

УДК 551.521

## РОССИЙСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В ОБЛАСТИ АТМОСФЕРНОЙ РАДИАЦИИ В 2015–2018 гг.

© 2020 г. Ю. М. Тимофеев<sup>а</sup>, \*, Е. М. Шульгина<sup>а</sup>, \*\*

<sup>а</sup>Санкт-Петербургский государственный университет,  
Университетская наб., 7/9, Санкт-Петербург, 199034 Россия

\*e-mail: y.timofeev@spbu.ru

\*\*e-mail: shulgina@troll.phys.spbu.ru

Поступила в редакцию 11.09.2019 г.

После доработки 25.09.2019 г.

Принята к публикации 25.09.2019 г.

Краткий обзор, подготовленный Российской комиссией по атмосферной радиации, содержит наиболее значимые результаты работ в области исследований атмосферной радиации, выполненных в 2015–2018 гг. Он является частью Национального отчета России по метеорологии и атмосферным наукам, подготовленного для Международной ассоциации по метеорологии и атмосферным наукам (IAMAS)<sup>1</sup>. За истекший период Российская комиссия по атмосферной радиации совместно с заинтересованными ведомствами и организациями провела 2 Международных симпозиума “Атмосферная радиация и динамика” (МСАРД-2015, МСАРД-2017), на которых обсуждались актуальные проблемы современной физики атмосферы – перенос излучения и атмосферная оптика, парниковые газы, облака и аэрозоли, дистанционные методы измерений, новые данные наблюдений. В настоящем обзоре представлено 5 направлений, охватывающих весь спектр исследований, проводимых в области атмосферной радиации<sup>2</sup>.

**Ключевые слова:** атмосферная радиация, перенос излучения, наземные и спутниковые измерения, радиационная климатология

**DOI:** 10.31857/S0002351520010083

### ТЕОРИЯ ПЕРЕНОСА ИЗЛУЧЕНИЯ

Исследования в этой области посвящены изучению процессов переноса излучения (ПИ) в разных средах, для различных моделей атмосферы и геометрий измерений, развитию методов и алгоритмов для решения уравнения переноса излучения в приложении к задачам атмосферной оптики.

В работе [1] рассматривается задача диффузного отражения и преломления для нестационарного уравнения переноса излучения в системе полупрозрачных тел, так называемая начально-краевая, то есть с начальными условиями по времени и граничными по пространству. Установлена однозначная разрешимость задачи в полной шкале пространств Лебега, получены оценки решений.

<sup>1</sup> *Russian National Report. Meteorology and Atmospheric Sciences 2015–2018*, Ed. by I. I. Mokhov and A. A. Krivolusky (National Geophysical Committee, RAS, MAJ Press, Moscow, 2019).

<sup>2</sup> Материалы к обзору представлены В.П. Будаком (МЭИ); Г.И. Горчаковым, О.В. Постыляковым (ИФА РАН); А.Ф. Нерушевым (НПО “Тайфун”); О.М. Николаевой (ИПМ им. М.В. Келдыша РАН); М.В. Панченко, Т.К. Складневой, Т.Ю. Чесноковой (ИОА СО РАН); С.Б. Розановым (ФИ им. П.Н. Лебедева РАН); А.В. Успенским (НИЦ “Планета”); А.А. Черемисиным (СФУ); Н.Е. Чубаровой (МГУ).

Сравнительная эффективность различных алгоритмов статистического моделирования процесса переноса поляризованного излучения для задачи с молекулярной матрицей рассеяния исследована в работе [2]. Статья [3] рассматривает процесс переноса излучения через случайные среды трех разных типов. Перенос излучения численно статистически моделируется в этих средах с одинаковыми одномерными распределениями и корреляционными радиусами. В работе [4] построен допускающий распараллеливание алгоритм Монте-Карло для оценки вероятностных моментов спектрального радиуса интегрального оператора, определяющего перенос частиц с размножением в случайной среде, то есть моментов эффективного коэффициента размножения. С той же целью разработан рандомизированный метод гомогенизации на основе теории малых возмущений и диффузионного приближения. Метод усреднения Лебега был применен для численного моделирования уравнения переноса излучения авторами работы [5]. Моделирование методом Монте-Карло обратного рассеяния поляризованного оптического излучения было выполнено во временных и частотных

представлениях на основе описания переноса излучения в терминах уравнения Бете–Солпитера [6]. В [7, 8] рассмотрена задача Коши для нестационарного уравнения переноса излучения в трехмерной многокомпонентной среде с обобщенными условиями согласования, описывающими диффузное и Френелевское отражение и преломление на границе раздела сред. Доказаны единственность и разрешимость задачи, разработан метод Монте-Карло для решения начально-краевой задачи и проведены численные эксперименты для различных реализаций алгоритма. Получены некоторые условия стабилизации нестационарного решения. Исследование Будака и др. [9] посвящено дальнейшему развитию малоугловой модификации метода сферических гармоник. Показано, что квазидиффузионное приближение не зависит от симметрии задачи и, следовательно, может быть обобщено на случай произвольной геометрии среды.

Ряд работ посвящен разработке и совершенствованию программного обеспечения для расчетов переноса излучения. В работе [10] описана новая открытая программа SORD переноса поляризованного излучения, написанная на Фортране 90/95 и доступная свободно по адресу <ftp://maiac.gsfc.nasa.gov/pub/skorkin>. SORD численно моделирует распространение монохроматического солнечного излучения в плоскопараллельной атмосфере над отражающей поверхностью, используя метод приближений последовательных рассеяний. Дополнение программы FIRE-ARMS моделью переноса поляризованного излучения VLIDORT приведено в статье [11]. Эта версия программного обеспечения позволяет моделировать исходящее тепловое инфракрасное излучение от Земли и солнечное коротковолновое инфракрасное излучение, отраженное от поверхности, с учетом многократного рассеяния. Проведено моделирование спектров уходящего излучения для безоблачной атмосферы и сравнение полученных результатов со спектрами, измеренными спутниковым спектрометром GOSAT над Западной Сибирью. Статья [12] относится к серии работ, направленных на повышение вычислительной мощности радиационных кодов, реализующих статистический метод Монте-Карло. Дается краткое описание основных блоков базовых (версия FORTRAN) и оптимизированных (версия C) кодов, предназначенных для расчета сияния неба в вертикально-неоднородной среде.

В ряде работ совершенствуются методики решения уравнения переноса излучения в приложениях к задачам определения характеристик окружающей среды, создаются модели для определения радиационно значимых характеристик. Работа [13] посвящена исследованию зависимостей характеристик солнечной радиации от оптических моделей атмосферы Земли. В статье приведены ре-

зультаты для отраженных и пропущенных атмосферой полусферических потоков, лучистого притока, доли рассеянной радиации в пропущенном потоке и вклада разных порядков рассеяния в безоблачной и облачной атмосфере. Рассмотрены разные значения оптических параметров атмосферы, альbedo подстилающей поверхности и геометрии освещения. Для расчетов использованы компьютерные коды, составленные для моделей однородной атмосферы и реализующие четыре метода теории переноса: приближение однократного рассеяния, метод Эддингтона, метод Монте-Карло и метод асимптотических формул.

В статье [14] представлена трехмерная модель для получения пространственных структур фотосинтетически активной радиации, отраженных и поглощенных неоднородным лесным покровом с многовидовой структурой. В работе [15] показано, что трехмерная модель распределения лесного покрова влияет на радиационный режим и определение его биофизических параметров. Основанный на разработанной модели алгоритм позволяет определять долю различных пород деревьев в смешанном древостое из измеренных коэффициентов отражения излучения лесным покровом. В [16] представлена систематизированная информация о применении различных видов формализации ослабления для решения уравнения переноса излучения в кристаллическом облаке. Показано, что по выраженности и устойчивости проявления поляризационных характеристик ослабления и их спектральной зависимости среди всех видов кристаллов выделяются преимущественно ориентированные крупные пластинки. Для них поляризационный эффект ослабления может проявляться на порядки выше и составлять более 50% от энергетической характеристики ослабления.

Проблема восстановления морского дна океана с взволнованной поверхностью при известных коэффициентах отражения морского дна и поверхности океана рассмотрена Зиньковым и др. [17]. В работе [18] проведено теоретическое обоснование нового метода измерения излучательной способности шероховатой подстилающей поверхности без абсолютной калибровки радиометра. Способ может быть применен не только к поверхности океана, но и к любой шероховатой поверхности, льду, сельскохозяйственным насаждениям, растительности. Разработан алгоритм восстановления альbedo ламбертовой земной поверхности по значениям коэффициента отраженной яркости и проведено исследование его точности на модельных задачах [19, 20]. Получено аналитическое представление зависимости коэффициента яркости отраженного излучения от сечений газового поглощения и построен алгоритм коррекции влияния газового поглощения на коэффициент яркости [21]. Отметим публикацию учебно-методи-

ческого пособия, посвященного рассмотрению различных численных методов теории переноса излучения [22].

## РАДИАЦИОННАЯ КЛИМАТОЛОГИЯ

Работы по данной тематике велись в нескольких направлениях: мониторинг составляющих радиационного баланса (РБ) и атмосферных параметров, влияющих на радиационный режим, и их трендов; разработка программного обеспечения, моделирование радиационных характеристик и анализ радиационных эффектов атмосферных газов.

В ИОА СО РАН ведется непрерывный мониторинг атмосферных параметров (суммарная и УФ солнечная радиация, интегральная интенсивность УФ-В радиации) в приземном слое атмосферы на TOR-станции, расположенной в окрестностях Томска ( $56^{\circ}28'41''$  с.ш.,  $85^{\circ}03'15''$  в.д.). Проведены исследования изменения суммарной солнечной радиации, облачности, продолжительности солнечного сияния и приземной температуры воздуха за период 1996–2016 гг. в Томске. Анализ синоптических процессов, наблюдавшихся в районе г. Томска с 1993 по 2016 г., показал, что на территории Томской области за последнее десятилетие существенно уменьшилась разница между повторяемостью циклонов и антициклонов. Прослеживается тенденция снижения вторжения арктических воздушных масс и рост поступления в регион субтропического и тропического воздуха [23].

Мониторинг суммарной радиации проводится также на сети стационарных постов наблюдения, созданной совместно с Национальным институтом исследования окружающей среды (Япония) на территории Западной Сибири. Измерения ведутся в автоматическом и непрерывном режиме на постах наблюдения, расположенных в разных ландшафтных зонах: от зоны северной тайги (Ноябрьск ( $63^{\circ}26'28''$  с.ш.,  $75^{\circ}46'22''$  в.д.)) до лесостепи (Азово ( $54^{\circ}42'19''$  с.ш.,  $73^{\circ}01'45''$  в.д.)) на южных границах России. Из анализа наземных данных, полученных на сети стационарных постов, следует, что за период 2004–2016 гг. величина и диапазон колебания месячных сумм радиации в разных ландшафтных зонах различны и зависят от сезона. Фактические значения месячных сумм суммарной радиации сопоставлены со средними многолетними значениями месячных сумм, определенных по данным реанализа ECMWF Era-Interim. Показано, что данные реанализа удовлетворительно воспроизводят сезонный ход средних месячных сумм суммарной радиации со средней относительной ошибкой 12% [24].

