., Pochufarov A.O., Simonova G.V., Turchinovich Yu.S., Darin F.A.* Spatiotemporal variations in atmospheric aerosol characteristics over the Kara, Barents, Norwegian, and Greenland Seas (2018–2021 expeditions) // *Atmospheric and Oceanic Optics*. 2022. V. 35. № 6. P. 651–660.
- Sakerin S.M., Zenkova P.N., Kabanov D.M., Kalashnikova D.A., Lisitzin A.P., Makarov V.I., Polkin V.V., Popova S.A., Simonova G.V., Chankina O.V., Shevchenko V.P.* Results of Studying Physicochemical Characteristics of Atmospheric Aerosol in the 71st Cruise of RV Akademik Mstislav Keldysh // *Atmospheric and Oceanic Optics*. 2020. V. 33. № 5. P. 470–479.
- Serov E.A., Balashov A.A., Tretyakov M.Yu., Odintsova T.A., Koshelev M.A., Chistikov D.N., Finenko A.A., Lokshantov S.E., Petrov S.V., Viganin A.A.* Continuum absorption of millimeter waves in nitrogen // *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*. 2020. V. 242. P. 106774.
- Sha M.K., Langerock B., Blavier J.-F.L., Blumenstock Th., Borsdorff T., Buschmann M., Dehn A., De Maziere M., Deutscher N.M., Feist D.G., Garcia O.E., Griffith D.W.T., Grutter M., Hannigan J.W., Hase F., Heikkinen P., Hermans Ch., Iraci L.T., Jeseck P., Jones N., Kivi R., Kumps N., Landgraf J., Lorente A., Mahieu E., Makarova M.V., Mellqvist J., Metzger J.-M., Morino I., Nagahama T., Notholt J., Ohyama H., Ortega I., Palm M., Petri Ch., Pollard D.F., Rettinger M., Robinson J., Roche S., Roehl C.M., Rohling A.N., Rousogonous C., Schneider M., Shiomi K., Smale D., Stremme W., Strong K., Sussmann R., Te Y., Uchino O., Velazco V.A., Vigouroux C., Vrekoussis M., Wang P., Warneke Th., Wizenberg T., Wunch D., Yamamoto S., Yang Y., Zhou M.* Validation of methane and carbon monoxide from Sentinel-5 Precursor using TC-CON and NDACC-IRWG stations // *Atmos. Meas. Tech*. 2021. V. 14. № 9. P. 6249–6304.
- Shatunova M.V., Khlestova Y.O., Chubarova N.E.* Forecast of Microphysical and Optical Characteristics of Large-Scale Cloud Cover and Its Radiative Effect Using the COSMO Mesoscale Weather Prediction Model // *Atmos Ocean Opt*. 2020. V. 33. P. 154–160.
- Shuvalova J.; Chubarova N.; Shatunova M.* Impact of Cloud Condensation Nuclei Reduction on Cloud Characteristics and Solar Radiation during COVID-19 Lockdown 2020 in Moscow // *Atmosphere*. 2022. V. 13. № 10. P. 1710.
- Silant'ev N.A., Alekseeva G.A., Ananjevskaia Y.K.* Radiative transfer in atmospheres with a large chaotic magnetic field // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. 2021. V. 506 № 4. P. 4805–4818.
- Simonova A.A., Ptashnik I.V., Elsej J., McPheat R.A., Shine K.P., Smith K.M.* Water vapour self-continuum in near-visible IR absorption bands: Measurements and semiempirical model of water dimer absorption // *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf.* 2022. V. 277. P. 107957.
- Sinita L.N., Serdyukov V.I., Polovtseva E.R., Bykov A.D., Scherbakov A.P.* Led-based fourier spectroscopy of HD17O in the range of 10000–11300 cm⁻¹. Analysis of the 3v3 band. // *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*. 2022. V. 294. P. 108409.
- Svetsov V., Shuvalov V.* Thermal radiation from impact plumes // *Meteoritics and Planetary Science*. 2019. V. 54. № 1. P. 126–141.
- Tarasenkov M.V., Engel M.V., Zonov M.N. et al.* Assessing the cloud adjacency effect on retrieval of the ground surface reflectance from MODIS satellite data for the Baikal area // *Atmosphere*. 2022. V. 13. № 12. P. 2054.
- Tarasenkov M.V., Zimovaya A.V., Belov V.V. et al.* Retrieval of Reflection Coefficients of the Earth's Surface from MODIS Satellite Measurements Considering Radiation Polarization // *Atmospheric and Oceanic Optics*. 2020. V. 33. № 2. P. 179–187.
- Timofeyev Y.M., Uspensky A.B., Zavelevich F.S., Polyakov A.V., Virolainen Y.A., Rublev A.N., Kukharsky A.V., Kiseleva J.V., Kozlov D.A., Nikulin A.G., Pyatkin V.P., Rusin E.V.* Hyperspectral Infrared Atmospheric Sounder IKFS-2 on “Meteor-M” No. 2 – four years in orbit // *Journ. of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*. 2019. V. 238. P. 106579.
- Tretyakov M.Yu.* High Accuracy Resonator Spectroscopy of Atmospheric Gases at Millimetre and Submillimetre Waves. United Kingdom: Cambridge Scholars Publishing. 2021. 425 p. <https://www.cambridgescholars.com/product/978-1-5275-7581-3>
- Troitsyna L., Dudaryonok A., Buldyreva J.V., Filippov N.N., Lavrentieva N.* Temperature dependence of CH3I self-broadening coefficients in the v6 fundamental // *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*. 2020. V. 242. P. 106797.
- Troitsyna L., Dudaryonok A., Buldyreva J.V., Filippov N.N., Lavrentieva N.A.* Room-temperature CH3I-N2 broadening coefficients for the v6 fundamental // *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*. 2021. V. 266. P. 107566.
- Troitsyna L., Dudaryonok A., Filippov N.N., Lavrentieva N., Buldyreva J.V.* Oxygen- and air-broadening coefficients for the CH3I v6 fundamental at room temperature // *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*. 2021. V. 273. P. 107839.
- Uzhegov V.N., Kozlov V.S., Konovalov I.B., Panchenko M.V., Zenkova P.N., Polkin V.V., Romashchenko V.A., Chernov D.G., Shmargunov V.P., Yausheva E.P.* Relationships between aerosol absorption, scattering and extinction of radiation in combustion and pyrolysis smokes // *Proc. SPIE 12341, 28th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics, 123412W*. 2022.
- Vasilchenko S., Barbe A., Starikova E., Kassi S., Mondelain D., Campargue A., Tyuterev V.* Cavity-ring-down spectroscopy of the heavy ozone isotopologue ¹⁸O₃: Analysis of a high energy band near 95% of the dissociation thresh-

