УДК 551.510

РОССИЙСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ АТМОСФЕРНОГО ОЗОНА И ЕГО ПРЕДШЕСТВЕННИКОВ В 2015–2018 гг.

© 2020 г. Н. Ф. Еланский*

Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Пыжевский пер., 3, Москва, 109017 Россия *e-mail: n.f.elansky@mail.ru Поступила в релакцию 01.11.2019 г.

После доработки 15.11.2019 г. Принята к публикации 20.11.2019 г.

Обзор содержит наиболее значимые результаты работ российских ученых в области исследований атмосферного озона, выполненных в 2015–2018 гг. Он является частью национального отчета России по метеорологии и атмосферным наукам, который был подготовлен для Международной ассоциации по метеорологии и атмосферным наукам (IAMAS). Отчет был рассмотрен и одобрен на XXVII Генеральной Ассамблее международного геодезического и геофизического союза (IUGG). К обзору прилагается список основных публикаций российских ученых за 2015–2018 гг., посвященных исследованиям атмосферного озона и его предшественников.

Ключевые слова: атмосферный озон, озоновый слой, состав атмосферы, малые газовые примеси, качество воздуха, химия озона, процессы переноса

DOI: 10.31857/S0002351520020042

1. ТРОПОСФЕРНЫЙ ОЗОН И ЕГО ПРЕДШЕСТВЕННИКИ

1.1. Наблюдения. Российская сеть мониторинга приземной концентрации озона (ПКО) и его предшественников не изменилась за последние четыре года. Фоновые станции, упомянутые в обзоре [1]: Кисловодская высокогорная научная станция (КВНС), Ловозеро, Монды и Карадаг – продолжали проводить регулярные измерения. ПКО также измерялась на 300-метровых вышках в Обнинске (Калужская область, НПО "Тайфун") и Зотине (Красноярский край, ИФА РАН). Фоновые станции оснащены сетевыми приборами, рекомендованными Глобальной службой атмосферы (GAW WMO). Все приборы регулярно калибровались. Томская региональная сеть станций измерения ПКО Института оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН (ИОА СО РАН) продолжала работу. Эта сеть включает в себя четыре станции: две фоновые станции (Фоновая и Березоречка), базовый экспериментальный комплекс (БЭК), расположенный в пригородной зоне Томска и городскую станцию исследования тропосферного озона (TO). На станциях Фоновая и БЭК для измерения ПКО отбирались пробы воздуха на высотных уровнях 10 и 30 м, что позволило оценить вертикальные потоки озона. На станциях ТО и Березоречка отбирались пробы воздуха на высотах 5 и 10 м соответственно. На всех станциях приземные концентрации озона измерялись круглосуточно с интервалом 1 ч.

К сожалению, система мониторинга ПКО в урбанизированных регионах развивается медленно. На Государственной сети мониторинга загрязнения атмосферы, станции которой расположены в 240 российских городах, измерения проводятся не чаще 4-х раз в сутки. Непрерывные поминутные измерения приземных концентраций озона, его предшественников (CO, NO, NO₂ и неметановых углеводородов (NMHC)) и других компонентов атмосферы проводились в Москве на сети станций Мосэкомониторинга (около 40 станций) [URL: http://www.mosecom.ru/stations/]. Регулярные наблюдения проводились также в Томске, Улан-Удэ и Санкт-Петербурге [1]. Непрерывные наблюдения приземной концентрации озона и его предшественников ведутся с 2000 г. в регионе озера Байкал, на трех постоянных станциях мониторинга, характеризующих районы с разной степенью загрязнения воздуха: Иркутск – городские условия (постоянное антропогенное воздействие), Листвянка - сельские условия (периодическое влияние региональных источников) и Монды – удаленная горная станция представляющая фоновые условия.

Изменения в составе атмосферы, экосистем и климата дали толчок для более активных полевых, морских и авиационных наблюдений пространственно-временной изменчивости озона в

атмосфере над Северной Евразией, которые обычно проводятся в рамках международных программ и проектов. Среди наиболее важных реализованных проектов — зондирование тропосферного озона с самолетов-лабораторий АН-30 и АН-2 (ИОА СО РАН). Полеты выполнялись в режиме мониторинга в регионе, расположенном к югу от Новосибирска, а эпизодические крупномасштабные наблюдения охватывали весь сибирский регион, включая Арктику. В 2015–2018 гг. над североевропейской Россией было выполнено несколько исследовательских полетов на самолете ЯК-42 Центральной аэрологической обсерватории (ЦАО). Трансконтинентальные наблюдения состава атмосферы над Россией на передвижной железнодорожной лаборатории (эксперименты TROICA) были завершены в 2010 г. Однако большой объем полученных данных о приземном озоне и его предшественниках продолжает обрабатываться и анализироваться. Вертикальное распределение озона в тропосфере и нижней стратосфере измерялось лидаром (ИОА, Томск) и с помощью озонозондов, которые запускались ЦАО и ИОА СО РАН. Лидарное зондирование слоя озона на 5-16 км проводилось методом дифференциального поглощения на длинах волн 241/341 нм. В ИОА также продолжала действовать станция приема спутниковой информации. Данные об озоне, получаемые со спутников, использовались для решения многих задач.

1.2 Распределение и изменчивость. Фоновая станция Карадаг расположена на территории Карадагской научно-исследовательской станции им. Т.И. Вяземского РАН. Прибором АРОА 370 (HORIBA) измерялись приземные концентрации озона [2-7]. На станции также измерялись концентрации его предшественников. Суточный максимум ПКО наблюдался в послеобеденное время с 14 до 17 ч. В сезонном цикле ПКО отмечался максимум в июле — августе (82 мкг/м³ в среднем за 2015— 2018 гг), минимум в декабре (46 мкг/м³). В целом режим озона в Карадагском природном заповеднике подобен режиму в сельской местности центральной Европы. Однако в курортный летний период эпизодически отмечалось высокое содержание в воздухе летучих органических соединений (ЛОС) природного и антропогенного происхождения, что приводило к росту концентрации озона до 181 мкг/м³ в мае 2016 г. и 195 мкг/м³ в августе 2018 г. Высокая корреляция с температурой воздуха и влажностью предполагает возможное влияние бризовой циркуляции на поведение озона. Самые продолжительные наблюдения ПКО в России (с 1989 по 2018 г.) проведены на КВНС, расположенной на Северном Кавказе на высоте 2070 м. Быстрое снижение ПКО на 1.53 ± 0.14 ppb/г., наблюдаемое с 1989 по 1996 г., замедлилось к 2006 г.; в последние годы тренд ПКО был близок к нулю. Полученные ряды данных отражают изменения, произошедшие в промышленности стран бывшего Советского Союза в 1990-х гг., влияние крупномасштабных атмосферных процессов на дальний перенос озона и его предшественников, вертикальное перемешивание и радиационный режим атмосферы.

Сезонная изменчивость озона на всех трех станциях в Байкальском регионе имела общие черты максимум весной в апреле, минимум осенью в сентябре-октябре [8-12]. Средние месячные концентрации озона на фоновой станции Монды и сельской станции Листвянка были близки между собой (от 30-40 ppb осенью до 50-70 ppb весной). В то же время, в городских условиях (г. Иркутск) они были существенно ниже (от 10-20 ppb осенью до 40-50 мкг/м³ весной). Загрязненность атмосферы в городских условиях скорее способствует разрушению озона, чем его образованию. В частности, наблюдения на сельской станции Листвянка показали, что во время северо-западного переноса загрязненного воздуха от крупных ТЭЦ и г. Иркутск, концентрации озона могут понизиться до нулевых значений. Это указывает на полное расходование озона на окисление содержащихся в шлейфах примесей – прежде всего оксидов азота и углерода Наблюдения ПКО на фоновой станции Монды в течение 19 лет демонстрируют понижение концентрации озона в последние годы в этом районе (рис. 1). Сезонный ход ПКО здесь имеет только один заметный максимум, приходящийся на конец апреля-начало мая [9]. Четко выраженного минимума не наблюдается. После весеннего максимума следует падение концентрации, продолжающееся до середины лета.

Исследования изменений концентраций озона (Томская сеть станций) при прохождении волн тепла и холода над районом измерений позволили получить количественную зависимость ПКО от температуры воздуха [13]. При минимальной приземной концентрации озона (1999 г.) и 30°С, увеличение температуры на 1°С, приводит к увеличению концентрации озона на 5 мкг/м³. При максимальной концентрации озона (2001 г.) и той же температуре воздуха концентрация озона может возрасти почти на 25 мкг/м³ при изменении температуры на 1°С. Для промежуточных периодов (1997 и 2010 гг.) это увеличение составляет порядка 14 мкг/м³ на 1°С. Квадратичный характер этой зависимости обусловлен нелинейным увеличением скоростей реакций по отношению к росту температуры воздуха и квадратичным увеличением по отношению к увеличению концентрации ЛОС, выделяемых растительностью [13]. Связь между озоном и температурой воздуха в теплое время года зависит также от характера атмосферной циркуляции [14, 15]. Было установлено, что корреляция О₃ с температурой воздуха выше в условиях хорошо развитой адвекции масс. Анализ циркуляционных процессов и особенно-



Рис. 1. Приземная концентрация озона (ppb) по наблюдениям на станции Монды (51.6° с.ш.; 101.0° в.д.) с 01.01.1997 по 31.12.2015 г. Станция расположена на территории Саянской солнечной обсерватории на горе Часовые Сопки. Высота над уровнем моря – 2005 м [9].

стей фотохимической генерации озона, характерных для Западной Сибири, позволил выявить существенную связь между снежным покровом и вариациями ПКО [16]. Многолетние наблюдения атмосферных газовых и аэрозольных примесей на станции TOR в Томской области показали, что минимальные ПКО наблюдаются в арктической воздушной массе (средние значения равны 27 мкг/м³), а максимальные (около 55 мкг/м³) – в тропической воздушной массе [15, 17]. С одной стороны, это отражает разные химические истории воздушных масс, а с другой – это результат нелинейной зависимости скорости образования озона при повышении температуры воздуха.