В ИОА СО РАН продолжается работа над созданием программно-алгоритмического комплекса MATHART (Monte Carlo Codes for Three-

Dimensional Radiative Transfer), предназначенного для расчета радиационных характеристик в различных атмосферных условиях (ясное небо, сплошная и разорванная облачность). В период 2015–2018 гг. были реализованы новые статистические алгоритмы для расчетов спектрально-угловых характеристик восходящего и нисходящего солнечного и теплового излучения в отдельных реализациях пространственной неоднородной облачности и усредненных по ансамблю облачных полей [25]. Моделирование радиационных характеристик выполнено с учетом сферичности атмосферы, многократного рассеяния и поглощения облачными, аэрозольными частицами и молекулами воздуха, эмиссии (в ИК-диапазоне), а также отражения от подстилающей поверхности. Для конструирования реализаций мезомасштабных облачных полей использовалась пуассоновская модель разорванной облачности; облака аппроксимировались опрокинутыми усеченными параболоидами вращения.

На основе созданного программно-алгоритмического обеспечения были исследованы закономерности формирования полей яркости восходящего и нисходящего солнечного излучения в пространственно неоднородной облачности [25, 26]. Разработанные алгоритмы были использованы также для оценок влияния неламбертовости подстилающей поверхности на угловые характеристики поля отраженного солнечного излучения в безоблачной атмосфере и сплошной облачности [27]. Показаны возможности применения развитого программно-алгоритмического обеспечения для решения обратных задач атмосферной оптики на основе наземных фотометрических наблюдений: выполнен анализ влияния стратификации оптических характеристик аэрозоля на яркость неба в солнечном вертикале [28].

В МГУ им. М.В. Ломоносова выполнен комплекс работ по исследованию УФ радиации. В статье [29] исследована сезонная и межгодовая изменчивость суммарной ультрафиолетовой (УФ) радиации в области спектра 300–380 нм в Москве за период 1968–2014 гг. и оценивается влияние облачности на ее значения. По данным измерений и модели реконструкции для территории московского региона выявлены выраженные длиннопериодные изменения эритемной УФ-радиации, характеризующиеся заметным ее уменьшением в конце 1970-х гг. и статистически значимым положительным трендом более 5%/10 лет за период 1979–2015 гг. Показано, что этот положительный тренд связан главным образом с наблюдающимся уменьшением эффективного балла облачности и сокращением общего содержания озона (СО). Модельные эксперименты с химико-климатической моделью ИВМ-РГГМУ для нескольких сценариев с учетом и без учета антропогенных факторов показали, что вариации антропогенных

эмиссий галогенов оказывают наибольшее воздействие на изменчивость ОСО и эритемной УФ-радиации. Среди естественных факторов заметные эффекты наблюдаются за счет выбросов вулканического аэрозоля [30]. Предложен новый метод расчета высотной УФ-зависимости для различных типов биологически активного УФ-излучения [31]. Параметризация метода учитывает высотные зависимости молекулярной плотности, содержания озона, аэрозоля, а также пространственные вариации альbedo поверхности. Расчеты высотных УФ-эффектов с использованием предложенного метода согласуются с результатами точного моделирования 8-поточковой моделью DISORT с коэффициентом корреляции  $>0.996$ . В работе [32] выполнены расчеты УФ радиации для районов России с наблюдавшимися аномалиями ОСО в первом квартале 2016 г. Понижение озона в зимнее время в северных регионах Сибири даже до уровня так называемой озоновой мини дыры не является критичным. В то время как гораздо более слабые изменения озона в начале весны могут приводить уже к опасным уровням эритемной УФ радиации, когда требуется защита от ультрафиолетового излучения.

### АЭРОЗОЛЬ И РАДИАЦИОННЫЙ ФОРСИНГ

Обширные лабораторные и полевые измерения оптических и микрофизических характеристик аэрозоля, моделирование и оценка влияния аэрозоля на радиационные характеристики атмосферы являются основными направлениями исследований в этой области.

Систематические лабораторные исследования рассеивающих и поглощающих свойств аэрозоля, его конденсационной активности и оптических и радиационных свойств дымов ведутся в ИОА СО РАН [33–35] и СПбГУ [36–38]. На базе экспедиционных исследований изучается пространственно-временная изменчивость характеристик аэрозоля в морских, полярных районах и азиатской части России. В статье [39] обобщены результаты 12-летних исследований аэрозоля на маршруте Российских антарктических экспедиций в Восточной Атлантике и Южном океане. Проведено статистическое обобщение и районирование физико-химических характеристик аэрозоля в Восточной Атлантике (от Ла-Манша до Антарктиды) [40]. Обсуждаются результаты исследований физико-химического состава атмосферного аэрозоля в экспедиции НИС “Академик Николай Страхов”, проведенной зимой 2015/2016 г. на маршруте от Коломбо до Калининграда (через Суэцкий канал) [41]. В работе [42] проанализирована изменчивость сажевого и субмикронного аэрозоля в Московском регионе в 2014–2016 гг., а в [43] – изменчивость углеродсо-

держащей фракции атмосферного аэрозоля центральной Сибири в 2010–2014 гг.

Результаты измерений аэрозольной оптической толщины (АОТ) атмосферы, закономерности ее пространственно-временной изменчивости в полярных регионах и в азиатской части России изложены в работах [44–46]. В рамках программы AERONET изучены свойства атмосферного аэрозоля над Восточной Европой за 2001–2014 гг. Получены статистически значимые отрицательные тренды годового АОТ для УФ и среднего видимого спектрального диапазона [47]. Подведены итоги комплексного эксперимента по изучению микрофизических, химических и оптических свойств аэрозольных частиц, оценен вклад атмосферного аэрозоля в радиационный бюджет Земли [48].

Большое количество исследований посвящено разработке моделей аэрозолей, их использованию в радиационных расчетах и оценке радиационных эффектов аэрозоля, крупномасштабных дымок и пылевого выноса в атмосферу. Методы дистанционного зондирования аэрозолей и модели параметризации параметров аэрозолей постоянно разрабатываются и совершенствуются. Оценено качество климатологических моделей аэрозоля и численной мезомасштабной модели COSMO путем сравнения с данными долгосрочных аэрозольных измерений и точных глобальных наблюдений солнечной радиации на земле в Москве и Линденберге [49]. Рассмотрены возможные отклонения результатов восстановления оптической толщины мелкодисперсной компоненты аэрозоля на основе стандартного алгоритма сети AERONET в присутствии кристаллических облаков [50]. Проанализировано влияние коричневого углерода на спектры поглощения дымового аэрозоля [51, 52] и на спектры поглощения аэрозоля в смогах мегаполисов [53].

Панченко и Журавлева [54] представили краткий обзор исследований, посвященных результатам самолетных измерений, в том числе проблемам восстановления вертикальных профилей микрофизических и оптических характеристик тропосферных аэрозолей и их последующему применению в радиационных расчетах. Создана обобщенная эмпирическая модель аэрозольных оптических характеристик нижнего 5-ти километрового слоя атмосферы в видимой и близкой ИК-областях для западной Сибири [55]. В работах [56, 57] представлены результаты модельных экспериментов для оценки радиационных, температурных эффектов аэрозоля и динамики вертикальной структуры поглощения солнечного излучения в фоновых и задымленных условиях атмосферы Сибири. Оценен дефицит суточных значений суммарной солнечной радиации на уровне подстилающей поверхности, обусловленный появлением оптически плотного дымового

слоя. С использованием оригинального алгоритма метода Монте-Карло и аэрозольных моделей ОРАС для типичных летних условий и условий дымной мглы 2012 г. на территории сибирского региона оценены прямые радиационные эффекты фонового и дымового аэрозоля в ИК-области спектра [58].

Выполнено исследование радиационных эффектов крупномасштабных дымок на территории Северной Евразии. Показано [59], что в июне 2016 г. оптические плотные дымки распространились на территорию площадью 20 млн км<sup>2</sup>, включая сибирскую дымную мглу (больше 16 млн км<sup>2</sup>), смог на Северной Китайской равнине, пыльную мглу в регионе пустыни Такла-Макан, дымки на территории Индии и Пакистана. Благодаря аномальному восточному переносу сибирская дымная мгла распространилась на европейскую территорию России и Белоруссию [60], а затем на многие другие страны Европы от Финляндии до Болгарии и от Белоруссии до Германии [61]. Оценена масса дымового аэрозоля и его радиационные эффекты, включая аэрозольный радиационный форсинг на верхней и нижней границах атмосферы на территории Сибири и на Европейской территории России. Получены оценки [62] длинноволнового радиационного форсинга и скорости нагревания приповерхностного слоя дымового аэрозоля при экстремальном задымлении московского региона летом 2010 г. с использованием полуэмпирической модели аэрозоля и интегральной функции пропускания. Определены радиационные и температурные эффекты пылевого аэрозоля во время мощного выноса минеральной пыли из пустыни Сахара с 28 января по 6 февраля 2000 г. по данным измерений на станции AERONET в Нигерии (Илорин) [63].

Завершен цикл исследований с помощью межрегиональной лидарной сети Сибири и Дальнего Востока переноса вулканического аэрозоля в стратосфере после извержений вулканов в активный вулканический период 2007–2011 гг. (вулканы Касаточи, Окмок, Кливленд, Пик Сарычева, Гримсвотн, Набро) [64].

## ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ АТМОСФЕРЫ

На кафедре физики атмосферы СПбГУ проводились разнообразные экспериментальные и численные исследования содержания озона и малых газовых составляющих (МГС) атмосферы, а именно:

1. Наземные исследования временных вариаций содержания озона и МГС с помощью измерений в Петергофе (59.88° N, 29.83° E, 20 м над уровнем моря) спектров прямого солнечного ИК излучения высокого спектрального разрешения

(фурье-спектрометр Bruker IFS 125HR). Эти исследования осуществлялись как для общего содержания озона, так и содержания озона в отдельных слоях атмосферы (как правило, в 4-х слоях). Подобные регулярные комплексные измерения на территории РФ общих содержаний ~25 климатически важных атмосферных газов проводятся впервые [65].

2. Численное моделирование пространственно-временных вариаций содержаний озона и МГС с помощью современных трехмерных численных моделей состава атмосферы (совместно с РГГМУ) и сравнения наземных и спутниковых измерений с результатами модельных экспериментов.

В результате исследований получена новая информация об элементах вертикального распределения содержания озона [66], проанализированы временные и пространственные (совместно с ИФА РАН и Институтом атмосферной оптики Китая) вариации и тренды содержания различных климатически важных атмосферных газов [67–74], оценены результаты сравнений наземных и спутниковых измерений с данными численного моделирования [75–82], проанализированы методические вопросы интерпретации наземных измерений газового состава атмосферы [83–86].

В СПбГУ продолжены исследования содержания NO<sub>2</sub> в Петергофе и самом мегаполисе Санкт-Петербурга с помощью методики дифференциальной спектроскопии DOAS [87], аэрозольных характеристик в районе Санкт-Петербурга с помощью спектрофотометра CIMEL [88]. Исследования в области наземного МКВ зондирования атмосферы в СПбГУ были направлены на совершенствование методик интерпретации измерений радиометра NATPRO, зондирование облачной атмосферы и содержания озона в средней атмосфере [89–91]. Определены интенсивности эмиссий ряда климатически важных газов [92, 93], проведено сравнение различных дистанционных методов измерений газового состава атмосферы и определены их погрешности [94–100], проведена валидация спутниковых измерений различными приборами [101].

