

DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2021-1-73-100>

УДК 551.501.7:551.510.534

Российские исследования озонового слоя в 2017–2019 гг. (обзор)

П.Н. Варгин

*Центральная аэрологическая обсерватория, г. Долгопрудный, Россия
p_vargin@mail.ru*

Представлен обзор работ в области наблюдений и исследований озонового слоя, проведенных в России в 2017–2019 гг. учреждениями Росгидромета, Российской академии наук РАН и Министерства образования и науки РФ. Обзор подготовлен по материалам Национального сообщения о наблюдениях и исследованиях озонового слоя, представленного во Всемирную метеорологическую организацию в 2020 году. Описываются основные современные тенденции исследований и развития мониторинга озонового слоя.

Ключевые слова: наблюдения и анализ изменений озонового слоя, стратосфера

Russian studies of ozone layer in 2017-2019

P.N. Vargin

*Central Aerological Observatory, Dolgoprudny, Moscow region, Russia
p_vargin@mail.ru*

A review of observations and studies of the ozone layer, which were performed in Russia by the Roshydromet, Russian Academy of Sciences, and Ministry of Science and Education and Science institutions in 2017–2019, is presented. The review is based on the Russian National Report on Ozone Layer Monitoring and Research presented to the World Meteorological Organization in 2020. The main modern trends in studying and developing the ozone layer monitoring are described.

Keywords: observations and analysis of ozone layer changes, Arctic stratosphere

Введение

Под термином «озоновый слой» понимают в первую очередь нижнюю стратосферу (слой ~12–30 км), в которой находится основная часть атмосферного озона и которая практически полностью задерживает солнечную ультрафиолетовую (УФ-С) радиацию с длинами волн менее 280 нм и значительно ослабляет УФ-Б радиацию (280–315 нм).

Наиболее полная информация об озоновом слое публикуется в выходящем каждые четыре года международном Оценочном докладе о состоянии озонового слоя. Последнее издание этого доклада, подготовленного

Всемирной метеорологической организацией и Программой ООН по окружающей среде в 2018 году, размещено на сайте <https://public.wmo.int/en/resources/library/scientific-assessment-of-ozone-depletion-2018>.

По имеющимся оценкам, восстановление озонового слоя к уровню начала 1980-х гг. должно произойти во второй половине XXI века. В последние годы данные наблюдений свидетельствуют о снижении концентраций озоноразрушающих соединений в атмосфере, происходящем благодаря реализации Монреальского протокола. Все большее значение приобретает взаимосвязь продолжающегося изменения климата и изменений озонового слоя. Сохраняется обусловленная динамическими процессами высокая межгодовая изменчивость циркуляции стратосферы, определяющая характер разрушения озонового слоя в зимне-весенний период в Антарктике и Арктике и затрудняющая определение начала возможного восстановления озонового слоя.

Весной 2011 года в Арктике наблюдалась рекордная аномалия озонового слоя, сравнимая по некоторым параметрам с аномалиями в Антарктике и обусловленная необычайно устойчивым и холодным стратосферным полярным вихрем, внутри которого образовался значительный объем полярных стратосферных облаков (ПСО), на частицах которых в присутствии солнечной радиации происходит сильное разрушение озона.

Близким к рекордному было разрушение озонового слоя в Арктике весной 2020 года из-за чрезвычайно сильного и устойчивого стратосферного полярного вихря, причинами которого стало заниженное распространение волновой активности из тропосферы и ее отражение из верхней стратосферы вниз, усилившее полярный вихрь. В конце февраля – начале марта 2020 г. в нижней стратосфере Арктики наблюдались рекордно низкие температуры и, как следствие, рекордный объем ПСО и значительное разрушение озона, достигавшее в отдельные дни в нижней стратосфере до 90 %. Отрицательные аномалии озонового слоя наблюдались в Арктике в апреле и начале мая.

Несмотря на тенденцию уменьшения содержания озоноразрушающих соединений, высокая межгодовая изменчивость динамических процессов стратосферы Арктики может создать условия для значительного разрушения озона. Нельзя исключить возникновение подобных аномалий озонового слоя и в ближайшие десятилетия.

Актуальность мониторинга и исследований озонового слоя обусловлена его определяющим влиянием на уровень УФ-радиации вблизи поверхности Земли, превышение которого может представлять угрозу для здоровья населения.

Настоящая статья составлена по материалам Национального сообщения Российской Федерации, подготовленного к 11-му совещанию представителей разных стран по мониторингу и исследованию озонового слоя, организованному Всемирной метеорологической организацией (ВМО)

и Программой ООН по исследованию окружающей среды (ЮНЕП). Сообщение подготовлено в Центральной аэрологической обсерватории (ЦАО) совместно с рядом учреждений Росгидромета, РАН и Министерства образования и науки.

1. Проведение наблюдений

Регулярные наблюдения атмосферного озона в России включают наблюдения общего содержания озона (ОСО), его вертикального распределения (ВРО) и приземных концентраций, а также содержания двуокиси азота (NO_2) в вертикальном столбе атмосферы.

1.1. Наземные наблюдения общего содержания озона

В России за проведение регулярных измерений ОСО и взаимодействие с соответствующими органами ВМО ответственна Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Росгидромет). Ежедневные измерения ОСО на территории России выполняются с помощью фильтровых озонметров М-124 на сети из 30 станций, являющихся частью мировой озонметрической сети (ГСА ВМО). Методическое, техническое и метрологическое обеспечение мониторинга ОСО и ультрафиолетовой радиации осуществляет Главная геофизическая обсерватория им. А.И. Воейкова (ГГО). Под руководством ГГО продолжают измерения ОСО на пяти станциях в Казахстане. В 2018 г. полевой базе ГГО (пос. Воейково) присвоен статус полигона ВМО по целому ряду измерений, в том числе и по озону.

В Антарктике измерения ОСО проводятся с использованием фильтровых озонметров М-124 специалистами Арктического и антарктического научно-исследовательского института (ААНИИ) на станциях Новолазаревская, Мирный, Восток и судах Российской Антарктической экспедиции. С 1974 г. калибровка используемых фильтровых озонметров проводится в ГГО (г. Санкт-Петербург) по спектрофотометру Добсона № 108.

Данные наблюдений поступают в Росгидромет (ЦАО, ГГО). В ЦАО оперативно проводится первичный контроль качества данных, архивация с последующей передачей их в Мировой центр данных по озону и УФ-радиации (World Ozone and UV Data Centre – WOUDC) при Службе окружающей среды Канады. В WOUDC данные наземных наблюдений используются для ежедневного отображения полей ОСО (<http://woudc.org/>).

С 2009 году в рамках специальной федеральной программы Росгидромета под руководством специалистов ЦАО создана сеть измерений ОСО и общего содержания NO_2 с помощью автоматических спектрометров Mini-SAOZ производства Франции, которые установлены в районах, где в зимне-весенний период часто отмечаются отрицательные аномалии

ОСО. Оснащены этими приборами шесть станций (Анадырь, Жиганск, Салехард, Мурманск, Иркутск, Долгопрудный). Данные Mini-SAOZ на станции Салехард (67° с. ш., 67° в. д.) доступны на сайте <http://saoz.obs.uvsq.fr>. Регулярные наблюдения проводятся в г. Долгопрудный (ЦАО). Из-за недостаточного финансирования данные с других станций поступают нерегулярно. Данные размещаются на сайте ЦАО <http://www.cao-rhms.ru/saoz/>.

В 2017–2019 гг. на станции «Обнинск» (55° с. ш. 36° в. д.) проводились систематические измерения ОСО с использованием спектрофотометров (с/ф) Брюера МКП № 044 и интегрального содержания в столбе атмосферы CH_4 и H_2O спектроскопическим методом.

Также на станции «Обнинск» ведутся систематические измерения приземной концентрации озона с помощью оптического озонметра Ф-105 и измерения приземной концентрации CO , CH_4 и других газовых компонент, участвующих в озоновом цикле, а также синхронные измерения метеопараметров в пограничном слое атмосферы.

Измерения ОСО осуществляется на Высокогорной научной станций ИФА им. А.М. Обухова РАН (ВНС), расположенной на Северном Кавказе (43,7° с. ш., 42,7° в. д.) в зоне альпийских лугов на высоте 2070 м над уровнем моря. Большую часть времени условия наблюдения на ВНС можно считать фоновыми, так как загрязненный воздух из ближайшего г. Кисловодска, расположенного в 18 км к северу на высоте 750–900 м, не достигает станции.

ОСО по прямой солнечной радиации измеряется на ВНС с 1981 по 1989 г. с использованием спектрометра на базе монохроматора МДР-3, а с 1989 г. по настоящее время на с/ф Брюера МКП #043. При закрытом облачностью Солнце ОСО измеряется на с/ф Брюера МКП #043 по рассеянной в зените радиации.

Измерения ОСО с использованием с/ф Брюера (МКП #044) проводятся в Обнинске с 1994 г. по настоящее время, в Институте оптики атмосферы СО РАН в Томске (МКП #049) с 2006 г. по июль 2016 г., в ЦАО в Долгопрудном (МКП #222) с 2014 по 2016 год.

Специалистами ГГО продолжают испытания спектрометров УФОС, предназначенных для комплексных измерений спектрального состава суммарной УФ-радиации и ОСО взамен М-124. Накоплены 2–3-летние ряды параллельных с озонметрами М-124 наблюдений, демонстрирующие удовлетворительную согласованность и однородность рядов.

1.2. Спутниковые наблюдения общего содержания озона

В Санкт-Петербургском государственном университете (СПбГУ) анализируются измерения ОСО российского спутникового Фурье-спектрометра ИКФС-2 [16]. ИКФС-2, измеряющий уходящую

длинноволновую радиацию, размещен на борту российского спутника Метеор-М №2, запущенного в июле 2014 г. ИКФС-2 предназначен для зондирования температуры и влажности атмосферы и измерений ряда климатически-важных газовых составляющих атмосферы, включая озон. Измерения ОСО проводятся с погрешностью не хуже 5 % и вертикального профиля озона с погрешностью 10 % [16, 17]. Спутниковые измерения ОСО Фурье-спектрометра ИКФС-2 использовались при исследовании причин возникновения аномалий ОСО на севере Сибири зимой 2015–2016 гг. [77].

