

УДК 551.510.41

РОССИЙСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ОЗОНОVOГО СЛОЯ В ПЕРИОД 2014–2016 гг.

А.М. Звягинцев, П.Н. Варгин

*Центральная аэрологическая обсерватория, г. Долгопрудный
azvyagintsev@cao-rhms.ru, p_yargin@mail.ru*

Представлен обзор работ в области наблюдений и исследований озонового слоя, проведенных в России в 2014–2016 гг. учреждениями Росгидромета, Российской академии наук РАН и Министерства образования и науки Российской Федерации. Обзор подготовлен по материалам и структуре Национального сообщения Российской Федерации о наблюдениях и исследованиях озонового слоя, представленного во Всемирную метеорологическую организацию в январе 2017 года. Описываются основные современные тенденции исследований и развития мониторинга озонового слоя за рубежом и России. Предложены первоочередные меры по активизации таких работ в нашей стране.

Ключевые слова: озоновый слой, стратосфера Арктики, наблюдения и анализ изменений озонового слоя.

Введение

Наиболее полная информация о состоянии озонового слоя публикуется в выходящем каждые четыре года международном Оценочном докладе о состоянии озонового слоя. Последнее издание этого доклада, опубликованного в 2014 г., размещено на сайте (http://www.wmo.int/pages/prog/arep/gaw/ozone_2014/ozone_asst_report.html) В настоящее время готовится следующее издание, которое должно быть завершено к 2018 году.

В целом, согласно имеющимся оценкам, восстановление озонового слоя к уровню начала 1980-х гг. должно произойти во 2-й половине XXI века. Полученные в последние годы данные наблюдений свидетельствуют о снижении концентраций озоноразрушающих соединений в атмосфере, происходящем благодаря действию Монреальского протокола. При рассмотрении этой проблемы все большее значение приобретает взаимосвязь наблюдаемого и ожидаемого в ближайшие десятилетия роста концентраций парниковых газов в атмосфере и изменений озонового слоя.

Сохраняется обусловленная динамическими процессами высокая межгодовая изменчивость циркуляции полярной стратосферы, определяющая характер разрушения озонового слоя в зимне-весенний период в Антарктике и Арктике и затрудняющая определение начала

возможного восстановления озонового слоя. Так, например, весной 2011 г. в Арктике наблюдалась рекордная аномалия озонового слоя, сравнимая по некоторым параметрам с аномалиями в Антарктике. Арктическая аномалия 2011 г. была обусловлена необычайно устойчивым и холодным стратосферным полярным вихрем, внутри которого образовался значительный объем полярных стратосферных облаков, на частицах которых в присутствии солнечной радиации и происходит сильное разрушение озона.

Чрезвычайно холодным в стратосфере Арктики было начало зимы 2015–2016 гг., когда впервые были зафиксированы ледяные полярные стратосферные облака, которые часто наблюдаются в стратосфере Антарктики и очень редко в Арктике [45, 46]. Если бы не внезапное стратосферное потепление в феврале 2016 г., разрушение стратосферного озона в этот зимний сезон в Арктике могло стать рекордным. Таким образом, несмотря на тенденцию уменьшения содержания озоноразрушающих соединений, высокая межгодовая изменчивость динамических процессов полярной 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 по-прежнему обусловлена его определяющим влиянием на уровень УФ-радиации вблизи поверхности Земли, превышение которого может представлять угрозу для здоровья населения не только в южных регионах (включая популярные курорты), но и в умеренных и высоких широтах.

Настоящая статья представляет расширенный вариант Российского национального сообщения, подготовленного к 10-му совещанию национальных представителей по мониторингу и исследованию озонового слоя, организованному секретариатами Всемирной метеорологической организацией (ВМО) и Программой ООН по исследованию окружающей среды (ЮНЕП) в штаб-квартире ВМО в Женеве, Швейцария 28-30 марта 2017 года. Российское сообщение было подготовлено в Центральной аэрологической обсерватории (ЦАО) совместно с рядом учреждений Росгидромета, РАН и Высшей школы. Материалы совещания, включая представленные Национальные доклады, публикуются в серии докладов ВМО по озону на английском языке и размещаются на сайте (https://www.wmo.int/pages/prog/arep/gaw/ozone_reports.html).