В ИФА РАН продолжают комплексные измерения малых газовых компонент над Москвой и Кисловодской высокогорной научной станцией. Проанализированы данные измерений общего содержания (ОС) диоксида азота (NO<sub>2</sub>) в атмосфере с 1979 по 2009 г. на высокогорной научной станции, характерные особенности его временной изменчивости, связанные с суточными и сезонными изменениями, 11-летней солнечной активностью, извержениями вулканов, квазидвухлетними колебаниями тропической циркуляции и эффектом Эль-Ниньо [102]. Особенности многолетних изменений ОС СО в атмосфере в 1992–

2012 г. в Пекине и Москве приведены в статье [103]. Данные самолетных измерений концентраций  $O_3$  в средней тропосфере и общего содержания  $NO_2$  в атмосферном столбе и результаты модельных расчетов позволили связать волновой характер пространственных вариаций содержания газовых примесей над Приполярным Уралом с мезомасштабными атмосферными возмущениями [104]. Продолжаются разработки новой измерительной аппаратуры для выполнения измерений методом DOAS [105] и усовершенствование этого метода определения интегрального содержания формальдегида ( $H_2CO$ ) и других малых газов в нижней тропосфере [106]. Впервые разработан метод определения интегрального содержания формальдегида, применимый в условиях сплошной облачности [107]. Для сети полностью автоматизированных спектрофотометров Brewer разрабатывается новое программное обеспечение [108].

В НПО “Тайфун” данные наземных и спутниковых наблюдений были использованы для анализа пространственной и временной изменчивости ОСО и ряда метеорологических параметров нижней и средней атмосферы [109–112]. В работах [113, 114] представлены результаты измерений лидаром АК-3 высотных профилей концентрации озона над г. Обнинск в 2012–2016 гг. в диапазоне высот от 12 до 35 км и проведено сопоставление с данными спутниковых измерений Aura MLS/OMI и параллельных наземных измерений ОСО спектрофотометром Брюера.

В ФИАН введен в регулярную эксплуатацию новый передвижной микроволновый спектрометр-озонметр с улучшенной чувствительностью, работающий на частоте 142.2 ГГц. В 2014–2017 гг. с новым озонметром были успешно проведены исследования ночного мезосферного озона [115], а с марта 2017 г. этот прибор используется для наземного мониторинга стратосферного озона над Москвой, начатого еще в 1996 г. [116]. Совместно с ИФА РАН исследованы положительные и отрицательные аномалии в содержании озона и двуокиси азота в стратосфере Северного полушария в зимне-весенние месяцы 2010 и 2011 гг., связанные с динамикой стратосферы и внезапными стратосферными потеплениями [117–119]. В работе [120] представлены результаты зондирования газо-аэрозольного состава атмосферы с помощью авиационной лаборатории Оптик Ту-134 по маршруту Новосибирск–Томск–Мирный–Якутск–Братск–Новосибирск в период с 31 июля по 1 августа 2012 г. Оценены максимальные концентрации  $CO_2$ ,  $CH_4$  и  $CO$  над пожарными зонами.

В ИПФ РАН также активно разрабатывается и широко используется для исследований характеристик верхней атмосферы, в том числе температуры и содержания озона, аппаратура в микроволновой области спектра [121, 122].

Дистанционное зондирование атмосферы, по сути, – процесс интерпретации измерений, включающий моделирование атмосферного радиационного переноса. Огромную роль при этом играет точность задания спектроскопической информации по линиям поглощения атмосферных газов. Для оценки точности этой информации было проведено моделирование атмосферных спектров солнечного излучения в сильных полосах поглощения метана и углекислого газа и сравнение модельных спектров со спектрами, измеренными наземным ИК Фурье-спектрометром Bruker IFS 125M на Уральской атмосферной станции в Коуровке для большого набора атмосферных условий в 2013–2017 гг. Было показано, что значения содержания этих газов в столбе атмосферы, определенные с применением различных версий популярных спектроскопических баз данных HITRAN, GEISA и банков линий поглощения GOSAT [123] и CDSD [124] могут значительно различаться [125, 126]. Аналогичное сравнение было сделано для водяного пара [127]. Из лабораторных спектров, измеренных на Фурье-спектрометре в ИОА СО РАН, определены параметры контуров линий  $CH_4$  и  $H_2O$ , учитывающих эффект сужения линий Дике в ближнем ИК диапазоне для условий, близких к атмосферным, что позволило повысить точность моделирования атмосферного пропускания [128]. Проведено моделирование восходящих и нисходящих потоков солнечного и теплового излучения с различными моделями континуального поглощения водяного пара для метеорологических условий, характерных для лета средних широт, в присутствии перистой облачности различной мощности. Сделаны оценки чувствительности радиационного баланса атмосферы и радиационного форсинга облаков к моделям континуального поглощения водяного пара [129–131].

## ИНТЕРПРЕТАЦИЯ СПУТНИКОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Исследования по широкому кругу современных проблем дистанционного (спутникового) зондирования атмосферы и подстилающей поверхности ведутся специалистами Минобрнауки, Росгидромета, РАН, Роскосмоса и охватывают следующие направления:

1. Спутниковые приборы, 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 изуче-

ния различных процессов и явлений в атмосфере, океане и на суше.

Большинство выполненных разработок ориентировано на анализ и использование информации с существующих и перспективных метеоспутников и спутников наблюдения Земли (отечественных и зарубежных). Запуск новых полярно-орбитального и геостационарного метеорологических спутников серий “Метеор-М”, “Электро-Л” (КА “Метеор-М” № 2 – 2014 г., “Электро-Л” № 2 – 2015 г.) привел к восстановлению российской группировки спутников гидрометеорологического назначения [132]. Включение в состав полезной нагрузки этих КА гиперспектрального ИК-зондировщика ИКФС-2, микроволнового сканера/зондировщика МТВЗА-ГЯ, а также многоканальных сканирующих радиометров-имаджеров МСУ-МР, МСУ-ГС стимулировало развитие в российских научных организациях работ по дистанционному атмосферному зондированию.

По первому направлению исследований значительное внимание уделялось вопросам калибровки (интеркалибровки) перечисленных выше спутниковых приборов, а также валидации спутниковых измерений. В статьях [133, 134] описан метод внешней (абсолютной) калибровки и валидации данных измерений микроволнового сканера/зондировщика МТВЗА-ГЯ КА “Метеор-М” № 2, а также приведены результаты применения метода к данным в каналах атмосферного зондирования. Усовершенствованный метод внешней калибровки данных МТВЗА-ГЯ в каналах атмосферного зондирования и коррекции смещений (что необходимо для эффективного усвоения данных спутниковых измерений в схемах численного прогноза погоды) рассмотрен в [135, 136]. В статье [137] дано описание аппаратуры ИКФС-2, приведены результаты летных испытаний, подтверждающие работоспособность аппаратуры и достижение заданных технических характеристик (спектральное разрешение, чувствительность, уровень погрешности радиометрической калибровки). Оценки погрешности и контроль радиометрической калибровки ИК-зондировщика ИКФС-2 осуществляются сравнением с данными измерений аппаратуры SEVIRI/Meteosat [138]. В работе [139] приведены результаты 3-летней эксплуатации ИК-зондировщика ИКФС-2 на КА “Метеор-М № 2”, включая детальный анализ погрешностей бортовой радиометрической и спектральной калибровок, результаты функционирования комплекса предварительной обработки. Метод и результаты интеркалибровки коротковолновых каналов аппаратуры МСУ-МР и AVHRR/NOAA обсуждаются в [140]. В [141] рассмотрена интеркалибровка ИК-каналов радиометра-имаджера МСУ-ГС и ИК-зондировщика AIRS/EOS-Aqua. Усовершенствованная процедура интеркалибровки ИК-каналов МСУ-ГС и аппаратуры

SEVIRI/Meteosat рассмотрена в [142]. Эту процедуру можно применять для интеркалибровки ИК-каналов аппаратуры типа “радиометр-имаджер”, установленной на соседних геостационарных метеоспутниках. В [143] обсуждаются результаты интеркалибровки коротковолновых каналов МСУ-ГС и аппаратуры VIIRS/SNPP.

В НИЦ “Планета” и СПбГУ продолжились исследования по развитию методов интерпретации и использования данных отечественных метеорологических спутников серий “Метеор-М” и “Электро-Л”. Ряд работ посвящен анализу данных и результатам эксплуатации ИК-зондировщика ИКФС-2. Статьи [144, 145] посвящены описанию метода и технологии получения данных дистанционного температурного зондирования по измерениям ИКФС-2, а также валидации результатов. В технологии получения данных дистанционного температурного зондирования по измерениям ИКФС-2 используется программный комплекс быстрых радиационных расчетов, подготовленный для моделирования данных ИКФС-2 [146]. Была разработана и провалидирована новая методика определения ОС озона по измерениям спектрометра ИКФС-2. Регулярный мониторинг озоносферы позволил обнаружить и изучить озонную мини дыру в субарктических районах Сибири зимой 2016 г. [147, 148]. Новая методика определения ОС озона позволила подробно исследовать временные вариации содержания озона в период образования над территорией России мини озонных дыр и с помощью численного моделирования определить основные механизмы их образования зимой и весной 2015–2016 гг. [76].

В методической работе [149] анализируются возможности повышения информативности спутникового зондирования атмосферы методами ИК-спектроскопии путем повышения спектрального разрешения аппаратуры и использования поляризационных измерений солнечного и теплового излучения. Показаны недостатки современных методов учета молекулярного поглощения как в “строгих” (line-by-line), так и “быстрых” (основанных на k-распределениях) моделях переноса атмосферной радиации.

В НИЦ “Планета” продолжена разработка методов и технологий автоматической классификации данных измерений сканирующих радиометров-имаджеров полярно-орбитальных и геостационарных метеоспутников для определения параметров облачности и осадков [150–152]. Наряду с данными AVHRR, SEVIRI впервые для этих целей в [153] были использованы данные МСУ-МР КА “Метеор-М” № 2.

Спутниковому мониторингу атмосферы и сопоставлению спутниковых измерений с наземными наблюдениями посвящено большое коли-

чество исследований. Представлены результаты космического мониторинга природных пожаров за период 2010–2014 гг. для оценки площадей, уничтоженных пожарами, объемов выбросов парниковых газов и мелкодисперсных аэрозолей по всей территории России и ее отдельным регионам [154]. Русскова и Зенкова [155] оценили пространственную и временную изменчивость содержания  $\text{NO}_2$  в тропосфере Западной Сибири по данным спектрометра OMI, функционирующего на спутнике Aura. Коллективом ИФА РАН в сентябре 2016 году был проведен первый на мировом уровне эксперимент по определению интегрального содержания  $\text{NO}_2$  в тропосфере с высоким пространственным разрешением – около 2 км [156]. Разработанный подход использует наблюдения гиперспектрометра ГСА, устанавливаемого на действующей в настоящее время системе российских спутников Ресурс-П.