По данным самолетного зондирования изучалось распределение озона в период интенсивных лесных пожаров на территории Сибири [18-21]. Показано, что в условиях повышенных концентраций аэрозоля происходит сток озона на аэрозольных частицах. Однако, несмотря на это, в отдельных слоях атмосферы наблюдаются повышенные концентрации озона. Наличие таких явлений указывает на то, что и при пониженной мощности УФ-Б излучения в тропосфере идет фотохимическая генерация озона из продуктов лесных пожаров. В этом случае основную роль играют процессы окисления СО и ЛОС. Вертикальные профили концентраций O_3 , CO, CO₂ и CH₄, измеренные с борта самолета над российской зоной Арктики, сравнивались с полученными прибором IASI, установленного на спутнике MetOp [14-17]. Было показано, что спутниковые данные переоценивают концентрации СН₄ и СО₂ в атмосферном слое 0-8 км над континентальной арктической зоной и занижают эти концентрации над океаном. Соглас-

но спутниковым данным, превышение концентрации метана над континентом составляет 28 ppb в пограничном слое атмосферы (ПСА) и быстро увеличивается в средней (182 ppb) и верхней (113 ppb) тропосфере. Недооценка его концентрации над океаном составляет в среднем 37 ppb в ПСА и 73 и 71 ppb в средней и верхней тропосфере соответственно. Различия между данными измерений СО₂ с самолета и спутников над континентом в ПСА составляют в среднем 18.2 ррт. В свободной тропосфере эти различия уменьшаются в среднем до 10.8 ppm на высоте 4 км и до 2.8 ppm на высоте 8 км. Вертикальные профили концентраций О₃, измеренные различными методами над океаном и континентом, в основном совпадают. Небольшие расхождения наблюдаются в основном для средней и верхней тропосферы. Хорошее согласие наблюдалось между данными лидарного зондирования О₃, полученными на Сибирской лидарной станции, и профилями, восстановленными по спутниковым данным (MetOp) [20, 22-24]. Для условий Сибири в работе [19, 25] изучалось соотношение между скоростью генерации озона в ПСА и его притоком из свободной тропосферы. Показано, что скорость притока озона из вышележащих слоев атмосферы составляет 20% от скорости фотохимического образования озона в ПСА. В [25] вертикальные потоки озона в приземном слое атмосферы были рассчитаны с использованием данных, полученных из измерений градиента его концентрации (сентябрь 2015 г.-март 2016 г.) на высотной башне, расположенной на станции Фоновый. Значительные суточные изменения потоков озона отмечены в сентябре, феврале и марте. В эти месяцы минимальные потоки озона наблю-



Рис. 2. Средний суточный ход приземной концентрации O₃, CO, NO, NO₂ (а–г) в Москве по наблюдениям на Экологической станции ИФА РАН с 2002 по 2010 г. Доверительные интервалы рассчитаны с уровнем значимости 95% [27].

дались ночью, а максимальные потоки, достигавшие, соответственно, -3.8, -3.2 и -3.4 мкг/м²с в светлое время суток. В октябре, ноябре, декабре и январе суточных изменений не наблюдалось.

Измерения озона и его предшественников с самолета при полетах над горами выявили волновые структуры в их распределении. В работе [26] было показано, что такие образования могут быть вызваны влиянием внутренних гравитационных волн (ВГВ), которые образуются при обтекании воздушным потоком гор и которые при определенных условиях могут проникать в свободную тропосферу и стратосферу. В работе [26] на основе двумерной нелинейной полуаналитической модели обтекания гор произвольной формы с учетом сдвига скорости ветра в натекающем потоке был исследован процесс образования ВГВ и их воздействия на структуру распределения озона и диоксида азота в атмосфере. Получено, что изменения концентрации О3 в тропосфере и общего содержания NO₂ в вертикальном столбе под воздействием ВГВ могут достигать соответственно $8 \text{ мкг/м}^3 \text{ и } 3 \times 10^{15} \text{ мол./см}^2$, что соответствует результатам наблюдений. Таким образом показано, что регистрируемые с земли или с борта самолета изменения содержания примесей в атмосфере могут служить удобным инструментом для исследования волновых процессов.

1.3. Озон и его предшественники в атмосфере городов. На содержание озона в атмосфере города влияют эмиссии предшественников (NO, NO₂, СО, ЛОС и других соединений), перенос примесей и химическая трансформация, сухое и влажное осаждение, а также метеорологические условия. Регулярные наблюдения ПКО и его предшественников проводились на экологической станции (ЭС) Института физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН (ИФА РАН), расположенной на территории Метеорологической обсерватории МГУ им. М.В. Ломоносова. В работах [27, 28] приведены результаты анализа временной изменчивости приземной концентрации примесей O₃, NO, NO₂, CO и SO₂ в Москве по наблюдениям на ЭС в 2002-2012 гг. и ее связи с метеорологическими процессами и состоянием городской инфраструктуры (рис. 2). Основное антропогенное воз-

Year	Концентрация, мкг/м ³					
	СО	NO	NO ₂	CH ₄	SO ₂	PM ₁₀
2005	740 ± 63	49.1 ± 4.2	40.6 ± 3.5	1405 ± 20	7.2 ± 0.8	28.6 ± 5.1
2006	700 ± 93	42.1 ± 5.8	41.0 ± 5.7	1445 ± 40	5.2 ± 1.3	32.9 ± 5.1
2007	610 ± 77	7743.7 ± 5.1	38.9 ± 4.5	1450 ± 40	5.0 ± 0.5	36.9 ± 4.7
2008	559 ± 34	38.4 ± 2.7	36.6 ± 2.6	1335 ± 25	2.5 ± 0.6	31.8 ± 4.0
2009	564 ± 37	35.6 ± 3.4	37.9 ± 3.6	1350 ± 15	4.3 ± 1.9	32.3 ± 3.8
2010	653 ± 56	38.3 ± 4.2	41.1 ± 4.5	1305 ± 30	5.1 ± 0.7	35.1 ± 5.0
2011	531 ± 42	28.3 ± 2.4	39.3 ± 3.3	1270 ± 20	5.8 ± 1.8	23.1 ± 3.9
2012	496 ± 31	28.6 ± 2.4	41.6 ± 3.5	1320 ± 20	5.6 ± 0.9	22.1 ± 2.4
2013	482 ± 35	28.7 ± 2.3	42.6 ± 3.4	1315 ± 20	7.1 ± 1.4	22.7 ± 3.4
2014	483 ± 31	26.3 ± 2.2	39.1 ± 3.3	1325 ± 15	5.7 ± 0.4	27.9 ± 4.2
Trend, % yr ⁻¹	-3.6 ± 0.7	-5.0 ± 0.6	0.3 ± 0.5	-1.1 ± 0.3	-1.1 ± 2.1	-3.7 ± 1.7

Таблица 1. Осредненные по всей территории Москвы среднегодовые приземные концентрации предшественников озона и их временные тренды по данным регулярных наблюдений на 34-х станциях Мосэкомониторинга и станции ИФА РАН в период 2005–2014 гг. [33]

действие на состав городской атмосферы оказали количественные и качественные изменения в системе автотранспорта. Они сопровождались увеличением ПКО на 1% в год и снижением концентрации NO. Содержание NO_2 за данный период практически не изменилось. Показано также, как изменения синоптических ситуаций, сопровождающиеся сменой воздушных масс, влияют на содержание озона и общее загрязнение приземного слоя атмосферы.

Полезным и надежным инструментом для изучения динамики загрязнения АПС особенно на коротких временных интервалах является акустическое зондирование атмосферы [27, 28]. В частности, содарные наблюдения температурной стратификации АПС на метеообсерватории МГУ с 2002 по 2014 г. позволили объяснить основные причины изменений концентраций O₃, NO, NO₂, CO, SO₂ при разрушении приподнятых инверсий в утренние часы. Также было показано, что особенности температурной стратификации городского АПС ответственны за различия между процессами формирования утреннего и вечернего максимумов концентрации СО и NO, а также их ночного и дневного минимумов. Благодаря содарным наблюдениям был описан механизм быстрого образования экстремально высоких концентраций озона в турбулентной зоне перед усиливающимся холодным фронтом [27]. Взаимосвязи между составом атмосферы в городах и термической структурой АПС исследовались в [29, 34-37]. Были проанализированы данные измерений метеорологических параметров и концентраций О₃, CO, NO, NO_2, SO_2 , проведенных на передвижной железнодорожной лаборатории в различных российских городах в разные сезоны и в разное время суток (эксперименты TROICA 1995–2010 гг.). Наиболее заметное повышение температуры воздуха на территории города (остров тепла) наблюдалось в ночное время в центральных районах крупных городов (1.9° C). В небольших городах превышение ночных температур несколько выше, чем его среднее значение в городах среднего размера, из-за отопления малоэтажных частных домов, что приводит к большему потеплению поверхностного слоя воздуха при ночных температурных инверсиях.

Данные измерений приземных концентраций NO, NO₂, CO, SO₂, CH₄ μ PM₁₀ B Mockbe Ha 46 ctahциях Мосэкомониторинга в период с 2005 по 2014 г. использовались для изучения временной и пространственной изменчивости загрязненности приземного слоя атмосферы над городом [31, 32]. Как сезонные, так и межгодовые колебания концентраций загрязняющих веществ, а также их тренды тесно связаны с колебаниями городской инфраструктуры и погодными условиями (табл. 1). Были изучены особенности недельного цикла в изменениях концентрации примесей. Наибольшее снижение дневных (8:00-20:00) концентраций в воскресенье по отношению к рабочим дням недели составляет 18.9 \pm 5.6% для NO. Для CO, NO2 и PM10 амплитуды недельного цикла равны $9.3 \pm 3.2, 13.6 \pm 2.8$ и $10.9 \pm 5.5\%$ соответственно. Изменения концентраций CH₄ и SO₂ в течение недели не являются значимыми.

По данным многолетних измерений приземных концентраций CO, NO_x, SO₂ и CH₄ и вертикальной температурной и ветровой стратификации АПС были рассчитаны удельные потоки примесей и их интегральные эмиссии со всей территории Московского мегаполиса [33]. В течение 2005–2014 гг. средние за год интегральные эмиссии CO, NO_x и CH₄ снижались со скоростью -1.9 ± 0.3 , -1.7 ± 0.4 и $-7.8 \pm 3.1\%$ в год соответственно, а выбросы SO₂ увеличивались со скоро-

стью $3.3 \pm 2.3\%$ в год. Сравнение рассчитанных значений эмиссий с данными из глобальной инвентаризации EDGAR v4.2 для Москвы дало неоднозначные результаты. С одной стороны, значения выбросов СО практически совпадают, с другой стороны, данные инвентаризации для NO_x, SO₂ и CH₄ оказались значительно выше. Из анализа вклада различных источников в суммарные эмиссии, следует, что выбросы московских предприятий металлургической и химической промышленности значительно завышены в этой инвентаризации, причем выбросы SO₂ завышены примерно в 30 раз.