Совещания национальных представителей по мониторингу и исследованию озонового слоя проводятся один раз в три года начиная с 1990 г. с целью расширения сотрудничества и обмена результатами наблюдений и научных исследований между странами-участниками Венской конвенции и Монреальского протокола. В 10-м совещании участвовали представители около 50 стран, большинство из которых представили в ВМО Национальные сообщения с результатами работ по

поддержанию и развитию мониторинга и исследованиям озонового слоя; российскую сторону представлял П.Н. Варгин – один из авторов настоящей статьи. В заключительной части статьи рассказывается о важнейших тенденциях исследований озона в мире, их сопоставление с исследованиями, проводимыми в России, и изложено мнение авторов о необходимости дальнейших работ.

Под термином «озоновый слой» на совещаниях национальных представителей понимают в первую очередь нижнюю стратосферу (слой 15–30 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-В радиацию (280–315 нм). Исследования озона, относящиеся к приземному слою, в докладе не рассматриваются.

1. Проведение наблюдений

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

1.1. Наблюдения общего содержания озона и других газов-компонентов, ответственных за потери озона

В России за проведение регулярных измерений общего содержания озона и взаимодействие с соответствующими органами ВМО ответственна Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Росгидромет). На территории бывшего СССР ежедневные измерения ОСО выполняются на сети, состоящей из 35 озонометрических станций, расположенных в России, Украине и Казахстане, оснащенных фильтровыми озонометрами М-124. Методическое, техническое и метрологическое обеспечение мониторинга ОСО и ультрафиолетовой (УФ) радиации над территорией РФ осуществляет Главная геофизическая обсерватория им. А.И. Воейкова (ГГО). Данные наблюдений поступают в Росгидромет (ЦАО, ГГО, Гидрометцентр России). 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 в Канаде (Environment Service of Canada). В WOUDC данные наземных наблюдений используются для ежедневного отображения полей ОСО (<http://woudc.org/>). В ЦАО данные наблюдений на озонометрической сети Росгидромета, Украины и Казахстана анализируются, оперативно представляются в виде карт полей ОСО; при выявлении существенных аномалий в полях ОСО и

УФ-радиации ЦАО оперативно информирует органы власти. В ГГО данные наблюдений проходят тщательный контроль качества, оценивается качество работы отдельных приборов и станций, проводится корректировка данных; прошедшие контроль значения ОСО и УФ-радиации передаются в архивную базу данных WOUDC.

Измерения ОСО проводятся также в ряде пунктов с помощью спектрофотометров Добсона и Брюера, в частности в Кисловодске (с 1989 г. на Кисловодской высокогорной научной станции Института физики атмосферы им. А.М.Обухова РАН), Обнинске (с 1994 г.; НПО «Тайфун»), Томске (с 2006 г.; Институт оптики атмосферы (ИОА) им. В.Е. Зуева СО РАН) и г. Долгопрудный (с 2014 г., ЦАО). Данные этих наблюдений также передаются в WOUDC.

В последние годы на территории России начались измерения ОСО и общего содержания NO_2 с помощью спектрометров mini-SAOZ производства Франции на станциях Анадырь, Долгопрудный, Жиганск, Иркутск, Мурманск и Салехард; данные станции Салехард доступны на сайте (<http://saoz.obs.uvsq.fr>), других станций – на сайте (<http://www.cao-rhms.ru/saoz/>).