1.3 Измерения вертикального распределения озона и других малых газовых составляющих, влияющих на озон

Наряду с измерениями ОСО регулярные измерения содержания NO_2 в вертикальном столбе атмосферы выполняются на Звенигородской научной станции ИФА РАН с 1990 г. Измерения выполняются с помощью с/ф на базе отечественного монохроматора МДР-23. Станция входит в состав международной Сети для обнаружения изменений состава атмосферы (Network for the Detection of Atmospheric Composition Change – NDACC). Данные измерений доступны на сайте NDACC (<http://www.ndacc.org/>).

Регулярные измерения профилей озона в стратосфере и мезосфере с помощью микроволнового (142.2 GHz) радиометра проводятся в Москве в Физическом институте им. П.Н. Лебедева РАН [34]. Исследуются связи вариаций озона на высотах 15–55 км с динамикой и температурным режимом стратосферы, внезапными стратосферными потеплениями. На высотах ~90 км и ~65 км обнаружены вариации содержания ночного озона с периодами 3–5 часов.

На станции «Обнинск» проводятся лидарные измерения высотных профилей концентрации озона в области высот от 12 до 35 км с помощью разработанного в НПО «Тайфун» лидара АК-3. С помощью него измеряются вертикальные профили температуры (в области высот от 26 до 72 км) и аэрозоля (от 10 до 40 км) – параметров, критически важных для интерпретации данных озоновых измерений.

В Институте прикладной физики РАН (ИПФ, г. Нижний Новгород) создан и введен в эксплуатацию мобильный, автоматизированный наземный спектрометрический комплекс с центральной частотой 110,836 ГГц для непрерывного мониторинга озонового слоя [33].

В Полярном геофизическом институте РАН (г. Апатиты) совместно с ИПФ РАН проводились измерения содержания озона в средней атмосфере в зимние сезоны 2017/2018 и 2018/2019 гг. При измерении содержания O_3 в средней атмосфере использовался метод микроволновой радиометрии, оценка O_3 проводилась по частоте 110,836 ГГц.

Вертикальное распределение O_3 измеряется с использованием с/ф Брюера MkII #043 с 1989 г. на ВНС ИФА РАН, расположенной вблизи г. Кисловодска.

Специалистами ААНИИ в координации и при поддержке Института полярных и морских исследований (Германия) выполнялись запуски озонозондов на научно-исследовательской станции "Ледовая база Мыс Баранова" (79° с. ш., 101° в. д.) в периоды максимального развития стратосферного полярного вихря в январе–марте 2014, 2016 и 2018 гг. [42]. В каждый из периодов было выпущено порядка 10 озонозондов.

На Сибирской лидарной станции Института оптики атмосферы им. В.Е. Зуева Сибирского отделения РАН в Томске ($56,5^\circ$ с. ш., 85° в. д.) ведутся наземные дистанционные измерения методами лазерного зондирования [71] и спектрофотометрии аэрозольно-газового состава атмосферы и температуры. Измеряются рассеивающие характеристики стратосферного аэрозольного слоя, вертикальное распределение и общее содержание озона, содержание двуокиси азота (NO_2), вертикальное распределение температуры от тропосферы до мезосферы.

1.4. Наблюдения за приземным озоном

Результаты исследований приземного озона в различных регионах России и методов его прогнозирования представлены в работах специалистов ЦАО и Гидрометцентра России [24, 25, 57]. Важным направлением исследований является оценка возможности прогнозирования приземного озона на основе химических транспортных моделей. В Гидрометцентре России выполнен цикл работ по верификации расчетов приземного озона ХТМ CHIMERE и COSMO-Ru7-ART с использованием данных измерений на сети мониторинга в Московском регионе; предложены эффективные способы пост-процессинга модельных расчетов [35, 59].

С помощью озонметра «DASIBI 1008AH» в Полярном геофизическом институте РАН (г. Апатиты) проводятся измерения приземной концентрации озона.

Регулярный мониторинг приземного озона проводится государственными организациями в нескольких крупных городах: Москва, Санкт-Петербург, Казань, Томск, Красноярск, Сочи, Апатиты, Улан-Удэ, а также на станции Карадаг в Крыму. Подробнее о мониторинге приземного озона в России см. [4].

1.5. Измерения УФ-радиации

Систематические измерения приземной УФ-облученности проводятся в НПО «Тайфун» (г. бнинск) в диапазоне УФ-Б с использованием с/ф Брюера МКП #044.

Измерения УФ-Б радиации проводятся на 15 станциях Росгидромета с 2006 г. по разработанной в ГГО методике озонотрами М-124 с корректирующими приставками (шар Лярше).

Регулярные измерения УФ-облученности проводятся на Географическом факультете МГУ им. Ломоносова в спектральном УФ-Б диапазоне

с помощью пиранометра UVB-1 YES с 1999 г., а также с 1968 г. в диапазоне 300–380 нм.

Спектральная УФ-радиация в диапазоне 290–325 нм с шагом 0,5 нм измеряется с использованием с/ф Брюера МКП #043 с 1991 г. на ВНС вблизи г. Кисловодска. Результаты наблюдений ОСО, вертикального распределения О₃, УФ-радиации на ВНС вблизи Кисловодска, а также методы совершенствования наблюдений представлены в [74, 80].

Измерения УФ-облученности с использованием с/ф Брюера (МКП #044) проводятся в Обнинске с 1994 г. по настоящее время, в Институте оптики атмосферы СО РАН в Томске (МКП #049) проводились с 2006 г. по июль 2016 г., в ЦАО в Долгопрудном (МКП #222) с 2014 по 2016 год.

Разработки методов и технологий мониторинга атмосферного озона и УФ-облученности на территории Российской Федерации, включая прогноз максимальных значений УФ-индекса на трое суток вперед, выполняются в Гидрометцентре России совместно с ЦАО в рамках государственного задания. Основные результаты разработки методов прогнозирования УФ-индекса представлены в [29–31].

2. Результаты наблюдений и их анализ

Длительность однородных рядов данных об ОСО по большинству станций Росгидромета составляет более 45 лет.

На основе анализа данных озонметрической сети Росгидромета за период с 1975 по 2015 год проведен анализ особенностей распределения и многолетних вариаций озона над территорией России [55]. Специалистами ГГО проанализированы особенности озонового слоя над регионами России в 2017 и 2018 гг. [54, 56].

С использованием наблюдений спектрометров mini-SAOZ, в том числе размещенных на территории Российской Федерации, с участием специалистов ЦАО проведено исследование изменчивости озонового слоя в Арктике и влияния на него изменения климата [73]. Показано, что ожидаемое в середине 2030-х гг. восстановление стратосферного озона может произойти значительно позже. Отмечена важность использования высокоточных наземных и спутниковых наблюдений за ОСО для уточнения определения времени восстановления озонового слоя.

Результаты анализа и обобщения информации об ОСО на российских антарктических станциях опубликованы, в частности, в статье специалистов ААНИИ [46]. Показано, что на российских антарктических станциях на протяжении ~30 лет с середины 1970-х гг. наблюдалась устойчивая тенденция уменьшения ОСО антарктической весной. К началу 1990-х гг. весенние значения ОСО на ст. Мирный уменьшились на 70–75 % от среднего значения за 1974–1980 гг. В последующие годы эффект проявления весенней отрицательной аномалии ОСО замедлился. С начала 2000-х гг. наблюдается тенденция возвращения ОСО к значениям, характерным для периода, предшествовавшего проявлению озоновой дыры.

Специалистами ИФА РАН исследованы сезонные особенности квазидвухлетних вариаций стратосферного содержания NO_2 по результатам наземных измерений [1], влияния внезапных стратосферных потеплений на общее содержание NO_2 и O_3 [2], а также влияния на содержания NO_2 в стратосфере солнечного протонного события в октябре 2003 г. [3]. Проведено исследование зимне-весенних аномалий содержания O_3 и NO_2 в стратосфере над Московским регионом в 2010 и 2011 гг. [18], изменений вертикального распределения и общего содержания NO_2 под действием внезапных стратосферных потеплений [19]. Предложен метод учета автокорреляции в задаче линейной регрессии для анализа общего содержания NO_2 [20].

С использованием данных измерений ОСО в Томске с 1994 по 2017 г. проведено исследование колебательных циклов в поле озона различного масштаба с использованием методов статистического анализа [6]. В частности, анализ рассчитанной автокорреляционной функции показал, что ОСО обладает внутренней взаимосвязью длительностью 5 дней, которая определялась по спаду значения коэффициента корреляции в e раз, т. е. $\exp(-1)$. В Фурье-спектре исследуемого ряда доминирующей является гармоника, отвечающая за годовые вариации ОСО. В спектре присутствуют и полугодовые колебания, амплитуда которых более чем на порядок меньше годовой гармоники, а вот часто упоминаемые в литературе квазидвухлетние колебания в спектре отсутствуют. Анализ спутниковых данных MLS выявил повышенное содержание водяного пара, которое могло сыграть важную роль в усилении разрушения озона весной 2011 года [5, 62, 63].

Анализ результатов измерений ОСО, концентрации приземного озона и приземной УФ-облученности, проводимых в НПО "Тайфун" (г. Обнинск), показал, что:

- годовой ход ОСО в 2017–2019 гг. изменяется незначительно и достаточно хорошо согласуется с данными предыдущих многолетних измерений, значения ОСО находятся в диапазоне 250–450 единиц Добсона (образование озоновых дыр, со значениями ОСО менее 200 единиц Добсона не зафиксировано);

- различия в режимах УФ-облученности на протяжении 2017–2019 гг. являются незначительными, а величина УФ-индекса не выходила за границы диапазона предыдущих многолетних измерений.

По данным лидарных измерений проведен анализ вариаций высотных профилей концентрации озона над Обнинском. Наибольший размах сезонных колебаний отмечается в нижней стратосфере. В феврале-марте 2018 г. наблюдалась значительная положительная аномалия концентрации озона как в основном озоновом слое 14–25 км, так и в верхней стратосфере 25–32 км. При этом среднезональные общие концентрации озона оставались близкими к климатической норме. Проведено исследование взаимной корреляции вариаций концентрации озона и температуры.

Наблюдаемые корреляции возникают в результате совместного действия адвекции и вертикальных движений в стратосфере [27, 32].