Обзор Заболотских [157], статьи [158–160] посвящены современным методам получения интегральных характеристик атмосферы с использованием спутникового пассивного микроволнового мониторинга. В статье [161] собран, классифицирован и проанализирован значительный объем спутниковых и наземных данных об ОС  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$  и  $\text{CH}_4$  за 2010–2013 гг. Найдены переходные соотношения между спутниковыми и наземными данными о содержании примесей на различных измерительных площадках (станции NDACC/ GAW и ОИАП РАН) с различным пространственным и временным разрешением. В статье [162] сравнивается ряд относительных концентраций  $\text{CO}_2$  и  $\text{CH}_4$  в атмосферном столбе, полученных в результате наземных измерений Фурье-преобразования высокого разрешения атмосферного пропускания в ближнем инфракрасном диапазоне ( $4000\text{--}10000\text{ см}^{-1}$ ), зарегистрированных на Уральской атмосферной станции в 2012–2013 гг., с измерениями GOSAT. Проведено сравнение наземного и спутникового мониторинга аэрозольной оптической толщины атмосферы в России [163]. В НПО “Тайфун” по данным измерений европейских геостационарных метеорологических спутников за 10-ти летний период 2007–2016 гг. исследована пространственно-временная изменчивость основных характеристик струйных течений верхней тропосферы Северного и Южного полушарий, их связь с климатическими параметрами и крупномасштабными атмосферными явлениями [164, 165].

Ряд исследований посвящен восстановлению параметров подстилающей поверхности по данным измерений аппаратуры российских и иностранных спутников (SEVIRI/Meteosat, AVHRR/NOAA, ASCAT/Metop). Использование данных скаттерометра ASCAT/Metop для мониторинга влажности поверхностного слоя почвы обсуждается в [166]. Усовершенствованные

методы и алгоритмы оценки температуры и излучательной способности почвы, температуры воздуха у поверхности растительного покрова по данным AVHRR/NOAA, SEVIRI/Meteosat предложены в [167]. Валидация спутникового мониторинга температуры поверхности суши рассмотрена в [168]. Результаты зондирования пахотных земель в России с использованием многолетних временных рядов данных MODIS и метода классификации LAGMA представлены в [169]. Работы [170–177] посвящены спутниковому мониторингу характеристик снежного и ледового покровов.

Данные спутниковых измерений и полученные информационные продукты используются для изучения различных процессов и явлений в атмосфере, океане и на суше. Продолжаются совместные исследования ИВП РАН и НИЦ “Планета” по использованию данных дистанционного зондирования о характеристиках подстилающей поверхности при моделировании составляющих водного и теплового балансов для речного водосбора [178, 179]. Одной из важнейших областей применения данных ИК- и микроволновых зондировщиков (ИКФС-2, МТВЗА-ГЯ) является их усвоение в схемах численного прогноза погоды. Результаты использования измерений МТВЗА-ГЯ (в каналах атмосферного зондирования) в системе усвоения данных Гидрометцентра России представлены в [180]. Обнаружен значимый положительный эффект – повышение точности численного прогноза в южном полушарии. В СПбГУ сделана попытка оценки изменений климата Земли на основе сопоставлений спектров уходящего теплового ИК излучения разных лет – 1977–1979 и 2015–2017 гг. [181, 182].

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Amosov A.A.* Initial-boundary value problem for the nonstationary radiative transfer equation with diffuse reflection and refraction conditions // *J. Math. Sci.* 2018. V. 235. № 2. P. 117–137.
2. *Mikhailov G.A., Prigarin S.M., Rozhenko S.A.* Comparative analysis of vector algorithms for statistical modelling of polarized radiative transfer process // *Rus. J. Num. Analysis Math. Model.* 2018. V. 33. № 4. P. 253–263.
3. *Ambos A.Y., Mikhailov G.A.* Numerically statistical simulation of the intensity field of the radiation transmitted through a random medium // *Rus. J. Num. Analysis Math. Model.* 2018. V. 33. № 3. P. 161–171.
4. *Ambos A.Y., Lotova G., Mikhailov G.* New Monte Carlo algorithms for investigation of criticality fluctuations in the particle scattering process with multiplication in stochastic media // *Rus. J. Num. Analysis Math. Model.* 2017. V. 32. № 3. P. 165–172.
5. *Aristova E.N., Gertsev M.N., Shilkov A.V.* Lebesgue averaging method in serial computations of atmospheric

- radiation // *Comp. Math. Math. Phys.* 2017. V. 57. № 6. P. 1022–1035.
6. Кузьмин В.Л. Моделирование переноса поляризованного оптического излучения во временном и частотном представлениях // *Журн. Эксп. Теорет. Физики.* 2017. Т. 152. № 4. 685–693.
  7. Kim A., Prokhorov I.V. Theoretical and numerical analysis of an initial-boundary value problem for the radiative transfer equation with Fresnel matching conditions // *Comp. Math. Math. Physics.* 2018. V. 58. № 5. P. 735–749.
  8. Prokhorov I.V., Sushchenko A.A., Kim A. Initial boundary value problem for the radiative transfer equation with diffusion matching conditions // *J. Appl. Indust. Math.* 2017. V. 11. № 1. P. 115–124.
  9. Будак В.П., Желтов В.С., Лубенченко А.В., Фрейдлин К.С., Шагалов О.В. Быстрый и точный алгоритм численного моделирования переноса излучения в мутной среде на основе метода синтетических итераций // *Оптика атмосферы и океана.* 2016. Т. 29. № 9. С. 739–746.
  10. Korkin S., Lyapustin A., Sinyuk A., Holben B., Kokhanovskiy A. Vector radiative transfer code SORD: Performance analysis and quick start guide // *J.Q.S.R.T.* 2017. V. 200. P. 295–310.
  11. Задворных И.В., Грибанов К.Г., Захаров В.И., Itasu P. Программное обеспечение для моделирования переноса излучения теплового и ближнего ИК-диапазонов в атмосфере с учетом многократного рассеяния // *Оптика атмосферы и океана.* 2017. Т. 30. № 2. С. 128–133.
  12. Русскова Т.В., Журавлева Т.Б. Оптимизация последовательного программного кода для моделирования переноса солнечного излучения в вертикально-неоднородной среде // *Оптика атмосферы и океана.* 2016. Т. 29. № 10. С. 836–842.
  13. Васильев А.В., Мельникова И.Н., Новиков С.С. Влияние оптических параметров атмосферы на характеристики солнечной радиации // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса.* 2017. Т. 14. № 5. С. 285–299.
  14. Levashova N., Lukyanenko D., Mukhartova Y., Olchev A. Application of a three-dimensional radiative transfer model to retrieve the species composition of a mixed forest stand from canopy reflected radiation // *Remote Sensing.* 2018. V. 10. № 10. P. 1661.
  15. Shabanov N., Gastellu-Etchegorry J.-P. The stochastic Beer–Lambert–Bouguer law for discontinuous vegetation canopies // *J.Q.S.R.T.* 2018. V. 214. P. 18–32.
  16. Шефер О.В., Каргин Б.А. Ослабление лучистой энергии в уравнении переноса излучения для кристаллических облаков // *Изв. ВУЗов. Физика.* 2018. Т. 61. № 9. С. 18–28.
  17. Зиньков С.Ю., Сущенко А.А., Сущенко К.В. Анализ влияния поверхностного и объемного рассеяния в задаче гидролокации морского дна // *Сиб. электр. мат. изв.* 2018. Т. 15. С. 1361–1377.
  18. Стерлядкин В.В., Сазонов Д.С., Кузьмин А.В., Шарков Е.А. Наземные радиометрические измерения эффективной излучательной способности морской поверхности без абсолютной калибровки // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса.* 2018. Т. 15. № 2. С. 29–41.
  19. Николаева О.В. Новый алгоритм восстановления альbedo поверхности по данным спутникового зондирования // *Оптика атмосферы и океана.* 2016. Т. 29. № 3. С. 38–43.
  20. Николаева О.В. Исследование точности алгоритма восстановления альbedo поверхности с высоким пространственным разрешением по фрагменту спутникового изображения // *Оптика атмосферы и океана.* 2016. Т. 29. № 7. С. 12–18.
  21. Николаева О.В. Алгоритм коррекции влияния поглощения света в атмосферных газах на гиперспектральные данные дистанционного зондирования // *Компьютерная оптика.* 2018. Т. 42. № 2. С. 328–336.
  22. Васильев А.В., Огибалов В.П., Тимофеев Ю.М. Численные методы теории переноса излучения. Учебно-методическое пособие. Санкт-Петербург: СПбГУ. 2017. 305 с.
  23. Sklyadneva T.K., Rasskazchikova T.M., Arshinova V. Changes in the synoptic regime of Tomsk over the period of 1993–2016 // *SPIE Proc.* 2018. V. 10833. 108337G. <https://doi.org/10.1117/12.2503951>.
  24. Складнева Т.К., Антохин П.Н. Сравнительный анализ прихода суммарной радиации на территории Западной Сибири по данным реанализа и наземных наблюдений // *Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы: Материалы XXIII Международного симпозиума.* [Электронный ресурс – 1 CD-ROM]. ISBN 978-5-94458-167-9. Томск: Издательство ИОА СО РАН. 2017. С. D333–D336. [http://symp.iao.ru/files/symp/aoo/23/D\(1\).pdf](http://symp.iao.ru/files/symp/aoo/23/D(1).pdf).
  25. Zhuravleva T., Nasrtdinov I. Simulation of bidirectional reflectance in broken clouds: from individual realization to averaging over an ensemble of cloud fields // *Remote Sensing.* 2018. V. 10. № 9. P. 1342.
  26. Журавлёва Т.Б., Насртдинов И.М., Русскова Т.В. Влияние 3D-эффектов облаков на пространственно-угловые характеристики поля отраженной солнечной радиации // *Оптика атмосферы и океана.* 2016. Т. 29. № 9. С. 758–766.
  27. Russkova T., Zhuravleva T. Top-of-atmosphere reflectance over homogeneous Lambertian and non-Lambertian surfaces // *Applied Optics.* 2018. V. 57. № 22. P. 6345–6357.
  28. Русскова Т.В., Свириденков М.А., Журавлева Т.Б. О влиянии стратификации оптических характеристик атмосферы на яркость неба в плоскости солнечного вертикала // *Оптика атмосферы и океана.* 2015. Т. 28. № 12. С. 1095–1105.
  29. Незваль Е.И., Чубарова Н.Е. Многолетние изменения ультрафиолетовой радиации в области спектра 300–380 нм в Москве // *Метеорология и гидрология.* 2017. № 11. С. 5–13.
  30. Чубарова Н.Е., Пастухова А.С., Галин В.Я., Смышляев С.П. Многолетняя изменчивость УФ-радиа-