Многочисленные пересечения городов передвижной лабораторией в ходе трансконтинентальных экспедиций 1995-2010 гг. (эксперименты TROICA) дали обширную информацию о содержании примесей в приземном воздухе этих городов [30]. По данным измерений NO_x, CO и CH₄ были рассчитаны удельные потоки и интегральные эмиссии этих примесей от 10 наиболее крупных городов, через которые проходит Транссибирская магистраль. Выбросы СО в городах зависят от размера города и состояние городской инфраструктуры и варьируются от 50 Ггр/г. для Ярославля до 130 Ггр/г. для Екатеринбурга. Для большинства городов они согласуются с данными инвентаризации EDGAR v4.2. В то же время рассчитанные эмиссии NO_x в 3.5 раза меньше, чем в базе данных EDGAR v4.2, а эмиссии CH₄ меньше на порялок. Показано, что вклал разных источников, которые лежат в основе инвентаризации не отражает реальное состояние инфраструктуры российских городов.

На основе многолетних измерений NO₂ и формальдегида (H₂CO) на Звенигородской научной станции (ЗНС) ИФА РАН изучалось расположение источников этих примесей с использованием методов CWT (concentration weighted trajectory) [38, 39]. Основным источником высоких аномалий H₂CO в холодное время года является Москва, в которой выделяются промышленные районы на востоке и юго-востоке Москвы. Здесь наиболее высоки эмиссии антропогенного формальдегида и ЛОС, которые являются предшественниками H₂CO. В теплое время года положительные аномалии H₂CO на ЗНС из-за вклада Москвы существенно ниже, что может быть связано с меньшим временем жизни Н₂СО при повышенной инсоляции в это время года. Аномально высокие значения NO₂ в любое время года связаны с нахождением ЗНС в шлейфе загрязненного воздуха от Москвы.

2. СТРАТОСФЕРНЫЙ ОЗОНОВЫЙ СЛОЙ

Сеть, включающая 28 озонометрических станций, оборудованных фильтровыми озонометрами M124 (Главная географическая обсерватория им. М.В. Воейкова), продолжала работать в России. Данные об общем содержании озона (ОСО) передавались в Всемирный центр данных по озону и ультрафиолетовому солнечному излучению (WOUDC, www.woudc.org), а результаты анализа текущего состояния озонового слоя регулярно публиковались в журнале Метеорология и гидрология и в ежегодных отчетах о состоянии окружающей среды, которые выпускаются Федеральной службой России по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Росгидромет) [http://meteorf.ru/].

В 2011–2014 гг. на станциях КВНС, Обнинск и Томск, оснащенных спектрофотометрами Брюера, продолжались наблюдения общего содержания озона. Данные, полученные на этих станциях, также регулярно передавались в WOUDC. В 2016 г. спектрофотометры были откалиброваны с использованием мобильного стандарта спектрофотометра Брюера № 17 [40-42]. Содержание NO₂ в вертикальном атмосферном столбе, которое тесно связано с ОСО и которое необходимо для изучения изменений в состоянии озонового слоя, измерялось каждый день на КВНС, ЗНС и в Томске. ОСО регулярно измерялось также с помощью ИК-Фурье-спектрометра (IRFS) на станции Петергоф (59.88° с.ш., 29.83° в.д.) в окрестностях Санкт-Петербурга [43-49]. В частности, было обнаружено, что в районе Санкт-Петербурга спутниковые наблюдения систематически занижают ОСО по сравнению с наземными измерениями.

Вариации и тренды общего содержания озона за период 1979-2014 гг. изучались с использованием базы данных реанализа ОСО ERA-Interim и спутниковых данных TOMS/SBUV/OMI [45]. Авторы оценили, насколько вариации ОСО связаны с арктическими и антарктическими колебаниями, квазидвухлетними колебаниями зонального ветра в экваториальной стратосфере, Эль-Ниньо — южным колебанием, зональным средним меридиональным тепловым потоком в нижней стратосфере, солнечной активностью (СА), стратосферным содержанием озоноразрушающих веществ (ОРВ) и продуктов вулканических извержений. В результате было показано, что вариации ОСО в глобальном масштабе могут быть хорошо описаны с использованием регрессионной зависимости ОСО от ОРВ и СА. В конце января 2016 г. на севере Урала и в Сибири было зарегистрировано самое низкое за весь период наблюдений, начиная с 1970-х гг., общее содержание озона на уровне около 200 DU. Это явление классифицируется как озоновая "мини-дыра". В [51] были проанализированы возможные причины аномально низких уровней ОСО зимой 2016 г. Показано, что доминирующую роль в возникновении депрессий озона в конце января 2016 г. играли динамические факторы. Аномальное развитие крупномасштабных атмосферных процессов в Северном полушарии делает вероятным образование даже более существенных депрессий озона в Арктике в будущем [52, 53].

В работах [54-58] были рассмотрены фазовые соотношения между вариациями глобального распределения ОСО, параметров нижней стратосферы и солнечной активностью в период с 1979 по 2015 гг. Фаза максимумов квазидесятилетних вариаций ОСО в среднем опережает максимумы солнечной активности в умеренных и высоких широтах Северного полушария на 20 мес. и отстает на 21 мес. в высоких широтах Южного полушария. Смена знака лага между СА и ОСО происходит на 35°-40° ю.ш. Для вариаций ОСО и атмосферных параметров характерна более короткопериодная изменчивость, чем для вариаций солнечной активности, что, возможно, обусловлено интерференцией присутствующих в большинстве рассмотренных атмосферных рядов колебаний в интервале 85-105 и 120-140 мес.

Пространственно-временная изменчивость атмосферного озона при атмосферном блокировании проанализирована в [59-63]. Показано, что с областями блокирований связаны отрицательные аномалии ОСО (до -15%), обусловленные главным образом квазигоризонтальной адвекцией обедненного озоном субтропического воздуха в тыловой части блокирующего антициклона и сопутствующим подъемом тропопаузы. Наиболее интенсивное уменьшение озона выявлено в слое тропопаузы (до -1.25 мг м⁻² с⁻¹ на уровне 200 гПа). По оценкам [63] убыль озона в нижней стратосфере при аномально продолжительном атмосферном блокировании над европейской территорией России (ЕТР) летом 2010 г. достигала 40%. Перенос воздуха с юга на север через разрыв тропопаузы сопровождался переносом водяного пара из низкоширотной тропосферы непосредственно в высокоширотную стратосферу. Уменьшение ОСО в области блокирования частично связано с фотохимическим разрушением озона в нижней стратосфере в каталитических реакциях водородного цикла [63]. Уменьшение ОСО и малооблачная антициклоническая погода в областях блокирований ведет к увеличению ежедневной эритемной дозы УФ облучения (до 20%). При атмосферном блокировании над ЕТР летом 2010 г. аномалии ОСО в Северном полушарии имели волновую структуру, обусловленной влиянием стационарной планетарной волны Россби [60, 62]. Длина волны ОСО в Евро-Атлантическом регионе составляла 5500—6300 км (волновое число k = 4-5).

Измерения ОСО фильтровыми озонометрами М-124 проводились на российских антарктических станциях Мирный, Новолазаревская и Восток. В работе [64] обсуждаются результаты анализа временной изменчивости озона с 1975 г. по настоящее время. К началу 1990-х гг. средние величины ОСО в сентябре и октябре на станции Мирный уменьшились на 70-75% от их среднего значения за 1975-1980 гг. Постепенное уменьшение количества озоноразрушающих веществ в атмосфере, привело к ослаблению озоновой дыры и ее большей зависимости от циркуляционных процессов. С начала 2000-х гг. наблюдается тенденция возвращения к режиму ОСО в Антарктике, существовавшего до 1975 г. В работе [65] собраны результаты морских экспедиций 2013-2014 гг. в Атлантическом и Южном океанах (59-я антарктическая экспедиция), в которых проводились измерения ОСО и концентрации примесей в приводном слое атмосферы. Для отдельных широтных зон представлены средние характеристики спектральной аэрозольной оптической толшины атмосферы. обшего содержания озона, концентраций аэрозоля и некоторых малых газовых примесей. Проведено сопоставление результатов, полученных на прямом и обратном маршруте НЭС "Академик Трешников", с данными предшествующих измерений.

Разработан и утвержден новый метод определения ОСО по измерениям на ИК-спектрометре ФС-2 [45]. Этот метод позволил детально изучить временные колебания содержания озона при формировании мини-озоновых дыр над Россией и с помощью численного моделирования определить основные механизмы их образования зимой и весной 2015–2016 гг. [66]. Исследования ультрафиолетового излучения в этот период показали, что опасные уровни УФ излучения на поверхности земли наблюдались весной 2016 г. в России.

Ряд работ посвящен изучению изменений содержания NO2 под влиянием различных природных факторов на основе данных, полученных по наземным спектрометрическим измерениям. Долговременные измерения содержания (OC) NO₂ в вертикальном столбе атмосферы проводились на КВНС в 1981-2008 гг. по прямому солнечному излучению утром и вечером при больших зенитных углах солнца (рис. 3) [67]. Результаты прямых солнечных измерений сравнивались с результатами одновременных измерений NO₂ по рассеянному в зените солнечному излучению, проводившихся на ЗНС в 1993-2008 гг. Для анализа трендов использовался метод множественной линейной регрессии [67]. Регрессионная модель и учитывала линейный тренд, эффекты солнечной активности, квазидвухлетнее колебание, Эль-Ниньо-Южное колебание, а также влияние продуктов вулканических извержений вулканов Эль-Чичон и Пинатубо. Межгодовая эволюция ОС NO2 для КВНС характеризуется его общим увеличением в 1980-х гг., за которым следует его общее уменьшение в течение 1990-х и 2000-х гг. Линейные тренды для утренних и вечерних данных ОС NO₂ оставляют, соответственно, около 1.6 и 1.9% в год для периода 1981–1989 гг. и –1.4 и –0.8% в





Рис. 3. Содержание NO₂ в вертикальном столбе атмосферы по наблюдениям ослабления прямого солнечного излучения с 1981 по 2009 г. на Высокогорной научной станции ИФА РАН. Станция расположена на Северном Кавказе на высоте 2070 м над уровнем моря [67].