В ИПФ РАН проведено сравнение и анализ результатов наблюдений изменчивости стратосферного озона в зимний период над Нижним Новгородом по данным наземных измерений с использованием нового озонметра, интерполяции спутниковых наблюдений SBUV, данных реанализа MERRA и численного моделирования с использованием модели состава нижней и средней атмосферы [21]. Все типы данных показывают сходную картину изменчивости содержания озона зимой 2016 г., основными чертами которой является наличие стабильного высотного максимума отношения смеси озона в средней стратосфере, на который накладываются кратковременные периоды увеличения его содержания. Результаты измерений с использованием озонметра в целом хорошо соответствуют другим типам данных. Использование численного моделирования позволило оценить влияние фотохимических и динамических факторов на наблюдаемую изменчивость содержания озона в зимние месяцы над Нижним Новгородом. Показано, что фотохимические процессы локального образования и разрушения озона не являются источником наблюдаемых кратковременных временных максимумов содержания озона. Среди динамических процессов важную роль играют меридиональные потоки переноса озона из областей насыщенных и обедненных озоном, а также локальные эффекты дивергенции и конвергенции зонального и меридионального потоков.

Однородность выполняемых наблюдений за озоном и сравнимость вновь получаемых данных с данными предыдущих десятилетий продолжает оставаться важной проблемой. Международная сеть полностью автоматизированных с/ф Брюера, эксплуатируемая с начала 1980-х гг., является одной из старейших глобальных систем, предоставляющих данные для оценок озона. Существующее программное обеспечение для управления с/ф 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 с/ф Брюера разрабатывается в ИФА РАН [74, 75].

С использованием данных наземных наблюдений ОСО специалистами Крымского федерального университета, ЦАО и Гидрометцентра России выявлены существенные отрицательные аномалии ОСО на севере Сибири зимой 2016 года [43, 44].

С использованием наблюдений за озоном на миллиметровых волнах в ФИАН РАН исследовалось влияние внезапных стратосферных потеплений на озоновый слой над Москвой [48], анализировались динамические процессы, ответственные за различие в озоновом слое зимой 2014/2015 и 2015/2016 гг. [34].

Специалистами ГГО совместно с зарубежными коллегами проведено исследование изменений озонового слоя над Шпицбергенем [72].

3. Теория, моделирование изменений озонового слоя

В Российском государственном гидрометеорологическом университете (РГГМУ, г. Санкт-Петербург) изменения озонового слоя исследуются с использованием разработанной совместно с Институтом вычислительной математики РАН (ИВМ РАН) химико-климатической модели (ХКМ). В модели учитывается изменчивость 74 химически активных газов атмосферы, влияющих на изменчивость содержания озона, а также динамические и радиационные процессы, влияющие на перенос озона в атмосфере. ХКМ использовалась для исследования изменчивости газового состава полярных районов, для исследования влияния выбросов метана из арктических газовых гидратов на содержание атмосферных газов [51], для анализа влияния солнечной активности на газовый состав и температурный режим атмосферы, для исследования эффектов изменения УФ-радиации под воздействием изменения содержания озона [45, 53].

В ХКМ РГГМУ начали применяться методы ассимиляции данных измерений и реанализа температуры поверхности океана, температуры, скоростей ветра, влажности и давления. С использованием усовершенствованной версии модели исследовались особенности изменения содержания озона в районе Санкт-Петербурга [10, 47, 49, 50, 78], на территории Арктики и Субарктики [11, 60, 77], а также влияния температуры поверхности океана на изменения состава и структуры атмосферы [61]. Уделялось внимание влиянию сульфатного вулканического аэрозоля на изменение содержания атмосферного озона за счет гетерогенных химических реакций на поверхности вулканического аэрозоля [79].

В ЦАО получены оценки возможностей прогнозирования внезапных стратосферных потеплений (ВСП), определяющих характер разрушения озонового слоя, с использованием химико-климатической модели (ХКМ) SOCOL и внедренной процедурой ассимиляции данных наблюдений «nudging» [15, 65]. ХКМ SOCOL является комбинацией модели общей циркуляции MAECHAM4 и химико-транспортной модели MEZON. Моделируется 118 газовых реакций, 33 реакции фотолиза и 16 гетерогенных реакций. Процедура «nudging», позволяющая улучшить воспроизведение параметров стратосферы, останавливалась за интервалы времени от 1 до 12 суток до начала ВСП. На примере нескольких ВСП установлено, что ХКМ SOCOL можно использовать для прогноза ВСП на срок до 8 суток.

В ЦАО проведены исследования особенностей циркуляции стратосферы Арктики и их влияния на тропосферу и состояние озонового слоя в зимние сезоны 2016/2017 [8] и 2017/2018 гг. [9]. С 2000 г. в ЦАО оценивается химическое разрушение озона внутри стратосферного полярного вихря в Арктике в течение зимних сезонов с использованием данных

спутниковых и баллонных измерений. Проводились исследования изменений химического состава атмосферы полярных регионов после протонных вспышек [66].

В Институте энергетических проблем химической физики им. В.Л. Тальрозе РАН проводились исследования сохраняющихся проблем химии средней атмосферы [37, 39], в том числе цепных химических процессов озоносферы [41], изменений химического состава средней атмосферы [40], вкладе O_x , HO_x , NO_x , ClO_x и BrO_x циклов в разрушение стратосферного озона в XXI веке [38], нечетном кислороде и его атмосферное время жизни [36].

В 2017–2019 гг. на Географическом факультете МГУ имени М.В. Ломоносова совместно с РГГМУ с использованием ХКМ ИВМ – РГМУ проведены исследования вариаций озона, облачности и эритемной радиации (Q_{ery}) над территорией Северной Евразии и в Московском регионе в 1979–2015 гг. и до конца XXI века. Выявлены длиннопериодные изменения Q_{ery} , характеризующиеся заметным уменьшением в конце 1970-х гг. и значимым положительным трендом более 5 % /10 лет с 1979 по 2015 г. для Московского региона по данным измерений и модели реконструкции [52]. Положительный тренд Q_{ery} связан, главным образом, с наблюдающимся уменьшением эффективного балла облачности и сокращением ОСО. За счет этих изменений существенно изменились УФ ресурсы весной для населения с наиболее уязвимым 1-м типом кожи, что проявляется в переходе от условий УФ оптимума к условиям УФ умеренной избыточности. Модельные эксперименты с ХКМ ИВМ – РГМУ для нескольких сценариев с учетом и без учета антропогенных факторов показали, что вариации антропогенных эмиссий фреонов и галонов оказывают наибольшее воздействие на изменчивость ОСО и Q_{ery} в Московском регионе. Среди естественных факторов особенно заметные эффекты наблюдаются за счет выбросов вулканического аэрозоля. Расчеты облачного пропускания Q_{ery} в целом согласуются с данными измерений, однако они не воспроизводят наблюдающийся положительный тренд этой величины.

В зависимости от используемых в модельных расчетах данных температуры поверхности океана наблюдаются некоторые различия в трендах ОСО [45]. Результаты модельного эксперимента, учитывающего изменения антропогенных выбросов галогенсодержащих веществ, свидетельствуют о нелинейном уменьшении Q_{ery} за счет восстановления озонового слоя в XXI веке. В 2016–2020 гг. значения Q_{ery} на 2–5 % выше относительно уровня 1979–1983 гг. в среднем по всей Северной Евразии с максимумом порядка 6 % в полярных широтах. Наибольшие изменения в пространственном распределении УФ ресурсов будут наблюдаться весной и летом: эти изменения проявляются в расширении областей УФ недостаточности на севере и сокращение областей УФ избыточности на юге.

По данным наблюдений в Метеорологической обсерватории МГУ проведены исследования Q_{reg} , чувствительной к вариациям озонового слоя [76], которые выявили замедление ее роста в последние годы начиная с 2015 года.

Совместно со специалистами Физического факультета СПбГУ проанализированы условия отрицательных аномалий озона в Сибири. Показано, что для Q_{reg} в высоких широтах понижение ОСО зимой даже до уровней так называемой озоновой дыры не является критичным. В то время как гораздо меньшие изменения озона в начале весны могут приводить уже к опасным уровням эритемной УФ-радиации, когда требуется защита от солнечного излучения [53].

В НПО "Тайфун" на основе сопоставления данных наземных станций наблюдения (Хиангхе, Кунминг и Иссык-Куль), а также спутниковых измерений SBUV, OMI и TOU (Total Ozone Unit на борту FengYun-3/A) исследована временная изменчивость ОСО в регионе горных массивов Средней Азии и Тибетское плато. Полученные результаты продемонстрировали схожесть распределения амплитуд и периодов колебаний ОСО на протяжении более 14 месяцев для всех анализируемых данных [13].

Проанализированы фазовые соотношения между вариациями солнечной активности, квазидесятилетними вариациями (КДВ) ОСО по данным спутниковых измерений и параметрами нижней стратосферы (температура, геопотенциал, скорость меридионального и зонального ветра) по данным реанализа NCEP. Фаза максимумов КДВ ОСО в среднем опережает максимумы солнечной активности в северных умеренных и высоких широтах на 20 мес. и отстает на 21 мес. в высоких широтах Южного полушария [12, 14].

На основе спутниковых данных из баз SBUV/SBUV2 (65° ю. ш. – 65° с. ш.) и Bodeker Scientific (90° ю. ш. – 90° с. ш.) проведен анализ пространственно-временной изменчивости фазовых соотношений между 11-летним циклом солнечной активности и КДВ ОСО методами композитного и кросс-вейвлетного анализа. Получено, что в последние два десятилетия КДВ ОСО в Арктике и Антарктике происходят примерно в противофазе.

В ИПФ РАН впервые проведено комплексное исследование выполнимости условия дневного фотохимического равновесия озона на высотах мезосферы – нижней термосферы, широко используемого для восстановления дневных распределений O и H по данным измерений озона и свечений возбужденных состояний молекулярного кислорода и гидроксила [64, 67–69]. На основании результатов 3D химико-транспортного моделирования годового цикла фотохимии рассчитано отношение реальной концентрации озона к его локальному равновесному значению в зависимости от высоты, широты и сезона. Ночное условие фотохимического равновесия озона хорошо (с отклонением и дисперсией менее 10 %) выполняется

выше некоторой границы, чье положение варьируется в диапазоне высот 81–87 км и крайне сложным образом зависит от координат и сезона.

В ИПФ РАН разработан статистически корректный метод валидации одновременных измерений нескольких атмосферных компонент при условии фотохимического равновесия [7, 70]. Найдено упрощенное алгебраическое соотношение, связывающее локальные концентрации данных компонент в диапазоне 50–100 км, параметрами которого являются только температура и концентрация воздуха, а также константы девяти химических реакций.

4. Распространение результатов

Данные систематических измерений ОСО, приземной УФ-облученности, а также информация о максимальных значениях УФ-индекса на ст. «Обнинск» архивируются и хранятся в базе данных «НПО «Тайфун». Результаты измерений регулярно передаются в мировой центр данных (WOUDC) в Канаде.