- ции в московском регионе по данным измерений и моделирования // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2018. Т. 54. № 2. С. 160–167.
31. Chubarova N., Zhdanova Y., Nezval Y. A new parameterization of the UV irradiance altitude dependence for clear-sky conditions and its application in the on-line UV tool over northern Eurasia // *Atm. Chem. Phys.* 2016. V. 16. P. 11867–11881.
  32. Чубарова Н.Е., Тимофеев Ю.М., Виролайнен Я.А., Поляков А.В. Оценки УФ-индексов в периоды пониженного содержания озона над Сибирью зимой-весной 2016 г. // *Оптика атмосферы и океана.* 2018. Т. 31. № 11. С. 902–905.
  33. Popovicheva O.B., Kozlov V.S., Engling G., Diapouli E., Persiantseva N.M., Timofeev M.A., Fan T.-S., Saraga D., Eleftheriadis K. Small-scale study of Siberian biomass burning: I. Smoke microstructure // *Aerosol and Air Quality Research.* 2015. V. 14. P. 1392–1401.
  34. Popovicheva O.B., Persiantseva N.M., Timofeev M.A., Shonija N.K., Kozlov V.S. Small-scale study of Siberian biomass burning: II. Smoke hygroscopicity // *Aerosol and Air Quality Research.* 2016. V. 16. № 7. P. 1558–1568.
  35. Козлов В.С., Шмаргунов В.П., Панченко М.В., Чернов Д.Г., Козлов А.С., Малышкин С.Б. Сезонная изменчивость распределения сажки по размерам в атмосферном аэрозоле // *Изв. ВУЗов. Физика.* 2015. № 12. С. 111–116.
  36. Mikhailov E.F., Mironov G.N., Poehlker C., Chi X., Krueger M.L., Shiraiwa M., Foerster J.-D., Poeschl U., Vlasenko S.S., Ryskhkevich T.I., Weigand M., Kilcoyne A.L.D., Andreae M.O. Chemical composition, microstructure, and hygroscopic properties of aerosol particles at the Zotino Tall Tower Observatory (ZOTTO), Siberia, during a summer campaign // *Atmospheric Chemistry and Physics.* 2015. V. 15. P. 8847–8869.
  37. Рышкевич Т.И., Миронов Г.Н., Миронова С.Ю., Власенко С.С., Чи Х., Андреае М.О., Михайлов Е.Ф. Сравнительный анализ гигроскопических свойств атмосферных аэрозолей по данным летней и зимней экспедиций 2011 года на сибирской фоновой станции Zotto // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана.* 2015. Т. 51. № 5. С. 578.
  38. Михайлов Е.Ф., Иванова О.А., Власенко С.С., Невбосько Е.Ю., Рышкевич Т.И. Измерения конденсационной активности ядер Айткена в пригороде Санкт-Петербурга // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана.* 2017. Т. 53. № 3. С. 370–378.
  39. Сакерин С.М., Кабанов Д.М., Польшкин В.В., Радионов В.Ф., Holben B.N., Smirnov A. Вариации оптических и микрофизических характеристик аэрозоля на маршруте российских антарктических экспедиций в восточной Атлантике // *Оптика атмосферы и океана.* 2016. Т. 29. № 8. С. 666–678.
  40. Сакерин С.М., Голобокова Л.П., Кабанов Д.М., Польшкин В.В., Радионов В.Ф. Зональное распределение физико-химических характеристик аэрозоля в восточной Атлантике // *Оптика атмосферы и океана.* 2018. Т. 31. № 4. С. 303–312.
  41. Сакерин С.М., Голобокова Л.П., Кабанов Д.М., Польшкин В.В., Турчинович Ю.С., Ходжер Т.В., Хуриганова О.И. Пространственно-временная изменчивость характеристик аэрозоля на маршруте Индо-атлантической экспедиции НИС “Академик Николай Страхов” // *Оптика атмосферы и океана.* 2017. Т. 30. № 1. С. 42–52.
  42. Копейкин В.М., Емиленко А.С., Исаков А.А., Лоскутова О.В., Пономарева Т.Я. Изменчивость сажевого и субмикронного аэрозоля в московском регионе в 2014–2016 гг. // *Оптика атмосферы и океана.* 2018. Т. 31. № 1. С. 5–10.
  43. Mikhailov E.F., Mironova S., Mironov G., Vlasenko S., Panov, Chi X., Walter D., Carbone S., Artaxo P., Heilmann M., Lavric J., Pöschl U., Andreae M.O. Long-term measurements (2010–2014) of carbonaceous aerosol and carbon monoxide at the Zotino Tall Tower Observatory (ZOTTO) in central Siberia // *Atmos. Chem. Phys.* 2017. V. 17. P. 14365–14392.
  44. Sakerin S.M., Bobrikov A.A., Bukin O.A. et al. On measurements of aerosol-gas composition of the atmosphere during two expeditions in 2013 along Northern Sea Route // *Atmos. Chem. Phys.* 2015. V. 15. № 21. P. 12413–12443.
  45. Сакерин С.М., Кабанов Д.М., Радионов В.Ф., Чернов Д.Г., Турчинович Ю.С., Лубо-Лесниченко К.Е., Прахов А.Н. Обобщение результатов измерений аэрозольной оптической толщины атмосферы на арх. Шпицберген в 2011–2016 гг. // *Оптика атмосферы и океана.* 2017. Т. 30. № 11. С. 948–955.
  46. Tomasi C., Kokhanovsky A.A., Lupi A. et al. Aerosol remote sensing in polar regions // *Earth-Science Reviews.* 2015. V. 140. P. 108–157.
  47. Chubarova N., Poliukhov A., Gorlova I. Long-term variability of aerosol optical thickness in Eastern Europe over 2001–2014 according to the measurements at the Moscow MSU MO AERONET site with additional cloud and NO<sub>2</sub> correction // *Atm. Meas. Tech.* 2016. V. 9. № 2. P. 313–334.
  48. Matvienko G.G., Belan B.D., Panchenko M.V. et al. Complex experiment on studying the microphysical, chemical, and optical properties of aerosol particles and estimating the contribution of atmospheric aerosol-to-earth radiation budget // *Atmos. Meas. Tech.* 2015. V. 8. № 10. P. 4507–4520.
  49. Chubarova N., Poliukhov A., Shatunova M., Rivin G., Becker R., Kinne S. Clear-sky radiative and temperature effects of different aerosol climatologies in the COSMO model // *Geography, Environment, Sustainability.* 2018. V. 11. № 1. P. 74–84.
  50. Smirnov A., Zhuravleva T.B., Segal-Rosenheimer M., Holben B.N. Limitations of AERONET SDA product in presence of cirrus clouds // *J.Q.S.R.T.* 2018. V. 206. P. 338–341.
  51. Горчаков Г.И., Васильев А.В., Веричев К.С., Семутникова Е.Г., Карпов А.В. Тонкодисперсный коричневый углерод в задымленной атмосфере // *Доклады АН.* 2016. Т. 471. № 1. С. 91–97.
  52. Горчаков Г.И., Карпов А.В., Панкратова Н.В., Семутникова Е.Г., Васильев А.В., Горчакова И.А. Ко-

- ричневый и черный углерод в задымленной атмосфере при пожарах в бореальных лесах // Исследование Земли из космоса. 2017. № 3. С. 11–21.
53. Горчаков Г.И., Карпов А.В., Васильев А.В., Горчакова И.А. Коричневый и черный углерод в смогах мегаполисов // Оптика атмосферы и океана. 2017. Т. 30. № 1. С. 5–11.
  54. Panchenko M.V., Zhuravleva T.B. Vertical profiles of optical and microphysical characteristics of tropospheric aerosol based on the results of aviation measurements // in Light Scattering Surveys 10. Ed. Kokhanovsky A. 2015. SPRINGER–PRAXIS. P. 199–234.
  55. Panchenko M.V., Terpigova S.A., Pol'kin V.V., Kozlov V.S., Chernov D.G. Modeling of Aerosol Radiation-Relevant Parameters in the Troposphere of Siberia on the Basis of Empirical Data // Atmosphere. 2018. V. 9. № 11. P. 414–430.
  56. Панченко М.В., Журавлева Т.Б., Козлов В.С., Насртдинов И.М., Полькин В.В., Терпугова С.А., Чернов Д.Г. Оценка радиационных эффектов аэрозоля в фоновых и задымленных условиях атмосферы Сибири на основе эмпирических данных // Метеорология и гидрология. 2016. № 2. С. 45–54.
  57. Журавлева Т.Б., Панченко М.В., Козлов В.С., Насртдинов И.М., Полькин В.В., Терпугова С.А., Чернов Д.Г. Модельные оценки динамики вертикальной структуры поглощения солнечного излучения и температурных эффектов в фоновых условиях и экстремально задымленной атмосфере по данным самолетных наблюдений // Оптика атмосферы и океана. 2017. Т. 30. № 10. С. 834–839.
  58. Насртдинов И.М., Журавлева Т.Б., Чеснокова Т.Ю. Оценка прямых радиационных эффектов фоновое и дымовое аэрозоля в ИК-области спектра для летних условий Сибири // Оптика атмосферы и океана. 2018. Т. 31. № 2. С. 121–127.
  59. Горчаков Г., Голицын Г.С., Ситнов С., Карпов А.В., Горчакова И., Гуцин Р., Даценко О. Крупномасштабные дымки Евразии в июле 2016 г. // Докл. АН. 2018. Т. 482. № 2. С. 209–212.
  60. Семутникова Е.Г., Горчаков Г.И., Ситнов С.А., Копейкин В.М., Карпов А.В., Горчакова И.А., Пономарева Т.Я., Исаков А.А., Гуцин Р.А., Даценко О.И., Курбатов Г.А., Кузнецов Г.А. Сибирская дымная мгла над европейской территорией России в июле 2016 г. загрязнение атмосферы и радиационные эффекты // Оптика атмосферы и океана. 2017. Т. 30. № 11. С. 962–970.
  61. Горчаков Г.И., Ситнов С.А., Семутникова Е.Г., Копейкин В.М., Карпов А.В., Горчакова И.А., Панкратова Н.В., Пономарева Т.Я., Кузнецов Г.А., Лоскутова О.В., Козловцева Е.А., Родина К.В. Крупномасштабное задымление европейской территории России и Белоруссии в июле 2016 г. // Исследование Земли из космоса. 2018. № 1. С. 27–42.
  62. Горчакова И.А., Мохов И.И., Аникин П.П., Емиленко А.С. Радиационный и температурный эффекты длинноволнового поглощения дымового аэрозоля при пожарах в московском регионе летом 2010 г. // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2018. Т. 54. № 2. С. 175–183.
  63. Горчакова И.А., Мохов И.И., Рублев А.Н. Радиационный и температурный эффекты мощного выноса пылевого аэрозоля в атмосферу // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2015. Т. 51. № 2. С. 131.
  64. Cheremisin A.A., Novikov P.V., Marichev V.N., Pavlov A.N. Interpretation of the lidar observations of volcanic aerosol over Tomsk and Vladivostok in the summer 2011 by trajectory method // Proc. SPIE 10466, 23rd International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics, 10466 76 (30 November 2017). <https://doi.org/10.1117/12.2292543>.
  65. Timofeev Yu., Virolainen Ya., Makarova M., Poborovsky A., Polyakov A., Ionov D., Osipov S., Imhasin H. Ground-based spectroscopic measurements of atmospheric gas composition near St. Petersburg (Russia) // J. Mol. Spectr. 2016. V. 323. P. 2–14.
  66. Виротайнен Я.А., Тимофеев Ю.М., Поберовский А.В., Еременко М., Дюфор Г. Определение содержания озона в различных слоях атмосферы с помощью наземной Фурье-спектрометрии // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2015. V. 51. № 2. С. 191–200.
  67. Тимофеев Ю.М., Березин И.А., Виротайнен Я.А., Макарова М.В., Поляков А.В., Поберовский А.В., Филиппов Н.Н., Фока С.Ч. Пространственно-временные вариации содержания CO<sub>2</sub> по данным спутниковых и наземных измерений вблизи Санкт-Петербурга // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2019. Т. 55. № 1. С. 65–72.
  68. Поляков А.В., Тимофеев Ю.М., Виротайнен Я.А., Макарова М.В., Поберовский А.В., Имхасин Х. Наземные измерения общего содержания фреонов в атмосфере в окрестности Санкт-Петербурга (2009–2017 гг.) // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2018. Т. 54. № 5. С. 575–583.
  69. Тимофеев Ю.М., Поляков А.В., Поберовский А.В. Рост содержания хлороводорода в атмосфере Северного полушария прекращается // Доклады АН. 2016. Т. 470. № 3. С. 344–346.
  70. Виротайнен Я.А., Тимофеев Ю.М., Поберовский А.В., Кирнер О., Хёпфнер М. Содержание нитрата хлора в атмосфере над Санкт-Петербургом // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2015. Т. 51. № 1. С. 60–68.
  71. Wang P., Elansky N.F., Timofeev Yu.M. et al. Long-term trends of carbon monoxide total columnar amount in urban areas and background regions: Ground- and satellite-based spectroscopic measurements // Adv. Atmos. Sci. 2018. V. 35. № 7. P. 785–795.
  72. Ракитин В.С., Еланский Н.Ф., Панкратова Н.В., Скороход А.И., Джола А.В., Штабкин Ю.А., Ван Пусай, Ван Ген Чен, Васильева А.В., Макарова М.В., Гречко Е.И. Исследование трендов общего содержания СО и СН<sub>4</sub> над Евразией на основе анализа наземных и орбитальных спектроскопических измерений // Оптика атмосферы и океана. 2017. Т. 30. № 6. С. 449–456.