Начиная с 1990 г. регулярные измерения содержания NO_2 в вертикальном столбе атмосферы выполняются на Звенигородской научной станции Института физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН. Измерения проводятся с помощью спектрофотометра на базе отечественного монохроматора МДР-23 по оригинальной методике, основанной на восстановлении вертикального распределения NO_2 . Станция входит в состав международной Сети обнаружения изменений состава атмосферы (Network for the Detection of Atmospheric Composition Change – NDACC). Данные измерений доступны на сервере NDACC (<http://www.ndacc.org/>). С 1979 по 2009 г. измерения общего содержания NO_2 в атмосфере проводились на Кисловодской высокогорной научной станции ИФА РАН [7].

На кафедре физики атмосферы физического факультета Санкт-Петербургского государственного университета (СПбГУ) под руководством проф. Ю.М. Тимофеева продолжают регулярные наземные спектроскопические измерения озона и влияющих на озон газов (<http://troll.phys.spbu.ru/science/measurements.html>). Гиперспектральные наземные измерения с помощью Фурье-спектрометра высокого спектрального разрешения (до $0,005 \text{ см}^{-1}$) Bruker IFS 125 HRC проводятся в солнечные дни с 2009 г. Регулярные измерения спектров поглощения солнечного излучения в ИК-области позволяют определять содержание 15–20 парниковых, озоноразрушающих и загрязняющих атмосферных газов. При этом определяются не только общие содержания различных газов, но и элементы их вертикальных распределений.

1.2. Измерения вертикального распределения озона и других газов/компонентов, ответственных за потери озона

В городах Обнинске и Санкт-Петербурге проводятся лидарные измерения вертикальных профилей концентрации озона в области высот от 12 до 35 км с помощью разработанного в НПО «Гайфун» лидара АК-3 методом дифференциального поглощения на длинах волн 355 нм (вне полосы поглощения) и 308 нм (в полосе поглощения) [32]. С помощью того же лидара 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 измерений озона.

Регулярные измерения профилей озона в стратосфере и мезосфере с помощью микроволнового (142,2 GHz) радиометра регулярно проводятся в Москве в Физическом институте им. П.Н. Лебедева РАН [55].

Эпизодические измерения профилей озона с помощью микроволнового радиометра проводятся в Нижнем Новгороде, Санкт-Петербурге и Томске, а также в Киргизии [49].

Данные о содержании озона в различных слоях атмосферы с помощью наземных измерений прямого солнечного инфракрасного излучения (Фурье-спектрометрия) получены в районе Санкт-Петербурга [11]. Результаты измерений удовлетворительно коррелируют с данными спутниковых измерений озона в тропосфере (IASI) и стратосфере (MLS).

1.3. Измерения УФ-облученности

1.3.1. Широкополосные измерения

Пробные измерения УФ-Б радиации (УФР) проводятся на 14 озонотрических станциях Росгидромета с 2006 г. Измерения УФР проводятся по разработанной в ГГО методике озонотрами М-124 с корригирующими приставками (шар Лярше). Долговременные регулярные измерения УФ-облученности проводятся в Метеорологической обсерватории Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова в спектральном УФ-Б диапазоне с помощью пиранометра UVB-1 YES с 1999 г., а также в диапазоне 300–380 нм с 1968 года.

1.3.2. Спектрорадиометрические измерения

Систематические измерения УФ-облученности проводятся с использованием спектрофотометров Брюера в Кисловодске, Обнинске, Томске и Долгопрудном.

1.4. Проведение калибровок

1.4.1. Калибровка озонметров М-124

ГГО является центром ВМО по калибровке и контролю качества измерений ОСО фильтровыми озонόμεтрами и проводит калибровку озонόμεтров М-124. Единая шкала измерений на сети Росгидромета поддерживается регулярной поверкой всех озонόμεтров по национальному эталону – спектрофотометру Добсона № 108. За последние 30 лет расхождения между национальным эталоном и эталонами ВМО не превышали 1 %. Последние сравнения эталона Росгидромета с региональным европейским эталоном, проведенные в Германии в июне 2014 г., показали, что расхождение показаний не превышало 0,18 %.