Данные систематических лидарных измерений концентрации озона на высотах от 12 до 35 км на ст. «Обнинск» архивируются и хранятся в базе данных «НПО «Тайфун».

Каждый год ГГО предоставляет аналитические материалы для обзора состояния и загрязнения окружающей среды и доклада об особенностях климата на территории Российской Федерации. В материалах традиционно отражаются особенности состояния озонового слоя за год и многолетние тренды и вариации ОСО над территорией Российской Федерации. Информация о текущей ситуации публикуется на сайте ГГО <http://voeikovmgo.ru>

Данные измерений УФ-Б радиации с полуденными значениями с 15 станций Росгидромета ежедневно направляются в Гидрометцентр России, ЦАО и Росгидромет.

Данные наблюдений ОСО на российских антарктических станциях оперативно передаются в ВМО для публикации в бюллетенях о состоянии озонового слоя в Антарктике: (<http://www.wmo.int/pages/prog/arep/gaw/ozone/index.html>).

4.2. Информирование общественности

ЦАО ежеквартально публикует в журнале «Метеорология и гидрология» (англоязычная версия распространяется издательством «Springer») обзоры с текущим анализом состояния озонового слоя над Россией. Такие же сведения публикуются в ежегодных Докладах об особенностях климата на территории Российской Федерации и Обзорах состояния и загрязнения окружающей среды в Российской Федерации», подготавливаемых Росгидрометом.

5. Оценка общемировых тенденций и соответствия им российских наблюдений и исследований озонового слоя; первоочередные задачи дальнейших исследований

К важнейшим мировым тенденциям в области мониторинга озонового слоя и УФ-радиации относятся:

– улучшение качества работы мировой наземной озонометрической сети (наблюдения ОСО и ВРО) за счет повышения качества наблюдений. Для обнаружения долговременных изменений ОСО необходимы высокоточные измерения, которые в настоящее время могут быть получены только при использовании спектрофотометров Добсона и Брюера. Высокоточные наземные наблюдения необходимы для валидации спутниковых измерений;

– пополнение баз данных наблюдений, верификации химических транспортных моделей для прогноза дальнейших изменений озонового слоя;

– моделирование изменчивости озонового слоя различного временного масштаба в разных регионах;

– разработка методов и средств, позволяющих по данным наблюдений выявлять долговременную изменчивость тропосферного озона, влияющего на продуктивность лесов и урожайность сельскохозяйственных культур;

– совершенствование средств моделирования фотохимических и динамических процессов, формирующих суточную, сезонную и долговременную изменчивость полей ОСО, тропосферного озона и УФ-облученности.

– развитие спутниковых наблюдений за состоянием озонового слоя, динамических и химических процессов тропосферы и стратосферы.

К числу первоочередных задач в области мониторинга и исследований озонового слоя можно отнести:

– возобновление регулярных наблюдений ОСО в Долгопрудном (ЦАО) высококачественным с/ф Добсона; их начало в Томске (ИОА СО РАН), проведение регулярных наблюдений с помощью с/ф Брюера и его калибровка в четырех пунктах (Долгопрудный, Кисловодск, Обнинск, Томск). Скорейшее установление метрологических характеристик с последующей аттестацией в качестве средств измерений ОСО озонового спектрометра УФОС и спектрометров mini-SAOZ. Регулярная передача данных с/ф Добсона и Брюера и спектрометров mini-SAOZ в мировые базы данных (WOUDC, NDACC);

– возобновление баллонного зондирования озонового слоя в зимне-весенний период на станции Салехард и Мысе Баранова (архипелаг Северная Земля), где часто происходит наибольшее в Арктике химическое разрушение озона;

– продолжение работ по анализу причин долговременной изменчивости озонового слоя и УФ-облученности, а также их кратковременных аномалий.

Прошедшие зимние сезоны со значительным разрушением озонового слоя в Арктике (2010/2011, 2015/2016 и 2019/2020 гг.) свидетельствует о необходимости продолжения и развития мониторинга и исследований динамических и химических процессов стратосферы, взаимодействия стратосферы и тропосферы и изменчивости озонового слоя. Учитывая расположение России, продолжающееся изменение климата, сохраняющееся в атмосфере значительное количество озоноразрушающих соединений и значительную межгодовую изменчивость стратосферы Арктики, эти исследования сохраняют свою актуальность.

Благодарности. Автор выражает признательность руководству ЦАО, ГГО, «НПО «Тайфун», АНИИ, ИФА РАН, ИОА СО РАН, ИПФ РАН, Метеорологической обсерватории МГУ, ФИАН РАН и персонально Б.Д. Белану, К.Н. Вишератину, А.Н. Груздеву, С.А. Ситнову, С.В. Соломонову, Ю.М. Тимофееву, В.У. Хаттатову, Н.Е. Чубаровой, С.П. Смышляеву, И.Н. Кузнецовой и др. за предоставленные материалы.

6. Научные публикации

За 2017–2019 гг. российскими учеными в области мониторинга и исследования озонового слоя были подготовлены публикации, представленные ниже в списке литературы.

Список литературы

1. Агеева В.Ю., Груздев А.Н. Сезонные особенности квазидвухлетних вариаций стратосферного содержания NO_2 по результатам наземных измерений // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2017. Т. 53, № 2. С. 74–85.

2. 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 NO_2 и O_3 // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2017. Т. 53, № 5. С. 545–555.

3. Агеева В.Ю., Груздев А.Н., Елохов А.С. Увеличение стратосферного содержания NO_2 по результатам наземных наблюдений после солнечного протонного события в октябре 2003 г. // Доклады Академии наук. 2018. Т. 479, № 6. С. 688–691.

4. Андреев В.В., Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Давыдов Д.К., Еланский Н.Ф., Жамсуева Г.С., Заяханов А.С., Ивлев Г.А., Козлов А.В., Котельников С.Н., Кузнецова И.Н., Лапченко В.А., Лезина Е.А., Постыляков О.В., Савкин Д.Е., Сенник И.А., Степанов Е.В., Толмачев Г.Н., Фофонов А.В., Челибанов И.В., Челибанов В.П., Широтов В.В. Приземная концентрация озона на территории России в первом полугодии 2020 г. // Оптика атмосферы и океана. 2020. Т. 33, № 9. С. 710–721.

5. *Баженов О.Е.* Повышенная влажность в стратосфере как фактор усиления разрушения озона в Арктике по данным Aura MLS // *Оптика атмосферы и океана*. 2017. Т. 30. С. 1053-1058.

6. *Баженов О.Е., Ельников А.В., Сысоев С.М.* Общее содержание озона над Томском в период 1994–2017 гг.: результаты статистического анализа // *Оптика атмосферы и океана*. 2019. Т. 32, № 7. С. 556-561.

7. *Беликович М.В., Куликов М.Ю., Нечаев А.А., Фейгин А.М.* Оценка качества данных измерений малых примесей атмосферы: априорные статистические ограничения, основанные на фотохимическом моделировании // *Известия ВУЗов. Радиофизика*. 2019. Т. 61, № 8. С. 645-661.

8. *Варгин П.Н.* Динамическое взаимодействие стратосферы и тропосферы внетропических широт в период внезапного стратосферного потепления в Арктике в январе-феврале 2017 г. // *Метеорология и гидрология*. 2018. № 5. С. 5-19.

9. *Варгин П.Н., Киришов Б.М.* Внезапное стратосферное потепление в Арктике в феврале 2018 г. и его влияние на тропосферу, мезосферу и озоновый слой // *Метеорология и гидрология*. 2019. № 2. С. 41-56.

10. *Виролайнен Я.А., Тимофеев Ю.М., Поберовский А.В., Поляков А.В., Шалямянский А.М.* Эмпирические оценки погрешностей измерений общего содержания озона различными методами и приборами // *Оптика атмосферы и океана*. 2017. Т. 30, № 2. С. 170-176.

11. *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.

12. *Вишератин К.Н.* Пространственно-временные вариации фазы квазидесятилетних колебаний общего содержания озона // *Исследование Земли из космоса*. 2017. № 2. С. 88-95.

13. *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. 59-68.

14. *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.

15. *Вязанкин А.С., Цветкова Н.Д., Варгин П.Н., Юшков В.А.* Атмосферное моделирование для обеспечения управления движением спускаемого аппарата // *Вестник «НПО имени С.А. Лавочкина»*. 2019. № 3. С. 72-79.

16. *Гаркуша А.С., Поляков А.В., Тимофеев Ю.М., Виролайнен Я.А.* Определение общего содержания озона по данным измерений спутникового ИК Фурье-спектрометра // *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*. 2017. Т. 53, № 4. С. 493-501.

17. *Гаркуша А.С., Поляков А.В., Тимофеев Ю.М., Виролайнен Я.А., Кухарский А.В.* Определение общего содержания озона по данным измерений спутникового ИК Фурье-спектрометра ИКФС-2 в облачной атмосфере (МИСЗ "МЕТЕОР-М" № 2) // *Исследование Земли из космоса*. 2018. № 2. С. 58-64.

18. *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. // *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*. 2017. Т. 53, № 2. С. 223-231.

14. Вишератин К.Н., Калашиник 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.

15. Вязанкин А.С., Цветкова Н.Д., Варгин П.Н., Юшков В.А. Атмосферное моделирование для обеспечения управления движением спускаемого аппарата // Вестник «НПО имени С.А. Лавочкина». 2019. № 3. С. 72-79.

16. Гаркуша А.С., Поляков А.В., Тимофеев Ю.М., Виролайнен Я.А. Определение общего содержания озона по данным измерений спутникового ИК Фурье-спектрометра // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2017. Т. 53, № 4. С. 493-501.

17. Гаркуша А.С., Поляков А.В., Тимофеев Ю.М., Виролайнен Я.А., Кухарский А.В. Определение общего содержания озона по данным измерений спутникового ИК Фурье-спектрометра ИКФС-2 в облачной атмосфере (МИСЗ "МЕТЕОР-М" № 2) // Исследование Земли из космоса. 2018. № 2. С. 58-64.

18. 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. // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2017. Т. 53, № 2. С. 223-231.

19. Груздев А.Н., Агеева В.Ю., Елохов А.С. Изменения вертикального распределения и общего содержания NO_2 под действием внезапных стратосферных потеплений // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2018. Т. 54, № 4. С. 545-555.