- old // *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*. 2022. V. 278. P. 108017.
- Vasilchenko S., Mikhailenko S.N., Campargue A. Cavity ring down spectroscopy of water vapour near 750 nm: a test of the HITRAN2020 and W2020 line lists // *Molecular Physics*. 2022. V. 120. № 15–16. P. e2051762.
- Vlasenko S.S., Volkova K.A., Ionov D.V., Ryshkevich T.I., Ivanova O.I., Mikhailov E.F. Variations of carbonaceous atmospheric aerosol near St. Petersburg // *Izv. Atmos. Ocean. Phys.* 2019. V. 55. № 6. P. 619–627.
- Volkova K.A., Anikin S.S., Mikhailov E.F., Ionov D.V., Vlasenko S.S., Ryshkevich T.I. Seasonal and daily variability of aerosol particle concentrations near St. Petersburg // *Atmos. Ocean Opt.* 2020. V. 33. № 5. P. 524–530.
- Volpert E.V., Chubarova N.E. Long-term Changes in Solar Radiation in Northern Eurasia during the Warm Season According to Measurements and Reconstruction Model // *Russ. Meteorol. Hydrol.* 2020. V. 46. P. 507–518.
- Wang Y., Apituley A., Bais A., Beirle S., Benavent N., Borovski A., Bruchkouski I., Chan K.L., Donner S., Drosoglou T., Finkenzeller H., Friedrich M.M., Friß U., Garcia-Nieto D., Gómez-Martín L., Hendrick F., Hilboll A., Jin J., Johnston P., Koenig T.K., Kreher K., Kumar V., Kyuberis A., Lampel J., Liu C., Liu H., Ma J., Polyansky O.L., Postlyakov O., Querel R., Saiz-Lopez A., Schmitt S., Tian X., Tirpitz J.-L., Van Roozendael M., Volkamer R., Wang Z., Xie P., Xing C., Xu J., Yela M., Zhang C., Wagner T. Inter-comparison of MAX-DOAS measurements of tropospheric HONO slant column densities and vertical profiles during the CINDI-2 campaign // *Atmos. Meas. Tech.* 2020. V. 13. № 9. P. 5087–5116.
- Zadvornyykh I.V., Gribanov K.G., Denisova N.Yu., Zakharov V.I., Imasu R. Method for Retrieval of the HDO/H₂O Ratio Vertical Profile in the Atmosphere from Satellite Spectra Simultaneously Measured in Thermal and Near-IR Ranges // *Atmospheric and Oceanic Optics*. 2021. V. 34. № 2. P. 81–86.
- Zadvornyykh I.V., Gribanov K.G., Zakharov V.I., Imasu R. Methane Vertical Profile Retrieval from the Thermal and Near-Infrared Atmospheric Spectra // *Atmospheric and Oceanic Optics*. 2019. V. 32. № 2. P. 152–157.
- Zakharova S., Davydova M., Borovski A., Shukurov K., Mukhartova Yu., Makarenkov A., Postlyakov O. Experiments on high-detailed mapping of tropospheric NO₂ using GSA/Resurs-P observations: results, validation with models and measurements, estimation of emission power // *Proc. SPIE*. 11859. 1185905. 2021.
- Zhdanova E.Y., Chubarova N.Y., Lyapustin A.I.: Assessment of urban aerosol pollution over the Moscow megacity by the MAIAC aerosol product // *Atmos. Meas. Tech.* 2020. V. 13. № 2. P. 877–891.
- Zhuravleva T., Nasrtdinov I., Chesnokova T., Ptashnik I. Monte Carlo simulation of thermal radiative transfer in spatially inhomogeneous clouds taking into account the atmospheric sphericity // *J. of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*. 2019. V. 236. P. 296–305.
- Zhuravleva T.B., Nasrtdinov I.M., Artyushina A.V., Timofeev D.N., Shishko V.A., Konoshonkin A.V., Kustova N.V. Intensity of reflected solar radiation in the presence of optically anisotropic crystal clouds: Results of preliminary calculations // *Proceedings of SPIE*. 2021a. V. 11916. 1191603.
- Zhuravleva T.B., Nasrtdinov I.M., Kononov I.B., Golovushkin N.A., Beekmann M. Impact of the Atmospheric Photochemical Evolution of the Organic Component of Biomass Burning Aerosol on its Radiative Forcing Efficiency: a Box Model Analysis // *Atmosphere*. 2021b. V. 12. № 12. P. 1555.
- Zhuravleva T.B., Artyushina A.V., Vinogradova A.A., Voronina Yu.V. Black Carbon in the Near-Surface Atmosphere Far Away from Emission Sources: Comparison of Measurements and MERRA-2 Reanalysis Data // *Atmospheric and Oceanic Optics*, 2020, V. 33. № 6. P. 591–601.
- Zhuravleva T.B., Nasrtdinov I.M., Vinogradova A.A. Direct Radiative Effects of Smoke Aerosol in the Region of Tiksi Station (Russian Arctic): Preliminary Results. // *Atmospheric and Oceanic Optics*. 2019. V. 32. № 3. P. 296–305.