1.4.2. Регулярный контроль качества измерений ОСО

Постоянство шкалы измерений ОСО обеспечивается регулярной калибровкой озонόμεтров М-124 в ГГО и ежемесячными проверочными работами с участием двух озонόμεтров на станциях. Каждая станция имеет три прибора – рабочий, запасной и резервный. Резервный озонόμεстр после ремонта (модернизации) и калибровки в ГГО отправляется на станцию и становится рабочим. Периодичность цикла – 2–3 года.

ГГО постоянно контролирует текущее состояние измерений и техническое состояние озонόμεтров, выявляя изменения шкалы измерений и при необходимости корректируя результаты полученных данных. При больших нарушениях шкалы измерений озонόμεстр досрочно заменяется запасным и направляется на калибровку.

1.4.3. Калибровка УФ-радиации

В 2010 г. введен в действие аттестованный Госстандартом рабочий эталон 1 разряда спектральной плотности энергетической освещенности в диапазоне 250–800 нм на основе галогенной лампы. Начиная с 2011 г. в ГГО проводится калибровка измерений УФР в абсолютной шкале. Шкала измерений УФР поддерживается рабочим эталоном 1 разряда – галогенной лампой КГМ 120–1000 Вт, которая ежегодно поверяется во ВНИИОФИ.

1.4.4. Калибровка спектрофотометров Брюера

Согласно рекомендациям ВМО, для обеспечения правильности наблюдений спектрофотометры Брюера нуждаются в калибровке раз в два года. Последняя калибровка спектрофотометра Брюера МКII № 044 (НПО «Тайфун», г. Обнинск) проводилась летом 2015 г. в Испании на

станции атмосферного зондирования Эль-Ареносилло, спектрофотометров Брюера, работающих в Кисловодске и Томске – в 2012 г. В настоящее время эти три и четвертый российский спектрофотометр Брюера МКШ № 222, установленный в ЦАО в 2014 г., нуждаются в калибровке. Предполагается проведение такой калибровки в России с привлечением иностранных специалистов.

2. Результаты наблюдений и их анализ

Анализ результатов наблюдений проводится с целью определения причин эпизодически возникающих озоновых аномалий и долгосрочных изменений озонового слоя. В конце января 2016 г. над севером Урала и Сибири впервые зарегистрирована озоновая мини-дыра (ОСО < 220 ед.Д.), вызванная чрезвычайно интенсивным стратосферным полярным вихрем, в котором температура понизилась до значений, характерных для зимнего периода в Антарктике [46]. По результатам анализа спутниковых наблюдений и данных реанализа установлено, что уменьшение ОСО на всех широтах практически закончилось к 1997 г., и в период 1997–2014 гг. озоновый слой стабилизировался [20]. Статистически значимый положительный тренд ОСО 1,5–2 % в 10 лет был выявлен в спутниковых данных ОМІ в период 2005–2015 гг. [29].

На основе данных спутникового мониторинга «озоновой дыры» в Антарктике авторы [31] показали, что, хотя ее основные характеристики остаются на уровне конца 1990-х гг., некоторые параметры озонового слоя в этой области начали восстанавливаться. Неочевидные фазовые соотношения между вариациями ОСО, солнечной активностью, квазидвухлетними колебаниями зонального ветра в стратосфере на экваторе и рядом других метеопараметров методами Фурье, композитного и кросс-вейвлетного анализа описаны в [15]. Показано, что в блокирующих антициклонах в весенний и летний периоды возникают заметные отрицательные аномалии озона в тропосфере и нижней стратосфере [50, 51].

Предложен новый метод расчета различных типов биологически активной УФ-радиации (эритемно взвешенной, витамин-D-взвешенной и катаракта-взвешенной) на различных высотах над уровнем моря [64]. Для указанных типов зависимость коэффициента увеличения УФР с высотой представлена в виде композиции независимых вкладов от различных факторов в широком диапазоне их изменения со средней погрешностью 1 % и стандартным отклонением 3 % по сравнению с результатами моделирования с теми же входными параметрами. Используемые параметризации учитывают высотные зависимости плотности числа молекул, общего содержания озона, аэрозоля и альbedo поверхности [64].