20. Груздев А.Н. Учет автокорреляции в задаче линейной регрессии на примере анализа общего содержания NO_2 в атмосфере // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2019. Т. 55, № 1. С. 73-82.

21. Ермакова Т.С., Смышляев С.П., Куликов М.Ю., Беликович М.В., Красильников А.А., Рыскин В.Г., Нечаев А.А., Фейгин А.М. Изменение содержания озона в атмосфере над Нижним Новгородом: сравнение радиометрических и спутниковых измерений, реанализа и численного моделирования // Известия ВУЗ. Радиофизика. 2017. Т. 60, № 8. С. 717-731.

22. Звягинцев А.М., Иванова Н.С., Кузнецова И.Н., Лапченко В.А. Содержание озона над территорией РФ в 2016 г. // Метеорология и гидрология. 2017. № 2. С. 132-136.

23. Звягинцев А.М., Иванова Н.С., Кузнецова И.Н., Нахаев М.И., Никифорова М.П. Мониторинг общего содержания озона и УФ облученности: основные результаты // Проблемы экологич. мониторинга и моделирования экосистем. 2017. Т. 28. № 6. С. 85-98.

24. Звягинцев А.М., Кузнецова И.Н., Шалыгина И.Ю., Лезина Е.А., Лапченко В.А., Никифорова М.П., Демин В.И. Исследования и мониторинг приземного озона в России // Труды Гидрометцентра России. 2017. № 365. С. 56-70.

25. Звягинцев А.М., Кузнецова И.Н., Шалыгина И.Ю., Нахаев М.И., Лезина Е.А., Лапченко В.А., Никифорова М.П., Демин В.И. Актуальность наблюдений и прогноза приземного озона в России // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. 2018 г. Том XXIX, № 1. С. 89-106.

26. Звягинцев А.М., Иванова Н.С., Крученицкий Г.М., Кузнецова И.Н., Лапченко В.А. Содержание озона над территорией РФ в 2017 г. // Метеорология и гидрология. 2018. № 2. С. 138-144.

27. *Зубачев Д.С., Кориунов В.А., Терев Н.В.* Сопоставление лидарных измерений стратосферного озона со спутниковыми данными Aura MLS/OMI и наземными измерениями общего содержания озона спектрофотометром Брюера // *Метеорология и гидрология*. 2018. № 7. С. 113-119.

28. *Иванова Н.С.* Сравнение наземных и спутниковых результатов измерения общего содержания озона // *Труды Гидрометцентра России*. 2017. № 365. С. 94-100.

29. *Иванова Н.С.* Эмпирическая модель расчета ультрафиолетового индекса // *Труды Гидрометцентра России*. 2017. Вып. 365. С. 118-127.

30. *Иванова Н.С., Кузнецова И.Н., Сумерова К.А.* Аномалии атмосферного озона в феврале-марте 2018 г. // *Гидрометеорологические исследования и прогнозы*. 2018. № 4 (370). С. 36-47.

31. *Иванова Н.С., Кручицкий Г.М., Кузнецова И.Н., Лапченко В.А.* Содержание озона над территорией РФ в 2018 г. // *Метеорология и гидрология*. 2019. № 2. С. 138-144.

32. *Кориунов 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.

33. *Красильников А.А., Куликов М.Ю., Кукин Л.М., Рыскин В.Г., Федосеев Л.И., Швецов А.А., Большаков О.С., Щитов А.М., Фейгин А.М.* Автоматизированный микроволновый спектрорадиометр для измерения излучения атмосферы в линии озона // *Приборы и техника эксперимента*. 2017. № 2. С. 123-125.

34. *Кропоткина Е.П., Розанов С.Б., Лукин А.Н., Игнатьев А.Н., Соломонов С.В.* Особенности изменений содержания озона в верхней стратосфере над Москвой в холодные полугодия 2014–2015 и 2015–2016 гг. // *Геомagnetизм и аэрономия*. 2019. Т. 59, № 2. С. 227-235.

35. *Кузнецова И.Н., Шалыгина И.Ю., Нахаев М.И., Ткачева Ю.В., Ривин Г.С., Кирсанов А.А., Борисов Д.В., Лезина Е.А.* Система прогнозирования качества воздуха на основе химических транспортных моделей // *Гидрометеорологические исследования и прогнозы*, 2019. № 4 (374). Р. 203-218.

36. *Ларин И.К.* Нечетный кислород и его атмосферное время жизни // *Химическая Физика*. 2017 Т. 36, № 3 С. 87-91.

37. *Ларин И.К.* Химическая физика озонового слоя. М.: Изд.-во: РАН, 2018. С. 212

38. *Ларин И.К.* О вкладе O_x , NO_x , NO_x , ClO_x и BrO_x – циклов в разрушение стратосферного озона в XXI веке // *Химическая Физика*. 2017. Т. 37, № 1. С. 90-96.

39. *Ларин И.К.* О нерешенных проблемах химии средней атмосферы // *Химическая Физика*. 2018. Т. 37, № 8. С. 79-84.

40. *Ларин И.К.* Химический состав средней атмосферы и его изменение в XXI веке // *Химическая Физика*. 2018. Т. 37. С. 88-92.

41. *Ларин И.К.* О теории цепных процессов озоносферы // *Химическая Физика*. 2019. Т. 38, № 5. С. 81-87.

42. *Макитас А.П.* Существенное уменьшение содержания озона в Арктической стратосфере зимой 2016 г. // *Российские полярные исследования*. 2016. № 2 (24). С. 9-10.

43. *Никифорова М.П., Варгин П.Н., Звягинцев А.М., Иванова Н.С., Кузнецова И.Н., Лукьянов А.Н.* Озоновая «мини-дыра» над севером Урала и Сибири // *Труды Гидрометцентра России*. 2016. Вып. 360. С. 168-180.

44. Никифорова М.П., Звягинцев А.М., Варгин П.Н., Иванова Н.С., Лукьянов А.Н., Кузнецова И.И. Аномально низкие уровни общего содержания озона над севером Урала и Сибири в конце января 2016 г. // Оптика атмосферы и океана. 2017. Т. 30, № 1. С. 12-19.

45. Никифорова М.П., Варгин П.Н., Звягинцев А.М. Аномалии озонового слоя над территорией России в зимне-весенний период 2015/2016 г. // Метеорология и гидрология. 2019. № 1. С. 36-49.

46. Пастухова А.С., Чубарова Н.Е., Жданова Е.Ю., Галин В.Я., Смышляев С.П. Численное моделирование изменения содержания озона, эритемной ультрафиолетовой радиации и УФ ресурсов над территорией Северной Евразии в XXI веке // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2019. Т. 55, № 3. С. 20-28.

47. Сибир Е.Е., Радионов В.Ф. Вариации общего содержания озона на российских антарктических станциях. Результаты многолетних наблюдений // Проблемы Арктики и Антарктики. 2018. Т. 64, № 3. С. 250-261.

48. Смышляев С.П., Виролайнен Я.А., Моцаков М.А., Тимофеев Ю.М., Поберовский А.В., Поляков А.В. Межгодовые и сезонные вариации содержания озона в разных высотных слоях атмосферы Санкт-Петербурга по данным наблюдений и численного моделирования // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2017. Т. 53, № 3. С. 343-359.

49. Соломонов С.В., Кропоткина Е.П., Розанов С.Б., Игнатьев А.Н., Лукин А.Н. Влияние сильных внезапных стратосферных потеплений на озон в средней стратосфере по наблюдениям на миллиметровых волнах // Геомагнетизм и аэронавигация. 2017. Т. 57, № 3. С. 392-400.

50. 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.

51. Тимофеев Ю.М., Виролайнен Я.А., Смышляев С.П., Моцаков М.А., Курнер О. Изменчивость озонового слоя вблизи Санкт-Петербурга по данным спутниковых измерений SBUV и модельных расчетов (2000–2014 гг.) // Исслед. Земли из космоса. 2017. № 3. С. 3-10.

52. 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 // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2018. Т. 54, № 7 // С. 659-671.

53. Чубарова Н.Е., Пастухова А.С., Смышляев С.П., Галин В.Я. Многолетняя изменчивость УФ радиации в Московском регионе по данным измерений и моделирования // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2018. Т. 54, № 2. С. 160-167.

54. 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.

55. Шаламянский А.М., Ромашкина К.И., Соломатникова А.А., Павлова К.Г. Особенности состояния озонового слоя над регионами РФ // Обзор состояния и загрязнения окружающей среды в Российской Федерации за 2017 г. М.: Росгидромет, 2018. С. 38-40.

56. Шаламянский А.М., Ромашкина К.И., Соломатникова А.А., Павлова К.Г., Талаш С.С. Состояние защитного озонового слоя атмосферы над территорией

Российской Федерации (более 40 лет регулярных наблюдений) // Труды ГГО. 2018. Вып. 590. С. 144-159.

57. Шаламянский А.М., Ромашкина К.И., Соломатникова А.А., Павлова К.Г. Особенности состояния озонового слоя над регионами РФ // Обзор состояния и загрязнения окружающей среды в Российской Федерации за 2018 г. М.: Росгидромет, 2019. С. 42-44.

58. 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.

59. Шалыгина И.Ю., Кузнецова И.Н., Нахаев М.И., Коновалов И.Б., Захарова П.В. Прогнозирование метеорологических условий и загрязнения воздуха с применением данных численной модели атмосферы и химической транспортной модели // Труды Гидрометцентра России. 2017. Вып. 365. С.81-93.

60. Шалыгина И.Ю., Кузнецова И.Н., Лапченко В.А. Режим приземного озона на станции Карадаг в Крыму по наблюдениям в 2009–2018 гг. // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2019. № 2. С. 6-17.

61. 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 // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2018. Т. 54, № 1. С. 36-44.

62. Яковлев А.Р., Смышляев С.П. Влияние южной осцилляции на динамику стратосферы и озоновый слой Арктики // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2019. Т. 55, № 1. С. 98-113.

63. Bazhenov O.E. Increased humidity in the stratosphere as a possible factor of ozone destruction in the Arctic during the spring 2011 using Aura MLS observations // Inter. J. of Remote Sensing. 2019. Vol. 40. P. 3448-3460.

64. Bazhenov O.E. Role of stratospheric temperature and humidity in occurrence of 2011 spring ozone anomaly in the Arctic and on the northern territory of Russia using Aura OMI/MLS observations // World J. Agri. & Soil Sci. 2019. Vol. 1, no. 4. WJASS.MS.ID.000517.