год для периода 1990—2008 гг. Тренды за весь период наблюдений составляли около -1.1 и -0.7% в год. Тренды NO₂ для ЗНС являются отрицательными и равны -0.38% в год за весь период наблюдений с 1990 по март 2016 г. В [67] был сделан вывод о том, что стратосферная доля ОС NO₂ над Европейской территорией России (ЕТР) имела негативный тренд в течение последних 2.5 десятилетий.

6

 $NO_2, 10^{15} \text{ moje} \times \text{cm}^{-2}$

Зимне-весенние аномалии NO₂, наблюдавшиеся в северном полушарии зимой и весной 2011 г., были проанализированы в [68]. Они сопровождались аномалиями в ОСО и в температуре стратосферы и были вызваны переносом из области арктической озоновой дыры. Вертикальные профили NO₂, измеренные на ЗНС, показали, что в формировании рекордной отрицательной аномалии NO₂ заметную роль сыграла денитрификация полярной стратосферы. Оказалось, что корреляция стратосферного содержания NO₂ с ОСО и температурой стратосферы в умеренных и высоких широтах северного и южного полушарий в зимне-весенний период зависит от фазы квазидвухлетнего колебания (КДК). Как сезонные, так и широтные распределения амплитуд эффекта КДК были получены в работе [69]. Различия в суточных циклах NO₂ были выявлены между западными и восточными фазами КДК. Результаты спектрометрических измерений вертикальных профилей NO₂ и микроволновых измерений вертикальных профилей О3 в Московском регионе были использованы для анализа аномалий содержания примесей, вызванных внезапным стратосферным потеплением (ВСП) в начале февраля 2010 г. и широтным смещением полярного вихря в направлении ЕТР в конце марта 2011 г. [70, 71]. В первом случае концентрация О₃ увеличилась на 85%, а стратосферное содержание NO₂ увеличилось в два раза; в последнем случае концентрация

 O_3 уменьшилась на четверть, а содержание NO₂ уменьшилось в два раза по сравнению с периодами, предшествующими возникновению аномалий. Была получена значительная отрицательная корреляция стратосферных NO₂ и O₃ с потенциальной завихренностью. Влияние основных и второстепенных ВСП на стратосферный NO₂ и общий озон в 1958-2015 гг. изучалось в [72, 73]. Выявлена зависимость ВСП от КДК и 11-летнего солнечного цикла. Значительные отрицательные аномалии NO₂, О₃ и температуры во время основных ВСП вызваны смешением стратосферного циркумполярного вихря от полюса к югу. Значительные положительные аномалии чаще наблюдаются при ВСП, сопровождающихся полярно-вихревым расщеплением. Они вызваны переносом стратосферного воздуха из низких широт к ЕТР. Основные ВСП могут привести к значительным изменениям вертикального профиля NO2. При этом изменения содержания NO₂ в разных стратосферных слоях могут быть противоположного знака, когда край полярного вихря находится над местом наблюдений. Первое экспериментальное доказательство влияния солнечного протонного события на стратосферное содержание NO2 было получено из наземных спектрометрических измерений в средних и высоких широтах северного полушария [74]. Солнечное протонное событие в октябре 2003 г. привело к увеличению содержания NO2 в верхней стратосфере на 0.6×10^{15} см⁻², что составило примерно одну треть от увеличения OC NO₂.

3. РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ НАБЛЮДЕНИЙ

Сеть полностью автоматизированных спектрофотометров Brewer, эксплуатируемая с начала 1980-х годов, является одной из старейших глобальных систем, предоставляющих данные для оценок озона. Существующее программное обеспечение для управления спектрофотометрами Брюера было создано более 35 лет назад и нуждается в замене в связи с завершением сроков эксплуатации компьютерных платформ, для которых оно было разработано. Новое кроссплатформенное программное обеспечение для спектрофотометров Brewer разработано в ИФА РАН [75–78]. Программное обеспечение может работать на компьютерах с современными многозадачными операционными системами (Windows, Linux, macOS), и в то же время имеет один исходный код.

Продолжено усовершенствование метода DOAS определения интегрального содержания (ИС) формальдегида (H₂CO) в ПСА и исследование особенностей его временного распределения. ИС Н₂СО восстанавливается по измерениям УФ-спектров рассеянного солнечного излучения. В работе [79] развивается новая версия метода, применимого в безоблачных условиях с улучшенным контролем качества данных. Разработанный метод прошел аттестацию в международных сравнениях и показал обоснованное согласие с результатами базового аттестованного ранее метода. По результатам безоблачных наблюдений на ЗНС и в ИОА СО РАН получены оценки временной изменчивости ИС Н₂СО [80, 81]. Показано существование статистически значимой положительной зависимости ИС формальдегида от температуры в теплое время года. В частности, на ЗНС зависимость от температуры составляет 0.86×10^{15} мол/см²°С. Наблюдаемая положительная связь обусловлена увеличением биогенных выбросов изопрена и других летучих органических предшественников озона (ЛОС) с ростом температуры, а также увеличением площадей лесных и торфяных пожаров. В воздушных массах, приходящих на ЗНС из Москвы, наблюдается устойчивое превышение ИС H₂CO. Несмотря на значительную удаленность от Москвы, наблюдаемые на ЗНС значения в целом на 10% выше наблюдаемых в Томске.

Впервые разработан метод определения ИС H₂CO, применимый в условиях сплошной облачности [82, 83]. Для валидации разработанного метода авторы выполнили сравнение средних наблюдаемых значений примеси, полученных в облачные дни, со значениями, полученными в ясных условиях, для различных воздушных масс [84]. Значения H₂CO в облачных условиях систематически больше результатов для ясных дней, однако, эта разница сушественно меньше для фоновых воздушных масс, чем для воздушных масс, прошедших через Московский мегаполис. Такая разница может быть связана с особенностями фотохимических процессов образования и разрушения формальдегида в условиях различной освещенности и химического состава. Продолжались работы по разработке новой измерительной аппаратуры для выполнения измерений O_3 и NO₂ методом DOAS [85]. Новый спектрометр ИФА принял участие в международных сравнениях приборов и методик измерения NO₂, проведенных в сентябре 2016 г. в Нидерландах [86]. На сравнениях были представлены 36 спектральных приборов от 26 научных групп. В ИФА совместно с коллегами из Белорусского государственного университета разработан спектрометр для выполнения многоугловых измерений содержания некоторых малых примесей методом MAX-DOAS. В работе [87] приведены первые результаты измерений вертикального распределения аэрозольной экстинкции, полученные этим прибором на российской антарктической станции Прогресс.

В ИФА РАН впервые разработан метод определения интегрального содержания NO₂ в тропосфере с высоким пространственным разрешением – около 2 км по данным космической съемки земной поверхности [88, 89]. Разработанный подход используется для наблюдения на действующей в настоящее время системе российских спутников Ресурс-П. Продемонстрирована возможность выявлять локальные источники загрязнения и определять их местоположение. Также были усовершенствованы алгоритмы реконструкции параметров облаков на основе одновременной съемки неба двумя цифровыми фотокамерами [90-93]. Новая модель учитывает дисторсию объективов 3 и 5 порялков и позволяет получать более точные оценки высоты нижней границы облаков, скорости и направления ветра.

4. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

На основании предложенного ранее алгоритма расчета лимитирующих стадий продолжения цепи в системе реакций разрушения стратосферного озона рассчитан вклад O_x , HO_x , NO_x , ClO_x и BrO_x циклов в гибель озона в конце XXI века на широте 50° с.ш. в различные сезоны года [94–98]. Расчеты проводились с помощью интерактивной двумерной модели SOCRATES и данных о концентрациях основных парниковых газов, приведенных в сценарии RCP 4.5 IPPC, согласно которому стабилизация радиационного форсинга должна произойти к концу XXI в. В работе приводятся данные об абсолютных скоростях гибели озона в циклах и их относительном вкладе в гибель озона в 1995 и 2100 гг. в диапазоне высот 15-55 км для марта, июня, сентября и декабря на широте 50° с.ш.

Для изучения изменчивости озона и антропогенного загрязнения в Московском регионе использованы химико-транспортные модели CHIMERE и COSMO-ART [100, 101]. Определена эффективность адаптации моделей к региональным условиям и исследована возможность использования эмиссий ЕМЕР для моделирования качества воздуха [102]. Верификация химикотранспортных моделей (CHIMERE, COSMO-ART) и выполненный в Гидрометцентре России комплекс исследований с использованием различных сценариев показали высокую эффективность применения моделирования для создания современной технологии регулярных расчетов концентраций O₃, CO, NO_x, PM₁₀ и других примесей в городских условиях. При этом расчет концентраций малых газовых примесей и аэрозолей выполняется благодаря усвоению метеорологических данных системой COSMO [103].

Разработана методология использования спутниковых измерений химически активных малых примесей атмосферы – таких как NO2 и CO – с целью оценки эмиссий углекислого газа (СО₂), связанных со сжиганием ископаемого топлива [104]. В основе методологии лежит обратное моделирование эмиссий оксидов азота (NO_x) и CO с применением химико-транспортной модели и оценка факторов конверсии эмиссий NO_x и CO в эмиссии СО₂ по данным имеющихся инвентаризаций соответствующих эмиссий. Продемонстрирована возможность получения оценки суммарных годичных эмиссий антропогенных эмиссий СО₂ в крупном индустриальном регионе с относительной точностью около 10%. Исследована атмосферная эволюция дымового аэрозоля, играющего важную роль в климатообразующих процессах [105-109]. Выявлены эффекты значительного (примерно в два раза) относительного прироста массовой концентрации мелкодисперсного аэрозоля и аэрозольной оптической толщи в дымовых шлейфах от природных пожаров в процессе их мезомаштабного переноса. Показано, что обнаруженные эффекты могут определяться совокупностью физических и химических процессов с участием полулетучих органических соединений (ПЛОС). Полученные результаты свидетельствуют о важности учета процессов с участием ПЛОС в оценках и прогнозах климатического воздействия аэрозоля, в том числе – на изменение состава атмосферы и теплового баланса Арктики.