3. Теория, моделирование и другие связанные с озоном исследования

Численная глобальная фотохимическая модель CHARM (Chemical Atmospheric Research Model) и результаты трехмерного численного моделирования климатологических распределений озона и других малых газовых составляющих атмосферы Земли в диапазоне высот 0–90 км представлены в [34–36]. Проведено сопоставление результатов расчетов глобальных численных моделей с данными наземных спектрометрических измерений общего содержания озона и ряда других озонотивных соединений, а также содержания озона в отдельных слоях [13, 14].

Выполнено моделирование влияния планетарных волн на устойчивость циркумполярного вихря, температуру полярной стратосферы, содержание озона и других газов с использованием глобальной химико-климатической модели нижней и средней атмосферы [54]. Сравнены межгодовые и сезонные вариации интегрального содержания озона в разных высотных слоях в районе Санкт-Петербурга по данным наблюдений и численного моделирования.

С помощью интерактивной химико-динамически-радиационной двумерной модели средней атмосферы Socrates и с использованием прогностических сценариев IPCC оценены особенности восстановления озонового слоя в различных широтных зонах Северного полушария в XXI веке. Показано, что после восстановления озоновый слой будет продолжать расти и к концу XXI века достигнет стационарного уровня, превосходящего «невозмущенный» дофреоновый уровень, что, по мнению автора, неблагоприятным образом может повлиять на образование витамина D в организме человека под действием солнечного УФ-В излучения, особенно в высоких широтах, где рост озона будет максимальным [37].

Приведены результаты расчетов динамики разрушения стратосферного озона в средних широтах на основе численного моделирования динамики газовых и гетерофазных реакций с участием частиц слоя Юнге. Оценен вклад гетерофазных реакций в истощение озонового слоя и обоснована необходимость их учета при разработке прогнозов восстановления озонового слоя в XXI веке [38].

Оригинальное объяснение природы разрушения озона в результате взаимодействия молекул озона с заряженными частицами в полярной стратосфере без участия хлорфторуглеродов предложено в [63].

Опубликованы результаты анализа механизмов возникновения внезапных стратосферных потеплений и их влияния на озоновый слой в полярных регионах в зимне-весенний период [10, 33, 42, 47].

4. Распространение результатов

4.1. Архивация, хранение и передача результатов наблюдений в национальные и международные архивы данных

Результаты оперативных наблюдений ОСО на сети Росгидромета приборами М-124 проходят первичный контроль качества в ЦАО, архивируются и передаются в WOUDC. В WOUDC регулярно передаются также данные наблюдений ОСО и УФ-радиации с помощью спектрофотометра Брюера на станциях Кисловодск, Обнинск и Томск.

Данные измерений на Звенигородской научной станции ИФА содержания NO₂ в стратосферном столбе и в пограничном слое атмосферы регулярно поступают в NDACC и находятся в открытом доступе (<http://www.ndacc.org/>).

4.2. Информирование общественности

Текущий анализ состояния озонового слоя над Россией и прилегающими территориями описывается в подготавливаемых ЦАО обзорах, ежеквартально публикуемых в журнале «Метеорология и гидрология» (англоязычная версия распространяется издательством Springer). В обзорах ежегодно приводятся данные о долговременных изменениях озонового слоя над Россией, проводится сравнение с наблюдениями в других регионах мира.

Сведения о состоянии озонового слоя над территорией России также публикуются в ежегодных Докладах об особенностях климата на территории Российской Федерации и Обзорах состояния и загрязнения окружающей среды в Российской Федерации, представляемых Росгидрометом.

Технология прогнозирования ОСО и УФ-индекса на территории России в настоящее время разработана специалистами ЦАО и Гидрометцентра России. Для прогнозирования ОСО используются данные текущих наблюдений ОСО и прогностические величины метеорологических параметров.