65. Belikov M.V., Kulikov M.Y., Grygalashvyly M., Sonnemann G.R., Ermakova T.S., Nechaev A.A., Feigin A.M. Ozone chemical equilibrium in the extended mesopause under the nighttime conditions // Advances in Space Research. 2018. Vol. 61, no 1. P. 426-432.

66. Funke B., Ball W., Bender S., Rozanov E., Sukhodolov T., Tsvetkova N., Yushkov V. HEPPA-II model-measurement intercomparison project: EPP indirect effects during the dynamically perturbed NH winter 2008–2009 // Atmos. Chem. Phys. 2017. Vol. 17. P. 3573-3604.

67. Krivolutsky A.A., Vyushkova T.Yu., Mironova I.A. Changes in the chemical composition of the atmosphere in the polar regions of the Earth after solar proton flares (3D modeling) // Geomagnetism and Aeronomy. 2017. Vol. 57, no 2. P. 156-176.

68. Kulikov M.Y., Belikov M.V., Grygalashvyly M., Sonnemann G.R., Ermakova T.S., Nechaev A.A., Feigin A.M. Daytime ozone loss term in the mesopause region // Ann. Geophys. 2017. Vol. 35. P. 677-682.

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

70. Kulikov M.Yu., Belikovich M.V., Grygalashvyly M., Sonnemann G.R., Ermakova T.S. Nechaev A.A., Feigin A.M. Nighttime ozone chemical equilibrium in the mesopause region // *J. Geop. Res.* 2018. Vol. 123. P. 3228-3242.

71. Kulikov M.Yu., Nechaev A.A., Belikovich M.V., Vorobeva E.V., Grygalashvyly M., Sonnemann G.R., Feigin A.M. Boundary of nighttime ozone chemical equilibrium in the mesopause region from SABER data: Implications for derivation of atomic oxygen and atomic hydrogen // *Geophys. Res. Lett.* 2019. Vol. 46 (2). P. 997-1004.

72. Matvienko G.G., Balin Yu.S., Bobrovnikov S.M., Kharchenko O.V. Siberian Lidar Station: Instruments and results // *EPJ Web of Conferences.* 2018. Vol. 176. P. 08020. ILRC 28.

73. Petkov B., Vitalea V., Svendby T., Hansen G., Sobolewski P., Láska K., Elstere J., Pavlova K., Viola A., Mazzolaa M., Lupia A., Solomatnikova A. Altitude-temporal behaviour of atmospheric ozone, temperature and wind velocity observed at Svalbard // *Atmospheric Research.* 2018. Vol. 207. P. 100-110.

74. Pommereau J-P., Goutail F., Pazmino A., Lefevre F., Chipperfield M., Feng W., Roozendaal M., Jepsen N., Hansen G., Kivi R., Bogner K., Strong K., Walker K., Kuzmichev A., Khattatov S., Sitnikova V. Recent Arctic ozone depletion: Is there an impact of climate change? // *Comptes Rendus Geoscience.* 2018. Vol. 350. P. 347-353.

75. 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. Vol. 231. P. 012045.

76. Savinykh V.V., Borovski A.N., Postylyakov O.V. Model of development of cross-platform software for ozone and ultraviolet radiation measurements on the example of Brewer Spectrophotometer // *Proc. SPIE.* 2019. Vol. 11208.

77. Schmalwieser A.W., Gröbner J., Weiss T., Chubarova N. et al. UV Index monitoring in Europe // *Photochemical & Photobiological Sci., Royal Society of Chemistry (United Kingdom).* 2017. Vol. 16. P. 1349-1370.

78. Timofeyev Y.M., Smyshlyaev S.P., Virolainen Y.A., Garkusha A.S., Polyakov A.V., Motsakov M.A., Kirner O. Case study of ozone anomalies over northern Russia in the 2015/2016 winter: measurements and numerical modelling // *Ann. Geophys.* 2018. Vol. 36. P. 1495-1505.

79. Virolainen Y.A., Timofeyev Y.M., Kostsov V.S., Ionov D.V., Kalinnikov V.V., Makarova M.V., Poberovsky A.V., Zaitsev N.A., Imhasin H.H., Polyakov A.V., Schneider M., Hase F., Barthlott S., Blumenstock T. Quality assessment of integrated water vapour measurements at St. Petersburg site, Russia: FTIR vs. MW and GPS techniques // *Atmos. Meas. Tech.* 2017. Vol. 10. P. 4521-4536.

80. Xu L., Wei K., Wu X., Smyshlyaev S.P., Chen W., Galin V.Ya. The Effect of Super Volcanic Eruptions on Ozone Depletion in a Chemistry-Climate Model // *Advances in Atmospheric Sciences.* 2019. Vol. 36, no 8. P. 823-836.

81. Zerefos C.S., Eleftheratos K., Savinykh V., Shiroto V., Stübi R. et al. Detecting volcanic sulfur dioxide plumes in the Northern Hemisphere using the Brewer spectrophotometers, other networks, and satellite observations // *Atmos. Chem. Phys.* 2017. Vol. 17, no. 1. P. 551-574.

References

1. Ageyeva V.Y., Gruzdev A.N. Seasonal features of quasi-biennial variations of NO₂ stratospheric content derived from ground-based measurements. *Izv., Atmos. Oceanic Phys.*, 2017, vol. 53, no. 1, pp. 65-75. DOI: 10.1134/S0001433817010029.

2. Ageyeva V.Y., Gruzdev A.N., Elokhov A.S., Mokhov I.I., Zueva N.E. Sudden stratospheric warmings: statistical characteristics and influence on NO₂ and O₃ total contents. *Izv., Atmos. Oceanic Phys.*, 2017, vol. 53, no. 5, pp. 477-486. DOI: 10.1134/S0001433817050036.

3. Ageyeva V.Y., Gruzdev A.N., Elokhov A.S. Increase in the stratospheric NO₂ content derived from results of ground-based observations after the October 2003 solar proton event. *Doklady Earth Sciences*, 2018, vol. 479, no. 2, pp. 539-542. DOI: 10.1134/S1028334X18040219.

4. Andreev V.V., Arshinov M.Yu., Belan B.D., Davydov D.K., Elansky N.F., Zhamsueva G.S., Zayakhanov A.S., Ivlev G.A., Kozlov A.V., Kotel'nikov S.N., Kuznetsova I.N., Lapchenko V.A., Lezina E.A., Postyl'yakov O.V., Savkin D.E., Senik I.A., Stepanov E.V., Tolmachev G.N., Fofonov A.V., Chelibanov I.V., Chelibanov V.P. and Shirotov V.V. Surface Ozone Concentration over Russian Territory in the First Half of 2020. *Optika Atmosfery i Okeana [Atmospheric and Oceanic Optics]*, 2020, vol. 33, no. 9, pp. 710-721. [in Russ.].

5. Bazhenov O.E. Elevated Humidity in the Stratosphere as a Gain Factor of Ozone Depletion in the Arctic According to Aura MLS Observations. *Atmospheric and Oceanic Optics*, 2018, vol. 31, no. 03, pp. 311-316. DOI: 10.1134/S1024856018030041.

6. Bazhenov O.E., Elnikov A.V. and Sysoev S.M. Total Ozone Content over Tomsk in 1994–2017: Results of Statistical Analysis. *Atmospheric and Oceanic Optics*, 2019, vol. 32, no. 6, pp. 680-685. DOI: 10.1134/S1024856019060034.

7. Belikov M.V., Kulikov M.Yu., Nechaev A.A., Feigin A.M. Evaluation of the Atmospheric Minor Species Measurements: a Priori Statistical Constraints Based on Photochemical Modeling. *Radiophys Quantum El*, 2019, vol. 61, no. 8-9, pp. 574-588. DOI: 10.1007/s11141-019-09918-58.

8. Vargin P.N. Stratosphere-troposphere Dynamical Coupling over Boreal Extratropics during the Sudden Stratospheric Warming in the Arctic in January–February 2017. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2018, vol. 43, pp. 277-287. DOI: 10.3103/S1068373918050011.

9. Vargin P.N., Kiryushov B.M. Major Sudden Stratospheric Warming in the Arctic in February 2018 and Its Impacts on the Troposphere, Mesosphere, and Ozone Layer. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2019, vol. 44, pp. 112-123. DOI: 10.3103/S1068373919020043.

10. Virolainen Y.A., Timofeyev Y.M., Poberovskii A.V., Polyakov A.V., Shalamyanskii A.M. Empirical assessment of errors in total ozone measurements with different instruments and methods. *Atmospheric and Oceanic Optics*, 2017, vol. 30, no. 4, pp. 382-388. DOI: 10.1134/S1024856017040133.

11. Virolainen Y.A., Timofeev Y.M., Berezin I.A., Smyshlyaev S.P., Motsakov M.A., Kirner O. Validation of Atmospheric Numerical Models Based on Satellite Measurements of Ozone Columns. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2018, vol. 43, pp. 161-167. DOI: 10.3103/S1068373918030044.

12. Visheratin K.N. Spatio-temporal variability of phase of total ozone quasidecadal variations. *Issledovanie Zemli iz kosmosa [Earth research from space]*, 2017, no. 2, pp. 88-95. [in Russ.].

13. Visheratin K.N., Nerushev A.F., Orozaliev M.D. Vremennaya izmenchivost' obshchego soderzhaniya ozona v Aziatskom regione po dannym nazemnyh i sputnikovoyh izmereniy. *Issledovanie Zemli iz kosmosa [Earth research from space]*, 2017, no. 1, pp. 59-68. [in Russ.].

14. Visheratin K.N., Kalashnik M.V. Quasidecadal variations of lower stratosphere meteoroparameters and total ozone global fields based on satellite data. *Issledovanie Zemli iz kosmosa [Earth research from space]*, 2017, vol. 5, pp. 3-13. [in Russ.].

15. Vyazankin A.S., Tsvetkova N.D., Vargin P.N., Yushkov V.A. Atmospheric modeling for ensuring controlling the movement of the returned vehicle. *Vestnik NPO imeni S.A. Lavochkina*, 2019, no. 3, pp. 72-79. [in Russ.].

16. Garkusha A.S., Polyakov A.V., Timofeev Y.M., Virolainen Y.A. Determination of the total ozone content from data of satellite ir Fourier-spectrometer. *Izv., Atmos. Oceanic Phys.*, 2017, vol. 53, no. 4, pp. 433-440.