73. *Rakitin V.S., Elansky N.F., Wang P. et al.* Changes in trends of atmospheric composition over urban and background regions of Eurasia: Estimates based on spectroscopic observations // *Geography. Environment. Sustainability*. 2018. V. 11. № 2. P. 84–96.
74. *Vigouroux C., Bauer Aquino C.A., Bauwens M. et al.* NDACC harmonized formaldehyde time-series from 21 FTIR stations covering a wide range of column abundances // *Atmos. Meas. Tech.* 2018. V. 11. P. 5049–5073.
75. *Виролайнен Я.А., Тимофеев Ю.М., Березин И.А., Смышляев С.П., Моцаков М.А., Кирнер О.* Валидация численных моделей атмосферы по спутниковым измерениям содержания озона // *Метеорология и гидрология*. 2018. № 3. С. 40–47.
76. *Timofeyev Y.M., Smyshlyayev S.P., Virolainen Y.A., Garkusha A.S., Polyakov A.V., Motsakov M.A., Kirner O.* Case study of ozone anomalies over northern Russia in the 2015/2016 winter: Measurements and numerical modeling // *Ann. Geophys.* 2018. V. 36. № 6. P. 1495–1505.
77. *Черепова М.В., Смышляев С.П., Макарова М.В., Поберовский А.В., Тимофеев Ю.М., Швед Г.М.* Исследование короткопериодной изменчивости общего содержания метана в атмосфере в региональном масштабе // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана*. 2018. Т. 54. № 7. С. 659–671.
78. *Тимофеев Ю.М., Виролайнен Я.А., Смышляев С.П., Моцаков М.А.* Озон над Санкт-Петербургом: сопоставление экспериментальных и модельных данных // *Оптика атмосферы и океана*. 2017. Т. 30. № 1. С. 20–26.
79. *Виролайнен Я.А., Тимофеев Ю.М., Смышляев С.П., Моцаков М.А., Кирнер О.* Изменчивость озонового слоя вблизи Санкт-Петербурга по данным спутниковых измерений SBUV и модельных расчетов (2000–2014 гг.) // *Исследование Земли из космоса*. 2017. № 3. С. 3–10.
80. *Смышляев С.П., Виролайнен Я.А., Моцаков М.А., Тимофеев Ю.М., Поберовский А.В., Поляков А.В.* Межгодовые и сезонные вариации содержания озона в разных высотных слоях атмосферы Санкт-Петербурга по данным наблюдений и численного моделирования // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана*. 2017. Т. 53. № 3. С. 343–359.
81. *Виролайнен Я.А., Тимофеев Ю.М., Поляков А.В., Ионов Д.В., Кирнер О., Поберовский А.В., Имхасин Х.* Сопоставление наземных измерений общего содержания  $O_3$ ,  $HNO_3$ ,  $HCl$  и  $NO_2$  с данными численного моделирования // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана*. 2016. Т. 52. № 01. С. 64–73.
82. *Швед Г.М., Виролайнен Я.А., Тимофеев Ю.М., Ермоленко С.И., Смышляев С.П., Моцаков М.А., Кирнер О.* Временные вариации содержания озона в субарктике по данным спутниковых измерений и моделирования // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана*. 2018. Т. 54. № 1. С. 36–44.
83. *Поляков А.В., Тимофеев Ю.М., Поберовский А.В., Виролайнен Я.А.* Учет высоких приземных концентраций атмосферных паров соляной кислоты при наземных спектроскопических измерениях // *Оптика атмосферы и океана*. 2015. Т. 28. № 02. С. 153–158.
84. *Виролайнен Я.А.* Методические аспекты определения содержания углекислого газа в атмосфере с помощью ИК-фурье-спектрометрии // *Журн. прикл. спектр.* 2018. Т. 85. № 3. С. 453–460.
85. *Makarova M.V., Poberovskii A.V., Hase F., Timofeyev Yu.M., Imhasin Kh.Kh.* Determination of the characteristics of ground-based IR spectral instrumentation for environmental monitoring of the atmosphere // *J. Appl. Spectr.* V. 83. № 3. P. 429–436.
86. *Ионов Д.В., Тимофеев Ю.М., Поберовский А.В.* Спектроскопические измерения содержания  $O_3$  и  $NO_2$  в атмосфере: коррекция наземного метода и результаты сопоставления с данными спутниковых измерений // *Оптика атмосферы и океана*. 2015. Т. 28. № 8. С. 704–710.
87. *Ionov D.V., Poberovskii A.V., Ionov V.V.* Spectroscopic remote sensing of  $NO_2$  levels in urban air // *J. Appl. Spectr.* 2017. V. 84. № 1. P. 109–113.
88. *Волкова К.А., Поберовский А.В., Тимофеев Ю.М., Ионов Д.В., Holben B.N., Smirnov A., Slutsker I.* Аэрозольные оптические характеристики по данным измерений солнечного фотометра CIMEL (AERONET) вблизи Санкт-Петербурга // *Оптика атмосферы и океана*. 2018. Т. 31. № 6. С. 425–431.
89. *Косцов В.С.* Восстановление параметров облачной атмосферы по данным радиометра RPG-HAT-PRO // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана*. 2015. Т. 51. № 2. С. 179–190.
90. *Kostsov V.S., Timofeyev Yu.M., Zaitsev N.A., Poberovsky A.V., Osipov S.I.* Application of the information approach to the analysis of two-year microwave observations of the atmosphere by the RPG-HAT-PRO radiometer at St. Petersburg University // *Int. J. Rem. Sens.* 2016. V. 37. № 14. P. 3346–3364.
91. *Бочковский Д.А., Виролайнен Я.А., Куликов Ю.Ю., Маричев В.Н., Поберовский А.В., Рыскин В.Г., Тимофеев Ю.М.* Наземный микроволновый мониторинг содержания озона в средней атмосфере над Петергофом и Томском во время стратосферного потепления зимой 2013–2014 годов // *Изв. вузов. Радиофизика*. Т. 59. № 4. С. 299–307.
92. *Макарова М.В., Арабаджян Д.К., Фока С.Ч., Парамонова Н.Н., Поберовский А.В., Тимофеев Ю.М., Панкратова Н.В., Ракитин В.С.* Оценка ночных эмиссий углеродосодержащих газов в пригородах Санкт-Петербурга // *Метеорология и гидрология*. 2018. № 7. С. 36–44.
93. *Ионов Д.В., Поберовский А.В.* Интегральная эмиссия окислов азота с территории Санкт-Петербурга по данным мобильных измерений и результатам численного моделирования // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана*. 2017. Т. 53. № 2. С. 232–241.
94. *Березин И.А., Виролайнен Я.А., Тимофеев Ю.М., Поберовский А.В.* Сравнения ИК и МКВ наземных методов измерений общего содержания водяного пара // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана*. 2016. Т. 52. № 3. С. 288–292.

95. Березин И.А., Тимофеев Ю.М., Виролайнен Я.А., Волкова К.А. Сравнение наземных микроволновых измерений общего содержания водяного пара с радиозондовыми данными // Оптика атмосферы и океана. 2016. Т. 29. № 1. С. 56–63.
96. Березин И.А., Тимофеев Ю.М., Виролайнен Я.А., Французова И.С., Волкова К.А., Поберовский А.В., Холбен Б.Н., Смирнов А.В., Слуцкер И. Анализ погрешностей измерения интегрального влагосодержания атмосферы фотометром CIMEL // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2017. Т. 53. № 01. С. 66–73.
97. Virolainen Y.A., Timofeyev Y.M., Kostov V.S. et al. Quality assessment of integrated water vapour measurements at St. Petersburg site, Russia: FTIR vs. MW and GPS techniques // Atmos. Meas. Tech. 2017. V. 10. P. 4521–4536.
98. Виролайнен Я.А., Тимофеев Ю.М., Поберовский А.В., Поляков А.В., Шаламянский А.М. Эмпирические оценки погрешностей измерений общего содержания озона различными методами и приборами // Оптика атмосферы и океана. 2017. Т. 30. № 2. С. 170–176.
99. Ионов Д.В., Калинин В.В., Тимофеев Ю.М., Зайцев Н.А., Виролайнен Я.А., Коцков В.С., Поберовский А.В. Сравнения радиофизических и оптического ИК наземных методов измерений интегрального содержания водяного пара в атмосфере // Изв. ВУЗов. Радиофизика. 2017. Т. LX. № 4. С. 336–345.
100. Virolainen Ya., Timofeyev Yu., Berezin I., Poberovsky A., Polyakov A., Zaitsev N., Imhasin N. Atmospheric integrated water vapour measured by IR and MW techniques at the Peterhof site (Saint Petersburg, Russia) // Int. J. Rem. Sens. 2016. V. 37. № 16. P. 3771–3785.
101. Березин И.А., Тимофеев Ю.М., Виролайнен Я.А., Поляков А.В., Зайцев Н.А. Влияние пространственного согласования на результаты сопоставления наземных и спутниковых измерений общего влагосодержания // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. Т. 13. № 4. С. 149–156.
102. Боровский А.Н., Арабов А.Я., Голицын Г.С., Груздев А.Н., Еланский Н.Ф., Елохов А.С., Мохов И.И., Савиных В.В., Сенник И.А., Тимажев А.В. Вариации общего содержания диоксида азота на Северном Кавказе в период с 1979 по 2008 гг. // Метеорология и гидрология. 2016. № 2. С. 29–44.
103. Голицын Г.С., Гречко Е.И., Генчен Ван, Пусай Ван, Джола А.В., Емиленко А.С., Копейкин В.М., Ракутин В.С., Сафронов А.Н., Фокеева Е.В. Исследование загрязнения атмосферы Москвы и Пекина окисью углерода и аэрозолем // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2015. Т. 51. № 1. С. 8–18.
104. Кожевников В.Н., Еланский Н.Ф., Моисеенко К.Б. Вариации содержания озона и двуокиси азота в поле орографических волн над приполярным Уралом // Доклады АН. 2017. Т. 475. № 6. С. 691–696.
105. Bruchkouski I., Borovski A., Elovkhov A., Postylyakov O. A layout of two-port DOAS system for investigation of atmospheric trace gases based on laboratory spectrograph // Proc. SPIE. 2016. V. 10035, 100353C–9. <https://doi.org/10.1117/12.2248634>
106. Бручковский И.И., Боровский А.Н., Джола А.В., Еланский Н.Ф., Постыляков О.В., Баженов О.Е., Романовский О.А., Садовников С.А., Капача 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.
107. Postylyakov O., Borovski A., Ivanov V. On determination of formaldehyde content in atmospheric boundary layer for overcast using DOAS technique // Proc. SPIE. 2015. V. 9680, 96804O–10. <https://doi.org/10.1117/12.2205925>
108. Savinykh V.V., Postylyakov O.V. On development of cross-platform software to continue long-term observations with the Brewer Ozone Spectrophotometer // Proc. SPIE. 2018. V. 10786, 107860V–12. <https://doi.org/10.1117/12.2515121>
109. Вишератин К.Н., Нерушев А.Ф., Орозалиев М.Д., Zheng X., Sun Sh., Liu L. Временная изменчивость общего содержания озона в азиатском регионе по данным наземных и спутниковых измерений // Исследование Земли из космоса. 2017. № 1. С. 1–10.
110. Вишератин К.Н. Квазидесятилетние вариации общего содержания озона, ветра, температуры и геопотенциальной высоты над станцией Ароза, Швейцария // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2016. Т. 52. № 1. С. 74–81.
111. Вишератин К.Н. Пространственно-временные вариации фазы квазидесятилетних колебаний общего содержания озона // Исследование Земли из космоса. 2017. № 2. С. 88–95.
112. Вишератин К.Н., Калашник М.В. Квазидесятилетние вариации метеопараметров нижней стратосферы и глобальных полей общего содержания озона по спутниковым данным // Исследование Земли из космоса. 2017. № 5. С. 3–13.
113. Коршунов В.А., Зубачев Д.С. Временные вариации высотного распределения стратосферного озона по данным лидарного зондирования над г. Обнинск // Метеорология и гидрология. 2018. № 3. С. 48–60.
114. Зубачев Д.С., Коршунов В.А., Терев Н.В. Концентрация стратосферного озона по данным лидарных, спутниковых и наземных измерений // Метеорология и гидрология. 2018. № 7. С. 113–119.
115. Rozanov S.B., Zavgorodniy A.S., Ignat'ev A.N. Technique of time-frequency analysis of a series of measurements of the radiation spectra of night mesospheric ozone in the millimetric wavelength range // Meas. Tech. 2016. V. 59. № 8. P. 870–877.
116. Rozanov S.B., Zavgorodniy A.S., Ignatyev A.N., Lukin A.N. Variations in microwave radiation of the nighttime mesospheric ozone over Moscow // Rad. Quant. El. 2017. V. 59. № 8–9. P. 741–753.
117. Груздев А.Н., Кропоткина Е.П., Соломонов С.В., Елохов А.С. Аномалии содержания озона и дву-