В климатическую модель Института вычислительной математики РАН включен аэрозольный блок, который описывает эволюцию всех основных видов аэрозолей [110]. Модельное распределение аэрозоля принимается во внимание при расчете радиационных потоков, оказывающих влияние на газовый состав атмосферы и, в частности, на содержание озона. С климатической моделью проведены численные эксперименты, которые продемонстрировали изменения в течение 10 лет характеристик аэрозоля и газового состава атмосферы.

Исследовано пространственное и временное распределение изопрена (основного химического источника образования озона) и его продуктов окисления, метилвинилкетона и метакролеина на территории Восточной Сибири [111—116]. Данные измерений были получены на железнодорожной лаборатории (эксперименты TROICA). Численные расчеты проводились с применением химико-транспортных моделей WRF Chem и GEOS Chem. Было обнаружено, что временная изменчивость распределения измеренных концентраций изопрена хорошо согласуется с результатами моделирования. Концентрации изопрена, метилвинилкетона (MVK) и метакролеина (MACR) демонстрируют ярко выраженные суточные вариации, в то время как среднее отношение MVK + MACR к изопрену не показывает четкого суточного цикла. Кроме того, сумма MVK и MACR находится в хорошей корреляции с изопреном ($R \sim 0.60-0.86$).

В работах [117, 118] представлены результаты численного моделирования климатологических параметров распределений озона и других малых газовых составляющих атмосферы Земли в диапазоне высот 0-90 км с использованием глобальной фотохимической модели CHARM. Для описания пространственного переноса химически активной примеси в модели (схема Пратера) были использованы расчетные параметры глобальных полей ветра и температуры с помощью модели общей циркуляции атмосферы ARM. Результаты численных расчетов объясняют механизмы воздействия на состав верхней атмосферы изменений потоков УФ радиации Солнца в цикле его активности, а также разрушения озона в полярных областях частицами высоких энергий космического происхождения.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В 2015-2018 гг. группа российских исследователей продолжила исследования атмосферного озона. Заметные достижения связаны с изучением процессов, определяющих пространственновременную изменчивость озона и его предшественников в атмосфере над Северной Евразией, Арктикой и Антарктикой. В связи с реорганизацией Российской академии наук многие научные коллективы испытывали трудности с обновлением приборной базы и проведением регулярных наблюдений. Поэтому больше внимания уделялось анализу полученных ранее данных и разработке новых методов наблюдений. Особенно следует отметить созданию новых технологий в области дистанционного зондирования с использованием спектрофотометров наземного и космического базирования. Для валидации данных наблюдений с российских спутников создан и начал регулярно работать тестовый полигон на Высокогорной научной станции ИФА РАН. Впервые с российского спутника были получены распределения интегрального содержания NO₂ в пограничном слое атмосферы с разрешением 2 на 2 км. Созданы методики измерения содержания в атмосфе-

ИЗВЕСТИЯ РАН. ФИЗИКА АТМОСФЕРЫ И ОКЕАНА том 56 № 2 2020

ре озона и некоторых органических соединений по рассеянному солнечному излучению в облачных условиях, что существенно повышает эффективность мониторинга состава атмосферы. Большие ожидания связаны с усилением государственной поддержки молодых специалистов в области атмосферных исследований. Обзор подготовлен при поддержке НИР, выполняемой по Госзаданию 0189-2019-0002.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. *Еланский Н.Ф.* Российские исследования атмосферного озона в 2011–2014 гг. // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2016. Т. 52. № 2. С. 150. https://doi.org/10.7868/S0002351516020036
- 2. Лапченко В.А., Звягинцев А.М. Малые газовые составляющие атмосферы в Карадагском природном заповеднике в Крыму // Оптика атмосферы и океана. 2015. Т. 28. № 2. С. 178–181.
- 3. Звягинцев А.М, Кузнецова И.Н., Шалыгина И.Ю., Лапченко В.А., Брусова Н.Е., Архангельская А.А., Тереб Н.В., Лезина Е.А. Причины и факторы положительных аномалий концентрации озона в Московском регионе и на юго-восточном побережье Крыма // Оптика атмосферы и океана. 2016. Т. 29. № 6. С. 493–502.
- Лапченко В.А. Приземный озон и растения индикаторы его поражающего воздействия // Вестник АН Абхазии. 2016. Вып. 6. С. 342–347.
- 5. Звягинцев А.М., Иванова Н.С., Кузнецова И.Н., Лапченко В.А. Содержание озона над территорией Российской Федерации в 2016 г. // Метеорология и гидрология. 2017. № 2. С. 132–137.
- Шалыгина И.Ю., Кузнецова И.Н., Звягинцев А.М., Лапченко В.А. Приземный озон на побережьях Балканского полуострова и Крыма // Оптика атмосферы и океана. 2017. Т. 30. № 6. С. 515–523.
- Звягинцев А.М., Иванова Н.С., Крученицкий Г.М., Кузнецова И.Н., Лапченко В.А. Содержание озона над территорией Российской Федерации в 2017 г. // Метеорология и гидрология. 2018. № 2. С. 138–144.
- Khuriganova O., Obolkin V., Akimoto H., Ohizumi T., Khodzher T., Potemkin V., Golobokova L. Long-Term Dynamics of Ozone in Surface Atmosphere at Remote Mountain, Rural and Urban Sites of South-East Siberia, Russia // Open Access Library J. 3: e2578. https://doi.org/10.4236/oalib.1102578
- Obolkin V.A., Potemkin V L., Makukhin V.L., Khodzher T.V., Chipanina E.V. Long-Range Transport of Plumes of Atmospheric Emissions from Regional Coal Power Plants to the South Baikal Water Basin // Atmospheric and Oceanic Optics. 2017. V. 30. P. 360– 365.

https://doi.org/10.1134/S1024856017040078

 Трифонова-Яковлева А.М., Громов С.А., Громов С.С., Ходжер Т.В., Потемкин В.Л., Оболкин В.А. Оценка возможности использования профиля озона высокого разрешения по данным прибора GOME-2 для оценки концентраций приземного озона // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 5. C. 239–247.

https://doi.org/10.21046/2070-7401-2017-14-5-239-247

 Obolkin V.A., Maysyuk E.P., Ivanova I.Yu., Khodzher T.V. Nitrogen oxides in the atmosphere of coastal areas of Lake Baikal: sources and possible impact on the ecosystem of the lake // Proc. of SPIE. 2018. V. 10833– 108336.

https://doi.org/10.1117/12.2505770

- Obolkin V, Khodzher T., Sorokovikova L., Tomberg I., Netsvetaeva O., Golobokova L. Effect of long-range transport of sulphur and nitrogen oxides from large coal power plants on acidification of river waters in the Baikal region, East Siberia. // International J. Environmental Studies. 2016. V. 73. P. 452–461.
- 13. Белан Б.Д., Савкин Д.Е., Толмачев Г.Н. Зависимость образования озона в приземном слое от температуры воздуха // Оптика атмосферы и океана. 2017. Т. 30. № 11. С. 971–979.
- 14. Антохина О.Ю., Антохин П.Н., Аршинова В.Г., Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Белан С.Б., Давыдов Д.К., Ивлев Г.А., Козлов А.В., NedelecPh., Paris J.-D., Рассказчикова Т.М., Савкин Д.Е., Симоненков Д.В., Скляднева Т.К., Толмачев Г.Н., Фофонов А.В. Вертикальное распределение газовых и аэрозольных примесей воздуха над российским сектором Арктики // Оптика атмосферы и океана. 2017. Т. 30. № 12. С. 1043–1052.
- Антохина О.Ю., Антохин П.Н., Аршинова В.Г., Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Белан С.Б., Давыдов Д.К., Дудорова Н.В., Ивлев Г.А., Козлов А.В., Рассказчикова Т.М., Савкин Д.Е., Симоненков Д.В., Скляднева Т.К., Толмачев Г.Н., Фофонов А.В. Исследование состава воздуха в различных воздушных массах // Оптика атмосферы и океана. 2018. Т. 31. № 9. С. 752–759.
- 16. Белан Б.Д., Савкин Д.Е., Толмачев Г.Н. Исследование связи снежного покрова и концентрации озона в приземном слое воздуха в районе г. Томска // Оптика атмосферы и океана. 2018. Т. 31. № 8. С. 665–669.
- Антохина О.Ю., Антохин П.Н., Аршинова В.Г., Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Белан С.Б., Белов В.В., Гриднев Ю.В., Давыдов Д.К., Ивлев Г.А., Козлов А.В., Law K.S., Nedelec Ph., Paris J.-D., Рассказчикова Т.М., Савкин Д.Е., Симоненков Д.В., Скляднева Т.К., Толмачев Г.Н., Фофонов А.В. Сравнение распределения концентраций газовых примесей воздуха, измеренных дистанционными и контактными средствами над Российским сектором Арктики // Оптика атмосферы и океана. 2018. Т. 31. № 7. С. 542–550.
- Давыдов Д.К., Белан Б.Д., Антохин П.Н., Антохина О.Ю., Антонович В.В., Аршинова В.Г., Аршинов М.Ю., Ахлестин А.Ю., Белан С.Б., Дудорова Н.В., Ивлев Г.А., Козлов А.В., Пестунов Д.А., Рассказчикова Т.М., Савкин Д.Е., Симоненков Д.В., Скляднева Т.К., Толмачев Г.Н., Фазлиев А.З., Фофонов А.В. Мониторинг атмосферных параметров: 25 лет ТОR-станции ИОА СО РАН // Оптика атмосферы и океана. 2018. Т. 31. № 10. С. 845–853.
- Antokhin P.N., Arshinova V.G., Arshinov M.Yu., Belan B.D., Belan S.B., Davydov D.K., Ivlev G.A., Fofonov A.V., Kozlov A.V., Paris J.-D., Nedelec P., Rasskazchikova T.M., Savkin D.E., Simonenkov D.V., Sklyadneva T.K., Tol-

machev G.N. Distribution of trace gases and aerosols in the troposphere over Siberia during wildfires of summer 2012 // J. Geophys Res. 2018. V. 123. P. 2285–2297.