Russian Investigations in the Field of Atmospheric Radiation in 2019–2022

Yu. M. Timofeyev¹, V. P. Budak², Ya. A. Virolainen¹, *, T. B. Zhuravleva³, I. V. Ptashnik³,
A. B. Uspensky⁴, N. N. Filippov¹, and N. E. Chubarova⁵

¹St. Petersburg University, 7-9 Universitetskaya Emb., St. Petersburg, 199034 Russia

²National Research University MPEI, Krasnokazarmennaya str, building 1, Moscow, 111250 Russia

³Zuev Institute of atmospheric optics Russian Academy of Sciences, Siberian branch, Academic Zuev Sq., 1, Tomsk, 634055 Russia

⁴Scientific Research Center for space hydrometeorology “Planeta”, B. Predtechensky per., 7, Moscow, 123242 Russia

⁵Lomonosov Moscow State University, GSP-1, Leninskie Gory, 1, building 2, Moscow, 119991 Russia

*e-mail: yana.virolainen@spbu.ru

The main results of scientific research and development in the field of atmospheric radiation in Russia for the period 2019–2022 are considered. The main attention is paid to research in the field of radiative transfer theory, atmospheric spectroscopy, radiation climatology, aerosol and radiation forcing, remote sensing of the atmosphere and surface, interpretation of satellite measurements. Lists of major publications in these areas for this period are provided.

Keywords: theory of radiation transfer, atmospheric spectroscopy, radiation climatology, remote sensing of the atmosphere