- оксида азота в стратосфере над московским регионом как проявление динамики стратосферного полярного вихря // Доклады АН. 2016. Т. 468. № 4. С. 451–455.
118. Груздев А.Н., Кропоткина Е.П., Соломонов С.В., Елохов А.С. Зимне-весенние аномалии содержания  $O_3$  и  $NO_2$  в стратосфере над московским регионом в 2010 и 2011 гг. // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2017. Т. 53. № 2. С. 223–231.
  119. Соломонов С.В., Кропоткина Е.П., Розанов С.Б., Игнатъев А.Н., Лукин А.Н. Влияние сильных внезапных стратосферных потеплений на озон в средней стратосфере по наблюдениям на миллиметровых волнах // Геомагнетизм и аэрономия. 2017. Т. 57. № 3. С. 392–400.
  120. Antokhin P.N., Arshinova V.G., Arshinov M.Y. et al. Distribution of trace gases and aerosols in the troposphere over Siberia during wildfires of summer 2012 // J. Geoph. Res.: Atmospheres. 2018. V. 123. № 4. P. 2285–2297.
  121. Ясюкевич А.С., Клименко М.В., Куликов Ю.Ю., Клименко В.В., Бессараб Ф.С., Кореньков Ю.Н., Маричев В.Н., Ратовский К.Г., Колесник С.А. Изменения параметров средней и верхней атмосферы во время внезапного стратосферного потепления в январе 2013 г. // Солнечно-земная физика. 2018. Т. 4. № 4. С. 62–75.
  122. Matvienko G.G., Kulikov Y.Y., Marichev V.N., Bochkovsky D.A., Krasilnikov A.A., Ryskin V.G. Study of the influence of the stratospheric warming in January 2013 on the vertical structure of ozone and temperature in the middle atmosphere over Tomsk using microwave and lidar diagnostics // ILRC 27 EPJ Web of Conferences. 2016. V. 119. 24002. <https://doi.org/10.1051/epjconf/2016119224002>
  123. Nikitin A.V., Lyulin O.M., Mikhailenko S.N., Perevalov V.I. et al. GOSAT-2014 methane spectral line list // J.Q.S.R.T. 2015. V. 154. P. 63–71.
  124. Tashkun S.A., Perevalov V.I., Gamache R.R., Lamouroux J. CDSD-296, high resolution carbon dioxide spectroscopic databank: Version for atmospheric applications // J.Q.S.R.T. 2015. V. 152. P. 45–73.
  125. Чеснокова Т.Ю., Ченцов А.В., Рокотян Н.В., Захаров В.И. Определение содержания парниковых газов из атмосферных спектров солнечного излучения с использованием различных спектроскопических данных по линиям поглощения // Оптика атмосферы и океана. 2015. Т. 28. № 5. С. 489–495.
  126. Chesnokova T.Yu., Chentsov A.V., Rokotyay N.V., Zakharov V.I. Impact of difference in absorption line parameters in spectroscopic databases on  $CO_2$  and  $CH_4$  atmospheric content retrievals // J. Mol. Spectr. 2016. V. 327. P. 171–179.
  127. Чеснокова Т.Ю., Ченцов А.В., Фирсов К.М. Моделирование атмосферного радиационного переноса в задачах определения общего содержания водяного пара с различными спектроскопическими базами по линиям поглощения  $H_2O$  // Оптика атмосферы и океана. 2015. Т. 28. № 11. С. 958–965.
  128. Петрова Т.М., Солодов А.М., Щербаков А.П., Дейчули В.М., Солодов А.А., Пономарев Ю.Н., Чеснокова Т.Ю. Параметры уширения линий поглощения молекулы воды давлением аргона, полученные с помощью различных моделей формы контура // Оптика атмосферы и океана. 2016. Т. 29. № 10. С. 821–827.
  129. Фирсов К.М., Чеснокова Т.Ю., Клиточенко И.И. Вклад континуального поглощения  $H_2O$  в потоки длинноволнового излучения облачной и безоблачной атмосферы // Оптика атмосферы и океана. 2016. Т. 29. № 10. С. 843–849.
  130. Фирсов К.М., Чеснокова Е.Ю., Размолов А.А., Ченцов А.В. Вклад континуального поглощения водяного пара в потоки коротковолнового солнечного излучения в атмосфере земли при наличии перистой облачности // Оптика атмосферы и океана. 2017. Т. 30. № 10. С. 813–820.
  131. 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.
  132. Асмус В.В., Бедрицкий А.И., Стасенко В.Н., Тасенко С.В., Успенский А.Б. Развитие в Росгидромете космической подсистемы наблюдений и системы геофизического мониторинга // Метеорология и гидрология. 2017. № 7. С. 35–49.
  133. Успенский А.Б., Асмус В.В., Козлов А.А., Крамчанинова Е.К., Стрельцов А.М., Чернявский Г.М., Черный И.В. Абсолютная калибровка каналов атмосферного зондирования спутникового микроволнового радиометра МТВЗА-ГЯ // Исследование Земли из космоса. 2016. № 5. С. 57–70.
  134. Успенский А.Б., Крамчанинова Е.К., Косцов В.С., Успенский С.А., Черный И.В. Развитие системы внешней калибровки и валидации данных измерений микроволнового радиометра МТВЗА-ГЯ КА “Метеор-М” № 2 // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 4. С. 27–35.
  135. Gayfulin D., Tsyruльников M., Uspensky A. Post-launch assessment and adaptive correction for atmospheric sounding channels of the satellite microwave radiometer MTVZA-GY // Pure Appl. Geoph. 2018. V. 175. № 10. P. 3653–3670.
  136. Gayfulin D., Tsyruльников M., Uspensky A. Assessment and recalibration of Meteor-M N2 microwave imager/sounder MTVZA-GY data in atmospheric sounding channels // GSICS Quart. Newsletter. 2018. V. 12. № 1. P. 6–8.
  137. Поляков А.В., Тимофеев Ю.М., Виротайнен Я.А., Успенский А.Б., Завелевич Ф.С., Головин Ю.М., Козлов Д.А., Рублев А.Н., Кухарский А.В. Спутниковый атмосферный зондировщик ИКФС-2. 1. Анализ измерений спектров уходящего излучения // Исследование Земли из космоса. 2016. № 5. С. 71–78.
  138. Zavelevich F., Kozlov D., Kozlov I., Cherkashin I., Uspensky A., Kiseleva Yu. IKFS-2 radiometric calibration