https://doi.org/10.1002/2017JD026825

- Невзоров А.А., Бурлаков В.Д., Долгий С.И., Невзоров А.В., Романовский О.А., Харченко О.В., Гриднев Ю.В. Сравнение лидарных и спутниковых измерений вертикальных профилей озона по данным 2015 г. // Оптика атмосферы и океана. 2016. Т. 29. № 8. С. 703–708.
- 21. Скляднева Т.К., Ивлев Г.А., Белан Б.Д., Аршинов М.Ю., Симоненков Д.В. Радиационный режим г. Томска в условиях дымной мглы // Оптика атмосферы и океана. 2015. Т. 28. № 3. С. 215–222.
- 22. Бурлаков В.Д., Долгий С.И., Невзоров А.А., Невзоров А.В., Романовский О.А. Восстановление профилей вертикального распределения концентрации озона из данных лидарного зондирования // Изв. ВУЗов. Физика. 2015. Т. 58. № 8. С. 70–76.
- 23. Dolgii S.I., Nevzorov A.A., Nevzorov A.V., Romanovskii O.A. and Kharchenko O.V. Intercomparison of ozone vertical profile measurements by differential absorption lidar and IASI/MetOp satellite in the Upper troposphere–lower stratosphere // Remote Sensing. 2017. V. 9. № 5. P. 447. https://doi.org/10.3390/rs9050447
- 24. Долгий С.И., Невзоров А.А., Невзоров А.В., Романовский О.А., Харченко О.В. Лидарная система дифференциального поглощения для измерения озона в верхней тропосфере-стратосфере // Журн. прикладной спектроскопии. 2018. Т. 85. № 6. С. 992-998.
- 25. Antokhin P.N., Antokhina O.Yu., Belan B.D. Estimation of the ozone formation rate in the atmospheric boundary layer over a background region of Western Siberia // Proc. SPIE. 2015. V. 9680. Article CID. № 3Y. P. 5.

https://doi.org/10.1117/12.2205688

- 26. Кожевников В.Н., Еланский Н.Ф., Моисеенко К.Б. Вариации содержания озона и двуокиси азота в поле орографических волн над приполярным Уралом // ДАН. 2017. Т. 475. № 6. С. 691–696. https://doi.org/10.7868/S0869565217240197
- 27. Еланский Н.Ф., Локощенко М.А., Трифанова А.В., Беликов И.Б., Скороход А.И. О содержании малых газовых примесей в приземном слое атмосферы над Москвой // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2015. Т. 51. № 1. С. 39–51. https://doi.org/10.7868/S0002351515010034
- Локощенко М.А., Еланский Н.Ф., Трифанова А.В., Беликов И.Б., Скороход А.И. О предельных уровнях загрязнения воздуха в Москве // Вестник Московского университета. Сер. 5. География. 2016. № 4. С. 29–39.
- Еланский Н.Ф., Лаврова О.В. Газовые примеси в атмосфере российских городов по наблюдениям с передвижной лаборатории (эксперименты TROICA). ДАН. 2014. Т. 459. № 5. С. 629–634. https://doi.org/10.7868/S0869565214350163
- Elansky N.F., Lavrova O.V., Skorokhod A.I., Belikov I.B. Trace gases in the atmosphere over Russian cities // Atmos. Env. 2016. V. 143. P. 108–119. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2016.08.046

- Ван Пусай, Еланский Н.Ф., Ван Генчен, Ракитин В.С., Штабкин Ю.А., Скороход А.И., Гречко Е.И., Панкратова Н.В., Сафронов А.Н. К вопросу об использовании спутниковых данных общего содержания СО сенсоров MOPITT, AIRS, IASI: сопоставление с наземными спектрометрами в фоновых и загрязненных условиях // Оптика атмосферы и океана. 2015. Т. 28. № 9. С. 816–824. http://ao.iao.ru/ru/content/vol.28-2015/iss.09/7
- 32. Еланский Н.Ф., Шилкин А.В., Семутникова Е.Г., Захарова П.В., Ракитин В.С., Пономарев Н.А., Веревкин Я.М. Недельный цикл содержания загрязняющих примесей в приземном воздухе г. Москвы // Оптика атмосферы и океана. 2018. Т. 31. № 10. С. 829–836. https://doi.org/10.15372/AOO20181009
- Elansky N.F., Ponomarev N.A., Verevkin Ya.M. Air quality and pollutant emissions in the Moscow megacity in 2005–2014 // Atm. Env. 2018. V. 175. P. 54–64. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2017.11.057
- 34. Skorokhod A.I., Berezina E.V., Moiseenko K.B., Elansky N.F., Belikov I.B. Benzene and Toluene in the Surface Air of Northern Eurasia from TROICA-12 Campaign Along the Trans-Siberian Railway // Atmos. Chem. Phys. 2017. V. 17. P. 5501–5514. https://doi.org/10.5194/acp-17-5501-2017
- 35. Березина Е.В., Моисеенко К.Б., Скороход А.И., Еланский Н.Ф., Беликов И.Б. Ароматические летучие органические соединения и их роль в формировании приземного озона в регионах России по данным экспедиции TROICA-12 // ДАН. 2017. Т. 474. № 3. С. 356–360. https://doi.org/10.7868/S0869565217150191
- 36. Pankratova N., Skorokhod A., Belikov I., Elansky N., Rakitin V., Shtabkin Y., Berezina E. Evidence of atmospheric response to methane emissions from the East Siberian Arctic Shelf. // Geography, Environment, Sustainability. 2018. V. 11. № 1. P. 85–92. https://doi.org/10.24057/2071-9388-2018-11-1-85-92
- Rakitin V.S., Elansky N.F., Wang P., Wang G., Pankratova N.V., ShtabkinYu.A., Skorokhod A.I., Safronov A.N., Makarova M.V., Grechko E.I. Changes in trends of atmospheric composition over urban and background regions of Eurasia: estimates based on spectroscopic observations // Geography, Environment, Sustainability. 2018. T. 11. № 2. C. 84–96. https://doi.org/10.24057/2071-9388-2018-11-2-84-96
- Shukurov K.A., Borovski A.N., Postylyakov O.V., Dzhola A.V., Grechko E.I., Kanaya Y. Potential sources of tropospheric nitrogen dioxide for Western Moscow Region, Russia // Proc. SPIE. 2018. V. 10833. P. 108337N-7. https://doi.org/10.1117/12.2504138
- Shukurov K.A., Borovski A.N., Grechko E.I., Dzhola A.V., Postylyakov O.V., Kanaya Y. Potential sources of reactive gases for the West of Moscow Oblast // Proc. SPIE. 2018. V. 10786.107860C-8. https://doi.org/10.1117/12.2325844
- 40. Dorokhov V., Yushkov V., Makshtas A., Ivlev G., Tereb N., Savinykh V., Shepelev D., Nakajima H., McElroy C.T., Tarasick D., Goutail F., Pommereau J.-P., Pazmino A. Brewer, SAOZ and ozonesonde observations in Sibe-

2020

ИЗВЕСТИЯ РАН. ФИЗИКА АТМОСФЕРЫ И ОКЕАНА том 56 № 2

ria // Atmosphere-Ocean. 2015. V. 53. № 1. P. 14–18. https://doi.org/10.1080/07055900.2013.830078

 Shukurov K.A., Postylyakov O.V., Borovski A.N., Shukurova L.M., Gruzdev A.N., Elokhov A.S., Savinykh V.V., Mokhov I.I., Semenov V.A., Chkhetiani O.G., Senik I.A. Study of transport of atmospheric admixtures and temperature anomalies using trajectory methods at the A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics // IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 2019. V. 231. P. 012048. https://doi.org/10.1088/1755.1215/021/1/012048

https://doi.org/10.1088/1755-1315/231/1/012048

Zerefos C.S., Eleftheratos K., Kapsomenakis J., Solomos S., Inness A., Balis D., Redondas A., Eskes H., Allaart M., Amiridis V., Dahlback A., De Bock V., Diémoz H., Engelmann R., Eriksen P., Fioletov V., Gröbner J., Heikkilä A., Petropavlovskikh I., Jarosławski J., Josefsson W., Karppinen T., Köhler U., Meleti C., Repapis C., Rimmer J., Savinykh V., Shirotov V., Siani A.M., Smedley A.R.D., Stanek M., Stübi R. Detecting volcanic sulfur dioxide plumes in the Northern Hemisphere using the Brewer spectrophotometers, other networks, and satellite observations // Atmos. Chem. Phys. 2017. V. 17. P. 551–574.

https://doi.org/10.5194/acp-17-551-2017

- 43. Ионов Д.В., Тимофеев Ю.М., Поберовский А.В. Спектроскопические измерения содержания О₃ и NO₂ в атмосфере: коррекция наземного метода и результаты сопоставления с данными спутниковых измерений // Оптика атмосферы и океана. 2015. Т. 28. № 8. С. 704–710.
- 44. Виролайнен 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. Т. 51. № 2. С. 191–200.
- 45. Гаркуша А.С., Поляков А.В., Тимофеев Ю.М., Виролайнен 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. https://doi.org/10.7868/S0003351517040079
- 46. 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.

https://doi.org/10.15372/AOO20170210

47. 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.

https://doi.org/10.15372/AOO20170103

- 48. Виролайнен Я.А., Тимофеев Ю.М., Поляков А.В., Ионов Д.В., Кирнер О., Поберовский А.В., Имхасин Х. Сопоставление наземных измерений общего содержания О₃, HNO₃, HCl и NO₂ с данными численного моделирования // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2016. Т. 52. № 1. С. 64–73. https://doi.org/10.7868/S0002351515060140
- 49. Швед Г.М., Виролайнен Я.А., Тимофеев Ю.М., Ермоленко С.И., Смышляев С.П., Моцаков М.А., Кирнер О. Временные вариации содержания озо-

на в Субарктике по данным спутниковых измерений и моделирования // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2018. Т. 54. № 1. С. 36–44. https://doi.org/10.7868/S000335151801004X

- 50. Звягинцев А.М., Варгин П.Н., Пешин С. Вариации и тренды общего содержания озона в течение 1979– 2014 гг. // Оптика атмосферы и океана. 2015. Т. 28. № 6. С. 575–584.
- 51. Никифорова М.П., Варгин П.Н., Звягинцев А.М. Аномалии озона над Россией зимой и весной 2015/2016 // Метеорология и гидрология. 2019. Т. 44. № 1. С. 36-49.
- 52. Иванова Н.С., Кузнецова И.Н., Сумерова К.А. Аномалии атмосферного озона в феврале-марте 2018 г. // Труды Гидрометцентра России. 2018. Т. 370. С. 36-47. ISSN 2618-9631.
- 53. Иванова Н.С. Сравнение общего содержания озона по измерениям с земли и со спутников // Труды Гидрометцентра России. 2017. Т. 365. С. 94–100. ISSN 2618-9631.
- 54. Вишератин К.Н. Квазидесятилетние вариации общего содержания озона, ветра, температуры и геопотенциальной высоты над станцией Ароза // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2016. Т. 52. № 1. С. 74–82.
- 55. Вишератин К.Н. Пространственно-временные вариации фазы квазидесятилетних колебаний общего содержания озона // Исследование Земли из космоса. 2017. № 2. С. 88–95.
- 56. 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.
- 57. Вишератин К.Н., Кузнецов В.В. Основные характеристики изменчивости глобального поля общего озона на основе сопоставления объединенных баз // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13. № 3. С. 165–172.