17. Garkusha A.S., Polyakov A.V., Timofeev Yu. M., Virolainen Ya. A.I, Kulkharsky A.V. Retrieval of the total ozone content under cloudiness from data of IRFS-2 spectrometer onboard "METEOR-M" № 2 satellite. *Issledovanie Zemli iz kosmosa [Earth research from space]*, 2018, no. 2, pp. 58-64. [in Russ.].

18. Gruzdev A.N., Elokhov A.S., Kropotkina E.P., Solomonov S.V. Winter-spring anomalies in stratospheric O₃ and NO₂ contents over the Moscow region in 2010 and 2011. *Izv., Atmos. Oceanic Phys.*, 2017, vol. 53, no. 2, pp. 195-203. DOI: 10.1134/S0001433817020037.

19. Gruzdev A.N., Ageyeva V.Y., Elokhov A.S. Changes in vertical distribution and column content of NO₂ under the influence of sudden stratospheric warmings. *Izv., Atmos. Oceanic Phys.*, 2018, vol. 54, no. 4, pp. 354-363.

20. Gruzdev A.N. Accounting for autocorrelation in the linear regression problem by an example of analysis of the atmospheric column NO₂ content. *Izv., Atmos. Oceanic Phys.*, 2019, vol. 55, no 1, pp. 65-72. DOI: 10.1134/S0001433819010043.

21. Ermakova T.S., Smyslyaev S.P., Kulikov M.Yu., Belikovich M.V., Krasil'nikov A.A., Ryskin V.G., Nechaev A.A., Feigin A.M. Ozone Content Variability in the Atmosphere Above Nizhny Novgorod. Comparison of the Results of the Radiometric and Satellite Measurements, Reanalysis, and Numerical Simulation. *Radiophys Quantum El.*, 2018, vol. 60, pp. 640-652. DOI: 10.1007/s11141-018-9833-3.

22. Zvyagintsev, A.M., Ivanova, N.S., Kuznetsova, I.N., Lapchenko V.A. Ozone content over the Russian Federation in 2016. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2017, vol. 42, no. 2, pp. 135-140. DOI:10.3103/S106837391702008X.

23. Zvyagintsev A.M., Ivanova N.S., Kuznetsova I.N., Nakhaev M.I., Nikiforova M.P. Monitoring of total ozone and UV irradiance: the main results. *Problemy ekologicheskogo monitoringa i modelirovaniya ekosistem [Problems of Ecological Monitoring and Ecosystem Modelling]*, 2017, vol. 28, no. 6, pp. 85-98. [in Russ.].

24. Zvyagintsev A.M., Kuznetsova I.N., Shalygina I.Y., Lezina E.A., Lapchenko V.A., Nikiforova M.P., Demin V.I. Investigation and monitoring of surface ozone in Russia. *Trudy Gidromettsentra Rossii [Proceedings of the Hydrometcentre of Russia]*, 2017, vol. 365, pp. 56-70. [in Russ.].

25. Zvyagintsev A.M., Kuznetsova I.N., Shalygina I.Yu., Nakhaev M.I., Lezina E.A., Lapchenko V.A., Nikiforova M.P., Demin V.I. Actuality of observations and forecasting of surface ozone in Russia. *Problemy ekologicheskogo monitoringa i modelirovaniya ekosistem [Problems of Ecological Monitoring and Ecosystem Modelling]*, 2018, vol. 29, no. 1, pp. 89-106. [in Russ.].

26. Zvyagintsev A.M., Ivanova N.S., Kruchenitskii G.M. Kuznetsova I.N., Lapchenko V.A. Ozone Content over the Russian Federation in 2017. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2018, vol. 43, no. 2, pp. 127-133. DOI: 10.3103/S1068373918020085.

27. Zubachev D.S., Korshunov V.A., Tereb N.V. Concentration of Stratospheric Ozone Derived from Lidar, Satellite, and Surface Observations. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2018, vol. 43, pp. 488-493. DOI: 10.3103/S1068373918070099.

28. Ivanova N.S. Comparison of ground and satellite total ozone measurements obtained. *Trudy Gidromettsentra Rossii [Proceedings of the Hydrometcentre of Russia]*, 2017, vol. 365, pp. 94-100. [in Russ.].

29. Ivanova N.S. An empirical model of ultraviolet index calculation. *Trudy Gidromettsentra Rossii [Proceedings of the Hydrometcentre of Russia]*, 2017, vol. 365, pp. 118-127. [in Russ.].

30. Ivanova N.S., Kuznetsova I.N., Sumerova K.A. Atmospheric ozone anomalies in February-March 2018. *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy [Hydrometeorological Research and Forecasting]*, 2018, vol. 370, no. 4, pp. 36-47. [in Russ.].

31. Ivanova N.S., Kruchenitskii G.M., Kuznetsova I.N., Lapchenko V.A., Statnikov K.A. Ozone Content over the Russian Federation in 2018. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2019, vol. 44, pp. 152-158. DOI: 10.3103/S1068373919020092.

32. Korshunov V.A., Zubachev D.S. Temporal Variations in the Vertical Distribution of Stratospheric Ozone over Obninsk from Lidar Data. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2018, vol. 43, pp. 168-177. DOI: 10.3103/S1068373918030056.

33. Krasilnikov A.A., Kulikov M.Y., Kukin L.M., Ryskin V.G., Fedoseev L.I., Shvetsov A.A., Bolshakov O.S., Feigin A.M., Shchitov A.M. Automated microwave radiometer for measuring the atmospheric ozone emission line. *Instruments and Experimental Techniques*, 2017, vol. 60, no. 2, pp. 271-273. DOI: 10.1134/S002044121701033X.

34. Kropotkina E.P., Rozanov S.B., Lukin A.N. Ignat'ev A.N., Solomonov S.V. Characteristics of Changes in the Ozone Content in the Upper Stratosphere over Moscow during the Cold Half-Years of 2014–2015 and 2015–2016. *Geomagn. Aeron.*, 2019, vol. 59, pp. 212-220. DOI: 10.1134/S0016793219010092.

35. Kusnetsova I.N., Shalygina I.U., Nahaev M.I., Tkacheva U.V., Rivin G.S., Kirsanov A.A., Borisov D.V., Lezina E.A. Air quality forecasting system based on chemical transport models. *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy [Hydrometeorological Research and Forecasting]*, 2019, vol. 374, no. 4, pp. 203-218. [in Russ.].

36. Larin I.K. Odd oxygen and its atmospheric lifetime. *Russ. J. Phys. Chem. B*, 2017, vol. 11, no. 2, pp. 375-379. DOI: 10.1134/S1990793117020075.

37. Larin I.K. Himicheskaya fizika ozonovogo sloya [Chemical physics of the ozone layer.]. Moscow, RAN publ., 2018, 212 p. [in Russ.].

38. Larin I.K. Contribution from the O_x^- , HO_x^- , NO_x^- , ClO_x^- , and BrO_x^- cycles to the stratospheric ozone depletion in the XXI century. *Russ. J. Phys. Chem. B*, 2017, vol. 11, no. 1, pp. 189-194. DOI: 10.1134/S1990793117010067.

39. Larin I.K. Unresolved Problems in the Chemistry of the Middle Atmosphere. *Russ. J. Phys. Chem. B*, 2018, vol. 12, no. 4, pp. 791-796. DOI: 10.1134/S1990793118040279.

40. Larin I.K. Chemical Composition of the Middle Atmosphere and Its Changes in the 21st Century. *Russ. J. Phys. Chem. B*, 2018, vol. 12, no.6, pp. 1094-1098. DOI: 10.1134/S1990793118060064.

41. Larin I.K. On the Theory of Chain Processes in the Ozone Layer. *Russ. J. Phys. Chem. B*, 2019, vol. 13, no. 3, pp. 548-553. DOI: 0.1134/S1990793119030084.

42. *Makshitas A.P.* Sushchestvennoe umen'shenie sodержaniya ozona v Arkticheskoy stratosfere zimoy 2016 g. *Rossiyskie polyarnye issledovaniya*, 2016, vol. 24, no. 2, pp. 9-10. [in Russ.].

43. *Nikiforova M.P., Vargin P.N., Zvyagintsev A.M., Ivanova N.S., Kuznetsova I.N., Lukyanov A.N.* Ozone «mini-hole» over the north of Ural and Siberia. *Trudy Gidromettsentra Rossii [Proceedings of the Hydrometcentre of Russia]*, 2016, vol. 360, pp. 168-180. [in Russ.].

44. *Nikiforova M.P., Zvyagintsev A.M., Vargin P.N., Ivanova N.S., Luk'yanov A.N. and Kuznetsova I.N.* Anomalously Low Total Ozone Levels over the Northern Urals and Siberia in Late January 2016. *Atmospheric and Oceanic Optics*, 2017, vol. 30, no. 3, pp. 255-262. DOI: 10.1134/S1024856017030125.

45. *Nikiforova M.P., Vargin P.N., Zvyagintsev A.M.* Ozone Anomalies over Russia in the Winter-Spring of 2015/2016. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2019, vol. 44, pp. 23-32. DOI: 10.3103/S1068373919010035.

46. *Pastukhov, A.S., Chubarova N.E., Zhdanova Y.Y., Galin V.Ya., Smyshlyaev S.P.* Numerical Simulation of Variations in Ozone Content, Erythemat Ultraviolet Radiation, and Ultraviolet Resources over Northern Eurasia in the 21st Century. *Izv., Atmos. Ocean. Phys.*, 2019, vol. 55, pp. 242-250. DOI: 10.1134/S0001433819030058.

47. *Sibir E.E., Radionov V.F.* Total ozone variations at russian antarctic stations. Results of long-term observations. *Problemy Arktiki i Antarktiki [Arctic and Antarctic Research]*, 2018, vol. 64, no. 3, pp. 250-261. [in Russ.]. DOI: 10.30758/0555-2648-2018-64-3-250-261.

48. *Smyshlyaev S.P., Virolainen Y.A., Motsakov M.A. et al.* Interannual and seasonal variations in ozone in different atmospheric layers over St. Petersburg based on observational data and numerical modeling. *Izv., Atmos. Ocean. Phys.*, 2017, vol. 53, pp. 301-315. DOI: 10.1134/S0001433817030148.

49. *Solomonov S.V., Kropotkina E.P., Rozanov S.B., Ignat'ev A.N., Lukin A.N.* Influence of strong sudden stratospheric warmings on ozone in the middle stratosphere according to millimeter wave observations. *Geomagnetism and Aeronomy*, 2017, vol. 57, no. 3, pp. 361-368. DOI: 10.1134/S0016793217020141.