- tion stability in different spectral bands // GSICS Quarterly: Winter Issue, 2018. P. 4–6.
139. Головин Ю.М., Завелевич Ф.С., Козлов Д.А., Козлов И.А., Монахов Д.О., Никулин А.Г., Успенский А.Б., Рублев А.Н., Кухарский А.В. Инфракрасный фурье спектрометр ИКФС 2: результаты эксплуатации на борту метеоспутника “Метеор-М” №2 // Исследование Земли из космоса. 2017. № 4. С. 88–100.
  140. Filei A., Rublev A., Zaitsev A. Radiometric inter-calibration of MSU-MR shortwave channels on-board Meteor-M No. 2 relative to AVHRR on-board Metop-A // GSICS Quart. Newsletter. 2018. V. 12. № 1. P. 11–13.
  141. Киселева Ю.В., Гектин Ю.М., Зайцев А.А., Кухарский А.В., Рублев А.Н., Успенский А.Б. Интеркалибровка данных измерений в ИК-каналах сканера геостационарного метеоспутника “ЭлектроЛ” № 1 по данным измерений ИК-зондировщика AIRS // Исследование Земли из космоса. 2015. № 6. С. 68–78.
  142. Rublev A.N., Gorbarenko E.V., Golomolzin V.V., Borisov E.Y., Kiseleva Ju.V., Gektin Yu.M., Zaitsev A.A. Inter-calibration of infrared channels of geostationary meteorological satellite imagers // Front. Environ. Sci. 27 November 2018. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2018.00142>
  143. Filei A., Rublev A., Kiseleva Yu., Zaitsev A. Radiometric inter-calibration between MSU-GS and VIIRS shortwave channels // GSICS Quart. Newsletter. 2018. V. 12. № 1. P. 13–15.
  144. Асмус В.В., Тимофеев Ю.М., Поляков А.В., Успенский А.Б., Головин Ю.М., Завелевич Ф.С., Козлов Д.А., Рублев А.Н., Кухарский А.В., Пяткин В.П., Русин Е.В. Температурное зондирование атмосферы по данным спутникового ИК фурье-спектрометра // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2017. Т. 53. № 4. С. 487–492.
  145. Поляков А.В., Тимофеев Ю.М., Успенский А.Б., Кухарский А.В. Спутниковый атмосферный зондировщик ИКФС-2. 2. Валидация результатов температурного зондирования атмосферы // Исследование Земли из космоса. 2018. № 1. С. 81–90.
  146. Rusin E., Pyatkin V., Kozlov A., Rublev A., Uspensky A., Polyakov A., Virolainen Ya., Timofeyev Yu. Fast Radiative Transfer Model for hyperspectral Meteor-M data simulation // GSICS Quart. Newsletter. 2015. V. 9. № 3. P. 5–7.
  147. Гаркуша А.С., Поляков А.В., Тимофеев Ю.М., Виролainen Я.А., Кухарский А.В. Определение общего содержания озона по данным измерений спутникового ИК фурье спектрометра ИКФС-2 в облачной атмосфере // Исследование Земли из космоса. 2018. № 2. С. 58–64.
  148. Гаркуша А.С., Поляков А.В., Тимофеев Ю.М., Виролainen Я.А. Определение общего содержания озона по данным измерений спутникового ИК Фурье-спектрометра // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2017. Т. 53. № 4. С. 493–501.
  149. Фалалеева В.А., Фомин Б.А. Спектроскопические проблемы в прямых задачах спутникового зондирования атмосферы и пути их преодоления // Оптика атмосферы и океана. 2016. Т. 29. № 9. С. 733–738.
  150. Волкова Е.В., Успенский А.Б. Оценки параметров облачного покрова и осадков по данным сканирующих радиометров полярно-орбитальных и геостационарных метеоспутников // Исследование Земли из космоса. 2015. № 5. С. 1–14.
  151. Волкова Е.В., Успенский А.Б., Кухарский А.В. Специализированный программный комплекс получения и валидации спутниковых оценок параметров облачности и осадков // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 3. С. 7–26.
  152. Волкова Е.В. Определение микрофизических параметров облачного покрова по спутниковым данным // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 4. С. 265–279.
  153. Волкова Е.В. Оценки параметров облачного покрова и осадков по данным радиометра МСУ-МР с полярно-орбитального метеоспутника “Метеор-М” № 2 для Европейской территории России // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 5. С. 300–320.
  154. Бондур В.Г., Гинзбург А.С. Эмиссия углеродсодержащих газов и аэрозолей от природных пожаров на территории России по данным космического мониторинга // Докл. АН. 2016. Т. 466. № 4. С. 473.
  155. Русскова Т.В., Зенкова П.Н. Содержание диоксида азота в тропосфере Западной Сибири по данным спутниковых наблюдений. Пространственно-временная изменчивость // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 7. С. 221–235.
  156. Postylyakov O.V., Borovski A.N., Makarenkov A.A. First experiment on retrieval of tropospheric NO<sub>2</sub> over polluted areas with 2.4-km spatial resolution basing on satellite spectral measurements // Proc. SPIE. 2017. V. 10466, 104662Y-8. <https://doi.org/10.1117/12.2285794>
  157. Заболотских Е.В. Современные методы определения интегральных параметров влагозапаса атмосферы и водозапаса облаков // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2017. Т. 53. № 3. С. 335–342.
  158. Заболотских Е.В., Шапрон Б. Нейронно-сетевой метод оценки интенсивности дождя над океанами по данным измерений спутникового радиометра AMSR2 // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2016. Т. 52. № 1. С. 92.
  159. Zabolotskikh E.V., Chapron B. Improvements in atmospheric water vapor content retrievals over open oceans from satellite passive microwave radiometers // IEEE J. Sel. Topics in Appl. Earth Obs. Rem. Sens. 2017. V. 10. № 7. С. 3125–3133.
  160. Reul N., Chapron B., Mouche A. A new generation of tropical cyclone size measurements from space // Bull. Am. Met. Soc. 2017. V. 98. № 22. С. 2367–2385.
  161. Ракитин В.С., Штабкин Ю.А., Еланский Н.Ф., Панкратова Н.В., Скороход А.И., Гречко Е.И.,

- Сафронов А.Н. Результаты сопоставления спутниковых измерений общего содержания CO, CH<sub>4</sub> и CO<sub>2</sub> с наземными спектроскопическими данными // Оптика атмосферы и океана. 2015. Т. 28. № 9. С. 816–824.
162. Рокотян Н.В., Itasu R., Захаров В.И., Грибанов К.Г., Хаматнурова М.Ю. Амплитуда сезонного цикла CO<sub>2</sub> в атмосфере Уральского региона по результатам наземного и спутникового ИК-зондирования // Оптика атмосферы и океана. 2014. Т. 27. № 9. С. 819–825.
163. Плахина И.Н., Панкратова Н.В., Махоткина Е.Л. Сравнение данных наземного и спутникового мониторинга аэрозольной оптической толщины атмосферы для территории России // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 2. С. 225–234.
164. Калашиник М.В., Нерушев А.Ф., Ивангородский Р.В. Характерные масштабы и горизонтальная асимметрия струйных течений в атмосфере земли // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2017. Т. 53. № 2. С. 179–187.
165. Нерушев А.Ф., Вишератин К.Н., Ивангородский Р.В. Пространственно-временная изменчивость высотных струйных течений по данным спутниковых измерений // Исследование Земли из космоса. 2017. № 6. С. 31–45.
166. Быков Ф.Л., Василенко Е.В., Гордин В.А., Тарасова Л.Л. Статистическая структура поля влажности верхнего слоя почвы по данным наземных и спутниковых наблюдений // Метеорология и гидрология. 2017. № 6. С. 68–83.
167. Волкова Е.В., Успенский С.А. Дистанционное определение температуры подстилающей поверхности, приземной температуры воздуха и эффективной температуры по спутниковым данным для юга ЕТР // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13. № 5. С. 46–58.
168. Успенский А.Б., Кухарский А.В., Успенский С.А. Валидация результатов спутникового мониторинга температуры поверхности суши // Метеорология и гидрология. 2015. № 2. С. 81–95.
169. Bartalev S.A., Plotnikov D.E., Loupian E.A. Mapping of arable land in Russia using multiyear time series of MODIS data and the LAGMA classification technique // Rem. Sens. Let. 2016. V. 7. № 3. P. 269–278.
170. Бухаров М.В. Распознавание свойств ледяного покрова Арктики и Антарктики по измерениям микроволновым радиометром МТВЗА-ГЯ // Метеорология и гидрология. 2015. № 7. С. 56–65.
171. Бухаров М.В. Исследование влияния вихрей обтекания подводных гор на свойства льда по спутниковым микроволновым измерениям // Метеорология и гидрология. 2016. № 10. С. 50–60.
172. Бухаров М.В. Полусуточная периодичность полей разрежения и сжатия в ледяном покрове Арктики по данным спутникового радиометра МТВЗА-ГЯ // Метеорология и гидрология. 2017. № 1. С. 67–77.
173. Асмус В.В., Василенко Е.В., Зятягалова В.В., Иванова Н.П., Кровотынцев В.А., Максимов А.А., Тренина И.С. Космический мониторинг ледяного покрова и состояния водной среды Каспийского моря // Метеорология и гидрология. 2018. № 10. С. 81–95.
174. Тихонов В.В., Раев М.Д., Шарков Е.А., Боярский Д.А., Репина И.А., Комарова Н.Ю. Спутниковая микроволновая радиометрия морского льда полярных регионов. Обзор // Исследование Земли из космоса. 2016. № 4. С. 65–84.
175. Тихонов В.В., Раев М.Д., Шарков Е.А., Боярский Д.А., Репина И.А., Комарова Н.Ю. Мониторинг морского льда полярных регионов с использованием спутниковой микроволновой радиометрии // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 5. С. 150–169.
176. Митник Л.М., Митник М.Л., Чернявский Г.М., Черный И.В., Выкочко А.В., Пичугин М.К., Заболотских Е.В. Приводный ветер и морской лед в Баренцевом море по данным микроволновых измерений со спутников “Метеор-м” № 1 и GCOM-W1 в январе–марте 2013 г. // Исследование Земли из космоса. 2015. № 6. С. 36–45.
177. Zabolotskikh E.V., Guryvich I.A., Chapron B. Polar lows over the Eastern part of the Eurasian Arctic: The sea-ice retreat consequence // IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters. 2016. V. 13. № 10. P. 1492–1496.
178. Muzylev E.L., Startseva Z.P., Uspensky A.B., Volkova E.V. Modeling water and heat balance components for large agricultural region utilizing information from meteorological satellites // Water Resources. 2018. T. 45. № 5. С. 672–684.
179. Музылев Е.Л., Старцева З.П., Успенский А.Б., Волкова Е.В., Василенко Е.В., Кухарский А.В., Зейлигер А.М., Ермолаева О.С. Использование данных дистанционного зондирования при моделировании водного и теплового режимов сельских территорий // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 6. С. 108–136.
180. Гайфулин Д.Р., Цырульников М.Д., Успенский А.Б., Крамчанинова Е.К., Успенский С.А., Свиренко П.И., Горбунов М.Е. Численные эксперименты по использованию измерений спутникового микроволнового радиометра МТВЗА-ГЯ в системе усвоения данных Гидрометцентра России // Метеорология и гидрология. 2017. № 9. С. 36–47.
181. Тимофеев Ю.М., Поляков А.В., Козлов Д.А., Делер В., Ортель Д., Шпенкух Д. Сопоставление спектров уходящего теплового ИК излучения разных лет // Исследование Земли из космоса. 2018. № 5. С. 65–72.
182. Козлов Д.А., Тимофеев Ю.М., Поляков А.В., Козлов И.А., Делер В., Ортель Д., Шпенкух Д. Методика пересчета спектров теплового излучения атмосферы различного спектрального разрешения для взаимного сопоставления измерений бортовых инфракрасных фурье-спектрометров // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 1. С. 52–60.

**Russian Investigations in the Field of Atmospheric Radiation in 2015–2018****Yu. M. Timofeev<sup>1, \*</sup> and E. M. Shulgina<sup>1, \*\*</sup>**<sup>1</sup>*Saint-Petersburg State University, Universitetskaya nab., 7/9, St. Petersburg, 199034 Russia**\*e-mail: y.timofeev@spbu.ru**\*\*e-mail: shulgina@troll.phys.spbu.ru*

A short survey prepared by the Russian Commission on Atmospheric Radiation contains the most significant results of works in the field of atmospheric-radiation studies performed in 2015–2018. It is part of the Russian National Report on Meteorology and Atmospheric Sciences prepared for the International Association on Meteorology and Atmospheric Sciences (IAMAS). During this period, the Russian Commission on Atmospheric Radiation, jointly with concerned departments and organizations, ran two International Symposiums on Radiation and Dynamics (ISARD-2015, ISARD-2017). At the conferences, central problems in modern atmosphere physics were discussed: radiative transfer and atmospheric optics; greenhouse gases, clouds, and aerosols; remote methods of measurements; and new measurement data. This survey presents 5 directions covering the whole spectrum of investigations performed in the field of atmospheric radiation.

**Keywords:** atmospheric radiation, radiation transfer, ground-based and satellite measurements, radiative climatology