https://doi.org/10.21046/2070-7401-2016-13-3-165-172

- 58. Вишератин К.Н., Нерушев А.Ф., Орозалиев М.Д., X. Zheng, Sh. Sun, L. Liu. Временная изменчивость общего содержания озона в Азиатском регионе по данным наземных и спутниковых измерений // Исследование Земли из космоса. 2017. № 1. С. 59–68.
- 59. Ситнов С.А., Мохов И.И. Особенности поля общего содержания озона при атмосферном блокировании над европейской территорией России летом 2010 года (по спутниковым данным) // Метеорология и гидрология. 2016. № 1. С. 41–52.
- 60. Ситнов С.А., Мохов И.И., Безверхний В.А. Анализ особенностей связи общего содержания озона и водяного пара над европейской частью России с Североатлантическим колебанием летом 2010 г. // Оптика атмосферы и океана. 2016. Т. 29. № 6. С. 457–461. https://doi.org/10.15372/AOO20160601
- 61. Ситнов С.А., Мохов И.И. Формирование озоновой "мини-дыры" в условиях продолжительного блокирующего антициклона в атмосфере над европейской территорией России летом 2010 г. // ДАН. 2015. Т. 460. № 1. С. 74–78. https://doi.org/10.7868/S086956521501020X

62. Ситнов С.А., Мохов И.И., Безверхний В.А. Связь аномалий общего содержания водяного пара и озона над европейской территорией России с Североатлантическим колебанием: особенности летнего периода 2010 г. // Исследование Земли из космоса. 2017. № 1. С. 3–12. https://doi.org/10.7868/S0205961417010067

 Sitnov S.A., Mokhov I.I., Lupo A.R. Ozone, water vapor, and temperature anomalies associated with atmospheric blocking events over Eastern Europe in spring – summer 2010 // Atmospheric Environment. 2017. V. 164. P. 180–194. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2017.06.004

- 64. Сибир Е.Е., Радионов В.Ф. Вариации общего содержания озона на российских антарктических станциях, результаты многолетних наблюдений // Проблемы Арктики и Антарктики. 2018. Вып. 64. № 3. С. 250–261.
- 65. Радионов В.Ф., Кабанов Д.М., Полькин В.В., Савкин Д.Е., Сакерин С.М., Сибир Е.Е. Изменения характеристик аэрозольного и газового состава атмосферы на маршрутах НЭС "Академик Федоров" и "Академик Трешников" в период 59 РАЭ (ноябрь 2013—май 2014 гг.) // Проблемы Арктики и Антарктики. 2015. № 4(106). С. 5–19.
- 66. Timofeyev Y.M., Smyshlyaev S.P., Virolainen Y.A., Garkusha A.S., Polyakov A.V., Motsakov M.A., Kirner O. Case study of ozone anomalies over northern Russia in the 2015/2016 winter: Measurements and numerical modeling // Ann. Geophys. 2018. V. 36. P. 1495–1505. https://doi.org/10.5194/angeo-36-1495-2018
- 67. Боровский А.Н., Арабов А.Я., Голицын Г.С., Груздев А.Н., Еланский Н.Ф., Елохов А.С., Мохов И.И., Савиных В.В., Сеник И.А., Тимажев А.В. Вариации общего содержания диоксида азота в атмосфере на Северном Кавказе // Метеорология и гидрология. 2016. № 2. С. 29–44.
- Ageyeva V.Yu., Gruzdev A.N., Elokhov A.S., Grishaev M.V. Winter-spring anomalies in the stratospheric content of NO₂ from ground-based measurement results // Izvestia. Atmospheric and Oceanic Physics. 2015. V. 51. P. 397–404.

https://doi.org/10.1134/S0001433815020024

- 69. Агеева В.Ю., Груздев А.Н. Сезонные особенности квазидвухлетних вариаций стратосферного содержания NO₂ по результатам наземных измерений // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2017. Т. 53. № 1. С. 74–85.
- Груздев А.Н., Кропоткина Е.П., Соломонов С.В., Елохов А.С. Аномалии содержания озона и двуокиси азота в стратосфере над Московским регионом как проявление динамики стратосферного полярного вихря // Докл. АН. 2016. Т. 468. № 4. С. 451–455.
- 71. Груздев А.Н., Кропоткина Е.П., Соломонов С.В., Елохов А.С. Зимне-весенние аномалии содержания О₃ и NO₂ в стратосфере над московским регионом в 2010 и 2011 гг. // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2017. Т. 53. № 2. С. 223–231.
- 72. Агеева В.Ю., Груздев А.Н., Елохов А.С., Мохов И.И., Зуева Н.Е. Внезапные стратосферные потепления: статистические характеристики и влияние на общее содержание NO₂ и O₃ // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2017. Т. 53. № 5. С. 545–555.

- 73. Груздев А.Н., Агеева В.Ю., Елохов А.С. Изменения вертикального распределения и общего содержания NO₂ под действием внезапных стратосферных потеплений // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2018. Т. 54. № 4. С. 417–427. https://doi.org/10.1134/S0002351518040077
- 74. Агеева В.Ю., Груздев А.Н., Елохов А.С. Увеличение стратосферного содержания NO₂ по результатам наземных наблюдений после солнечного протонного события в октябре 2003 г. // Докл. АН. 2018. Т. 479. № 6. С. 688–691. https://doi.org/10.7868/S0869565218120174
- 75. 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. P. 1–12. https://doi.org/10.1117/12.2515121
- 76. Savinykh V.V., Borovski A.N., Postylyakov O.V., Dormidontov D.V. Cross-platform software to continue longterm observations with the Brewer spectrophotometer in the face of changing computer platforms: Implementing the Model-View architecture // Proc. SPIE. 2018. V. 10833. 1083363. P. 1–9. https://doi.org/10.1117/12.2504611
- 77. Savinykh V.V., Postylyakov O.V. Implementing the Model/View architecture in software of Brewer Network Spectrophotometer for long-term monitoring of UV radiation and ozone atmospheric content // IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 2019. V. 231. P. 012045. https://doi.org/10.1088/1755-1315/231/1/012045
- Savinykh V.V., Skornyakov V.Yu. New cross-platform control software for Brewer spectrophotometer // Proc. SPIE. 2016. V. 10035. 100355P. P. 1–6. https://doi.org/10.1117/12.2248536
- Borovski A.N., Dzhola A.V., Grechko E.I., Postylyakov O.V., Ivanov V.A., Kanaya Y. Measurements of formaldehyde total content in troposphere using DOAS technique in Moscow Region // Proc. SPIE. 2015. V. 9680. 96804Q-7. https://doi.org/10.1117/12.2205933
- Postylyakov O., Borovski A., Ivanov V. On determination of formaldehyde content in atmospheric boundary layer for overcast using DOAS technique // Proc. SPI 201 V. 968 96804O-1. https://doi.org/10.1117/12.2205925
- 81. 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 Ү. 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. https://doi.org/10.15372/AOO20190102
- Postylyakov O.V., Borovski A.N., Ivanov V.A., Dzhola A.V., Elokhov A.S, Grechko E.I., Kanaya Y. Formaldehyde integral content in troposphere of Moscow Region: preliminary results of 6 years of measurements using DOAS technique // Proc. SPIE. 2016. V. 10035. 100353A-8. https://doi.org/10.1117/12.2248630
- 83. *Postylyakov O.V., Borovski A.N.* Measurement of formaldehyde total content in troposphere using DOAS technique: improvements in version 1.3a of IAP re-

Nº 2

2020

ИЗВЕСТИЯ РАН. ФИЗИКА АТМОСФЕРЫ И ОКЕАНА том 56

trieval algorithm // Proc. SPIE. 2016. V. 9876. 98761N-8.

https://doi.org/10.1117/12.2229231

- Ivanov V., Borovski A., Postylyakov O. First comparison of formaldehyde integral contents in ABL retrieved during clear-sky and overcast conditions by ZDOAS technique // Proc. SPIE. 2017. V. 10424. 104240O-9. https://doi.org/10.1117/12.2278235
- Bruchkouski I., Borovski A., Elokhov 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
- Borovski A., Postylyakov O., Elokhov A., Bruchkouski I. Study of different operational modes of the IAP 2port-DOAS instrument for atmospheric trace gases investigation during CINDI-2 campaign basing on residual noise analysis // Proc. SPIE. 2017. V. 10466. 104662Z-9.

https://doi.org/10.1117/12.2285798

- Borovski A., Elokhov A., Postylyakov O., Bruchkouski I. Study of different operational modes of the IAP 2port-DOAS instrument for investigation of atmospheric trace gases during CINDI-2 campaign. // Proc. SPIE. 2017. 10424. 104240Y-8. https://doi.org/10.1117/12.2278234
- Peters E., Pinardi G., Seyler A., Richter A., Wittrock F., Bösch T., Van Roozendael M., Hendrick F., Drosoglou T., Bais A.F., Kanaya Y., Zhao X., Strong K., Lampel J., Volkamer R., Koenig T., Ortega I., Puentedura O., Navarro-Comas M., Gómez L., Yela González M., Piters A., Remmers J., Wang Y., Wagner T., Wang S., Saiz-Lopez A., García-Nieto D., Cuevas C. A., Benavent N., Querel R., Johnston P., Postylyakov O., Borovski A., Elokhov A., Bruchkouski I., Liu H., Liu C., Hong Q., Rivera C., Grutter M., Stremme W., Khokhar M.F., Khayyam J., Burrows J.P. Investigating differences in DOAS retrieval codes using MAD-CAT campaign data // Atmos. Meas. Tech., 2017. V. 10. P. 955–978. https://doi.org/10.5194/amt-10-955-2017
- Postylyakov O.V., Borovski A.N., Makarenkov A.A. First experiment on retrieval of tropospheric NO₂ 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
- Chulichkov A.I., Postylyakov O.V. Stereoscopic groundbased determination of the cloud base height: theory of camera position calibration with account for lens distortion // Proc. SPIE. 2016. V. 9876. 98763R-8. https://doi.org/10.1117/12.2228747
- 91. Чуличков А.И., Андреев М.С., Голицын Г.С., Еланский Н.Ф., Медведев А.П., Постыляков О.В. Определение нижней границы облачности по цифровой стереосъемке с поверхности Земли // Оптика атмосферы и океана. 2016. V. 29. № 11. С. 980–986. https://doi.org/10.15372/AOO20161112
- Chulichkov A.I., Nikitin S.V., Medvedev A.P., Postylyakov O.V. Stereoscopic ground-based determination of the cloud base height: camera position adjusting with account for lens distortion // Proc. SPIE. 2016. V. 10035. 100353B-10. https://doi.org/10.1117/12.2248633