50. *Timofeyev Yu.M., Virolainen Ya.A., Smyshlyaev S.P., Motsakov M.A.* Ozone over St. Petersburg: Comparison of Experimental Data and Numerical Simulation. *Atmospheric and Oceanic Optics*, 2017, vol. 30, no. 3, pp. 263-268. DOI: 10.1134/S1024856017030149.

51. *Virolainen Y.A., Timofeyev Y.M., Smyshlyaev S.P., Motsakov M.A., Kirner O.* The study of the ozone layer variability near St. Petersburg between 2000 and 2014 based on SBUV satellite measurements and the results of numerical modeling. *Issledovanie Zemli iz kosmosa [Earth research from space]*, 2017, no. 3, pp. 3-10. [in Russ.].

52. *Cherepova M.V., Smyshlyaev S.P., Makarova M.V., Poberovskiy A.V., Timofeyev, Yu.M., Shved G.M.* A Study of the Column Methane Short-Term Variability in the Atmosphere on a Regional Scale. *Izv., Atmos. Ocean. Phys.*, 2018, vol. 54, pp. 558-569. DOI: 10.1134/S0001433818060038.

53. *Chubarova N.E., Pastukhova A.S., Galin V.Y. Smyshlyaev S.P.* Long-Term Variability of UV Irradiance in the Moscow Region according to Measurement and Modeling Data. *Izv., Atmos. Ocean. Phys.*, 2018, vol. 54, pp. 139-146. DOI: 10.1134/S0001433818020056.

54. *Chubarova N.E., Timofeev Yu.M., Virolainen Ya.A., Polyakov A.V.* Estimates of UV Indices During the Periods of Reduced Ozone Content over Siberia in Winter-

Spring 2016. *Atmospheric and Oceanic Optics*, 2019, vol. 32, no. 2, pp. 177-179. DOI: 10.1134/S1024856019020040.

55. *Shalamyanskiy A.M., Romashkina K.I., Solomatnikova A.A., Pavlova K.G.* Osobennosti sostoyaniya ozonovogo sloya nad regionami RF. Obzor sostoyaniya i zagryazneniya okruzhayushchey sredy v Rossiyskoy Federacii za 2017 g. Moscow, Rosgidromet, 2018, pp. 38-40. [in Russ.].

56. *Shalamyanski A.M., Romashkina K.I., Pavlova K.G., Solomatnikova A.A., Talash S.S.* The state of the protective ozone layer over the Russian Federation territory (more than 40 years of regular observations). *Trudy GGO [Proceedings of Voeikov Geophysical Observatory]*, 2018, vol 590, pp. 144-159 [in Russ.].

57. *Shalamyanskiy A.M., Romashkina K.I., Solomatnikova A.A., Pavlova K.G.* Osobennosti sostoyaniya ozonovogo sloya nad regionami RF. Obzor sostoyaniya i zagryazneniya okruzhayushchey sredy v Rossiyskoy Federacii za 2018 g. Moscow, Rosgidromet, 2019, pp. 42-44. [in Russ.].

58. *Shalygina I. Yu., Kuznetsova I. N., Zvyagintsev A. M., Lapchenko V. A.* Surface ozone at coasts of the Balkans and the Crimea. *Optika Atmosfery i Okeana [Atmospheric and Oceanic Optics]*, 2017, vol. 30, no. 6, pp. 515–523. DOI: 10.15372/AOO20170611. [in Russ.].

59. *Shalygina I.Yu., Kuznetsova I.N., Nakhaev M.I., Konovalov I.B., Zaharova P.V.* Forecasting of weather conditions and air pollution with application of data of the numerical model of the atmosphere and a chemical transport model. *Trudy Gidromettsentra Rossii [Proceedings of the Hydrometcentre of Russia]*, 2017, vol. 365, pp. 81-93 [in Russ.].

60. *Shalygina I.Yu., Kuznetsova I.N., Lapchenko V.A.* Surface ozone regime at Kara Dag station in Crimea according to observations in 2009-2018. *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy [Hydrometeorological Research and Forecasting]*, 2019, vol. 372, no. 2, pp. 102-113. [in Russ.].

61. *Shved, G.M., Virolainen, Y.A., Timofeyev, Y.M. Ermolenko S.I., Smyshlyayev S.P.* Ozone Temporal Variability in the Subarctic Region: Comparison of Satellite Measurements with Numerical Simulations. *Izv., Atmos. Ocean. Phys.* 2018, vol. 54, pp. 32-38. DOI: 10.1134/S0001433817060111.

62. *Jakovlev A.R., Smyshlyayev S.P.* Impact of the Southern Oscillation on Arctic Stratospheric Dynamics and Ozone Layer. *Izv., Atmos. Ocean. Phys.*, 2019, vol. 55, pp. 86-98. <https://doi.org/10.1134/S0001433819010122>.

63. *Bazhenov O.E.* Increased humidity in the stratosphere as a possible factor of ozone destruction in the Arctic during the spring 2011 using Aura MLS observations. *Inter. J. of Remote Sensing*, 2019, vol. 40, pp. 3448-3460.

64. *Bazhenov O.E.* Role of stratospheric temperature and humidity in occurrence of 2011 spring ozone anomaly in the Arctic and on the northern territory of Russia using Aura OMI/MLS observations. *World J. Agri. & Soil Sci.*, 2019, vol. 1, no. 4, WJASS.MS.ID.000517.

65. *Belikov M.V., Kulikov M.Y., Grygalashvyly M., Sonnemann G.R., Ermakova T.S., Nechaev A.A., Feigin A.M.* Ozone chemical equilibrium in the extended mesopause under the nighttime conditions. *Advances in Space Research*, 2018, vol. 61, no 1, pp. 426-432.

66. *Funke B., Ball W., Bender S., Rozanov E., Sukhodolov T., Tsvetkova N., Yushkov V.* HEPPA-II model-measurement intercomparison project: EPP indirect effects during the dynamically perturbed NH winter 2008–2009. *Atmos. Chem. Phys.*, 2017, vol. 17, pp. 3573-3604.

67. Krivolutsky A.A., Vyushkova T.Yu., Mironova I.A. Changes in the chemical composition of the atmosphere in the polar regions of the Earth after solar proton flares (3D modeling). *Geomagnetism and Aeronomy*, 2017, vol. 57, no 2, pp. 156-176.

68. Kulikov M.Y., Belikovich M.V., Grygalashvyly M., Sonnemann G.R., Ermakova T.S., Nechaev A.A., Feigin A.M. Daytime ozone loss term in the mesopause region. *Ann. Geophys.*, 2017, vol. 35, pp. 677-682.

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

70. Kulikov M.Yu., Belikovich M.V., Grygalashvyly M., Sonnemann G.R., Ermakova T.S. Nechaev A.A., Feigin A.M. Nighttime ozone chemical equilibrium in the mesopause region. *J. Geop. Res.*, 2018, vol. 123, pp. 3228-3242.

71. Kulikov M.Yu., Nechaev A.A., Belikovich M.V., Vorobeva E.V., Grygalashvyly M., Sonnemann G.R., Feigin A.M. Boundary of nighttime ozone chemical equilibrium in the mesopause region from SABER data: Implications for derivation of atomic oxygen and atomic hydrogen. *Geophys. Res. Lett.*, 2019, vol. 46, no. 2, pp. 997-1004.

72. Matvienko G.G., Balin Yu.S., Bobrovnikov S.M., Kharchenko O.V. Siberian Lidar Station: Instruments and results. *EPJ Web of Conferences*, 2018, vol. 176, pp. 08020. ILRC 28.

73. Petkov B., Vitalea V., Svendby T., Hansen G., Sobolewski P., Láska K., Elstere J., Pavlova K., Viola A., Mazzolaa M., Lupia A., Solomatnikova A. Altitude-temporal behaviour of atmospheric ozone, temperature and wind velocity observed at Svalbard. *Atmospheric Research*, 2018, vol. 207, pp. 100-110.

74. Pommereau J-P., Goutail F., Pazmino A., Lefevre F., Chipperfield M., Feng W., Roozendaal M., Jepsen N., Hansen G., Kivi R., Bognar K., Strong K., Walker K., Kuzmichev A., Khattatov S., Sitnikova V. Recent Arctic ozone depletion: Is there an impact of climate change? *Comptes Rendus Geoscience*, 2018, vol. 350, pp. 347-353.

75. 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, vol. 231, pp. 012045.

76. Savinykh V.V., Borovski A.N., Postylyakov O.V. Model of development of cross-platform software for ozone and ultraviolet radiation measurements on the example of Brewer Spectrophotometer. *Proc. SPIE.*, 2019, vol. 11208.

77. Schmalwieser A.W., Gröbner J., Weiss T., Chubarova N. et al. UV Index monitoring in Europe // Photochemical & Photobiological Sci., Royal Society of Chemistry (United Kingdom). 2017, vol. 16, pp. 1349-1370.

78. Timofeyev Y.M., Smyshlyaev S.P., Virolainen Y.A., Garkusha A.S., Polyakov A.V., Motsakov M.A., Kirner O. Case study of ozone anomalies over northern Russia in the 2015/2016 winter: measurements and numerical modelling. *Ann. Geophys.*, 2018, vol. 36, pp. 1495-1505.

79. Virolainen Y.A., Timofeyev Y.M., Kostsov V.S., Ionov D.V., Kalinnikov V.V., Makarova M.V., Poberovsky A.V., Zaitsev N.A., Imhasin H.H., Polyakov A.V., Schneider M., Hase F., Barthlott S., Blumenstock T. Quality assessment of integrated water vapour measurements at St. Petersburg site, Russia: FTIR vs. MW and GPS techniques. *Atmos. Meas. Tech.*, 2017, vol. 10, pp. 4521-4536.

80. Xu L., Wei K., Wu X., Smyshlyaev S.P., Chen W., Galin V.Ya. The Effect of Super Volcanic Eruptions on Ozone Depletion in a Chemistry-Climate Model. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2019, vol. 36, no 8, pp. 823-836.

81. Zerefos C.S., Eleftheratos K., Savinykh V., Shiroto V., Stübi R. et al. Detecting volcanic sulfur dioxide plumes in the Northern Hemisphere using the Brewer spectrophotometers, other networks, and satellite observations. *Atmos. Chem. Phys.*, 2017, vol. 17, no. 1, pp. 551-574.

*Поступила 03.02.2021; одобрена после рецензирования 02.03.2021;
принята в печать 23.03.2021.*

*Submitted 03.02.2021; approved after reviewing 02.03.2021;
accepted for publication 23.03.2021.*