93. Chulichkov A.I., Nikitin S.V., Emilenko A.S., Medvedev A.P., Postylyakov O.V. Selection of optical model of stereophotography experiment for determination the cloud base height as a problem of testing of statistical hypotheses // Proc. SPIE. 2017. 10424. 1042411-11.

https://doi.org/10.1117/12.2279553

- Larin I.K. Odd Oxygen and its Atmospheric Lifetime // Russian J. Physical Chemistry B. 2017. V. 11. P. 375–379.
- Larin I.K. On the Recovery of the Ozone Layer in the Northern Hemisphere in the XXI Century // Russian J. Physical Chemistry B. 2015. V. 9. P. 157–162.
- Larin I.K. The Chemical Composition of the Middle Atmosphere and its Change in the XXI Century // Russian J. Physical Chemistry B. 2018. V. 12. P. 1–5.
- 97. Larin I.K. Contribution of O_x , HO_x , NO_x , CIO_x , and BrO_x cycles to the destruction of stratospheric ozone in the 21st century // Russian J. Physical Chemistry B. 2017. V. 11. P. 189–194.
- Larin I.K. Unresolved Problems in the Chemistry of the Middle Atmosphere // Russian J. Physical Chemistry B. 2018. V. 12. P. 791–796.
- 99. Звягинцев А.М., Варгин П.Н., Пешин С. Изменчивость и тренды общего содержания озона в период 1979–2014 гг. // Оптика атмосферы и океана. 2015. Т. 28. № 9. С. 1–10.
- 100. Вильфанд Р.М., Кирсанов А.А., Ревокатова А.П., Ривин Г.С., Суркова Г.В. Прогноз перемещения и трансформации загрязняющих веществ в атмосфере с помощью модели COSMO-ART // Метеорология и Гирология. 2017. Т. 30. № 5. С. 292–298.
- 101. Шалыгина Ю., Нахаев М.И., Кузнецова И.Н., Березин Е.В., Коновалов И.Б., Блинов Д.В., Кирсанов А.А. Сравнение приземных концентраций загрязняющих веществ, рассчитанных с помощью ХТМ, с данными измерений в Московском регионе // Оптика атмосферы и океана. 2017. Т. 30. № 1. С. 53–59.
- 102. Шалыгина Ю., Нахаев М.И., Кузнецова И.Н., Коновалов И.Б., Захарова П.В. Региональная адаптация рассчитанных эмиссий ЕМЕР для химико-транспортной модели CHIMERE // Труды Гидрометцентра России. 2018. Т. 369. С. 33–45. ISSN 2618-9631.
- 103. Rivin G.S., Rozinkina I.A., Vilfand R.M., Astakhova E.D., Blinov D.V., Kirsanov A.A., Kuzmina E.V., Olchev A.V.3, Surkova G.V., Shatunova M.V., Chubarova N.E., Chumakov M.M., Alferov D.Yu., Bundel A.Yu., Kopeikin V.V., Nikitin M.A., Poliukhov A.A., Revokatova A.P., Tatarinovich E.V., Churyulin E.V. COSMO – Ru: operational mesoscale numerical weather prediction system of the Hydrometcenter of Russia. Current status and recent developments // Research Activities. In Atmospheric And Oceanic Modelling. 2018. V. 18. № 15. P. 5.11–5.12.
- 104. Konovalov I.B., Berezin E.V., Ciais P., Broquet G., Zhu-ravlev R.V., Janssens-Maenhout G. Estimation of fossil-fuel CO₂ emissions using satellite measurements of "proxy" species // Atmos. Chem. Phys. 2016. V. 16. P. 13509–13540.

https://doi.org/10.5194/acp-16-13509-2016

105. Konovalov I.B., Beekmann M., Berezin E.V., Petetin H., Mielonen T., Kuznetsova I.N., Andreae M.O. The role of semi-volatile organic compounds in the mesoscale evolution of biomass burning aerosol: a modeling case study of the 2010 mega-fire event in Russia // Atmos. Chem. Phys. 2015. V. 15. P. 13269–13297. https://doi.org/10.5194/acp-15-13269-2015

- 106. Konovalov I.B., Beekmann M., Berezin E.V., Formenti P., Andreae M.O. Probing into the aging dynamics of biomass burning aerosol by using satellite measurements of aerosol optical depth and carbon monoxide // Atmos. Chem. Phys. 2017. V. 17. P. 4513–4537. https://doi.org/10.5194/acp-17-4513-2017
- 107. Коновалов И.Б., Березин Е.В., Бекманн М. Эффект фотохимического самовоздействия углеродсодержащего аэрозоля: природные пожары // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2016. Т. 52. № 3. С. 300-308.
- 108. Konovalov I.B., Lvova D.A., Beekmann M. Estimation of the elemental to organic carbon ratio in biomass burning aerosol using AERONET retrievals // Atmosphere. 2017. V. 8. P. 122. https://doi.org/10.3300/otmos8070122

https://doi.org/10.3390/atmos8070122

- 109. Konovalov I.B., Lvova D.A., Beekmann M., Jethva H., Mikhailov E.F., Paris J.-D., Belan B.D., Kozlov V.S., Ciais P., Andreae M.O. Estimation of black carbon emissions from Siberian fires using satellite observations of absorption and extinction optical depths // Atmos. Chem. Phys. 2018. V. 18. P. 14889–14924. https://doi.org/10.5194/acp-18-14889-2018
- 110. Володин Е.М., Кострыкин С.В. Аэрозольный блок в климатической модели ИВМ РАН // Метеорология и гидрология. 2016. № 8. С. 5–17.
- 111. Safronov A.N., Shtabkin Yu. A., Berezina E.V., Skorokhod A.I., Rakitin V. S., Belikov I.B., Elansky N.F. Isoprene, methyl vinyl ketone and methacrolein from TROICA-12 measurements and WRF-CHEM and GEOS-CHEM simulations in the Far East region // Atmosphere. 2019. V. 10(3). P. 152. https://doi.org/10.3390/atmos10030152
- 112. Safronov A.N., Elansky N.F., Skorokhod A.I. Detection of Atmospheric Pollution Sources by Using Cross-Plume Scanning Method and Mobile Railway Laboratory // Geography, Environment, Sustainability.

2018. V. 11. № 3. P. 71-82.

https://doi.org/10.24057/2071-9388-2018-11-3-71-82

- 113. Скороход А.И., Еланский Н.Ф., Сафронов А.Н., Еремина И.Д., Панкратова Н.В., Нубарова Н.Е. Влияние извержения вулкана Эйяфьядлайскюдль в апреле 2010 на состав атмосферы в Москве // Вулканология и сейсмология. 2016. № 4. С. 1–13. https://doi.org/10.7868/S0203030616040052
- 114. 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 СО, СН₄ и СО₂ с наземными спектроскопическими данными // Оптика атмосферы и океана. 2015. Т. 28. № 9. С. 816–824. https://doi.org/10.15372/AOO20150907
- 115. Rakitin V.S., Shtabkin Yu.A., Elansky N.F., Pankratova N.V., Skorokhod A.I., Grechko E.I., Safronov A.N. Comparison results of satellite and ground-based spectroscopic measurements of CO, CH₄, and CO₂ total contents // Atmospheric and Oceanic Optics. 2015. V. 28. № 6. P. 533–542. https://doi.org/10.1134/S1024856015060135
- 116. Голицын Г.С., Гречко Е.И., Генчен Ван, Пусай Ван, Джола А.В, Емиленко А.С., Копейкин В.М., Ракитин В.С., Сафронов А.Н., Фокеева Е.В. Исследование загрязнения Москвы и Пекина окисью углерода и аэрозолем // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2015. Т. 51. № 1. С. 8–19. https://doi.org/10.7868/S0002351515010046
- 117. Криволуцкий А.А., Выошкова Т.Ю., Черепанова Л.А., Куколева А.А., Репнев А.И., Банин М.В. Трехмерная Глобальная Фотохимическая Модель Charm. Учет Вклада Солнечной Активности // Геомагнетизм и Аэрономия. 2015. Т. 55. № 1. С. 64. https://doi.org/10.7868/S0016794015010071
- 118. Криволуцкий А.А., Вьюшкова Т.Ю., Миронова И.А. Изменения Химического Состава В Полярных Областях Земли После Протонных Вспышек На Солнце (Трехмерное Моделирование) // Геомагнетизм и Аэрономия. 2017. Т. 57. № 2. С. 173–194. https://doi.org/10.7868/S0016794017020079

Russian Studies of Atmospheric Ozone and Its Precursors in 2015-2018

N. F. Elansky*

Obukhov Institute of Atmospheric Physics RAS, Pyzhevsky per., 3, Moscow, 109017 Russia *e-mail: n.f.elansky@mail.ru

The review contains the most significant results of the work of Russian scientists in the field of atmospheric ozone research carried out in 2015–2018. It is a part of the Russian national report on meteorology and atmospheric sciences, which was prepared for the International Association for Meteorology and Atmospheric Sciences (IAMAS). The report was reviewed and approved by the XXVII General Assembly of the International Geodetic and Geophysical Union (IUGG). The review is accompanied by a list of the main publications of Russian scientists for 2015–2018 devoted to studies of atmospheric ozone and its precursors.

Keywords: atmospheric ozone, ozone layer, atmospheric composition, minor gas species, air quality, ozone chemistry, transport processes