Для определения текущего состояния и прогнозирования полей УФ-Б облученности используются данные наблюдений и прогнозов ОСО, облачности и альbedo подстилающей поверхности. В теплый сезон прогноз максимально возможного и с учетом балла облачности УФ-индекса на текущие и вторые сутки на территории России размещается на сайте Гидрометцентра России (<http://meteoinfo.ru/>); там же даются и рекомендации по защитным мерам для разных групп населения. Методика прогнозирования ОСО и УФ-индекса доступна на сайте (<http://method.meteorf.ru/methods/pollut/uv/uv.html>).

4.3. Научные публикации

В 2014–2016 гг. опубликованы монографии С.М. Бобровникова и др. [6], В.Б. Кашкина и др. [28]. Некоторые обзоры научных статей по озоновой тематике, опубликованных в 2011–2014 гг., можно найти в журнале «Известия РАН. Физика атмосферы и океана», № 2 и № 5 за 2016 год.

Общим вопросам, связанным с озоновым слоем и УФ-радиацией, посвящены работы [9, 25, 30, 58, 59]. Методические вопросы и аппаратура описаны в [5, 11, 19, 27, 41, 44, 65, 67–71, 73, 74]. Анализ наблюдений в различных регионах выполнен в [21, 23, 39, 40, 45, 62, 66]. Влияние на озоновый слой различных гео- и гелиофизических факторов рассмотрено в [4, 17, 18, 22, 24, 60, 61, 76]. Наблюдения различных озоноактивных составляющих атмосферы описаны в [1, 2, 12, 48, 56]. Результаты моделирования особенностей озонового слоя и влияющих на него факторов опубликованы в [8, 16, 25, 52–54, 57]. Процессы образования полярных стратосферных облаков, оказывающие значительное влияние на динамику озонового слоя в зимне-весенний период, рассмотрены в [3]. Спектры поглощения озона в инфракрасной области описаны в [43].

5. Дальнейшие планы

Озонометры М-124 эксплуатируются на станциях российской озонометрической сети более 30 лет и устарели, их производство прекращено; для их замены в ГГО и Лазерном центре ИТМО (Санкт-Петербург) был разработан автоматический УФ-озонный спектрометр (УФОС). УФОС измеряет в диапазоне 290–400 нм с разрешением не более 1,0 нм спектральный состав ультрафиолетовой радиации (УФР), приходящей от полусферы неба, и определяет ОСО по рассеянному свету от зенита неба. Автоматизированные измерения ОСО и спектра УФР приборами УФОС проводятся при любой облачности (<http://voeikovmgo.ru/>).

Первая партия УФОС изготовлена в 2014 г., прошла государственные испытания в органах Госстандарта. Изготовленные разработчиками УФОС начали поступать на станции национальной озонометрической сети с осени 2015 г.; на конец 2016 г. установлено 18 УФОС. Предполагается, что в течение 1,5–2 лет будут проводиться параллельные наблюдения ОСО с помощью УФОС и озонометра М-124.

В настоящее время лидары АК-3 для измерений вертикального распределения озона установлены на семи станциях лидарного зондирования Росгидромета, расположенных на территории России. Планируется проведение их опытной эксплуатации, а затем выполнение регулярных измерений.

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

Важнейшие современные мировые тенденции в области мониторинга озонового слоя и УФ-радиации:

- улучшение качества работы мировой наземной озонметрической сети (наблюдения общего содержания и вертикального распределения озона) за счет повышения качества наблюдений на действующих станциях и введения в строй новых станций в регионах с редкой сетью. Для обнаружения долговременных изменений ОСО необходимы высокоточные измерения, которые в настоящее время могут быть получены только при использовании спектрофотометров Добсона и Брюера. Спектрофотометры Добсона надежны в эксплуатации, но требуют ручного обслуживания (или достаточно дорогостоящего переоснащения для автоматизации наблюдений). Спектрофотометры Брюера осуществляют наблюдения в автоматическом режиме, но требуют сопровождения квалифицированного оператора и более дорогое метрологическое обслуживание, а также регулярные калибровки. Высокоточные наземные наблюдения за состоянием озонового слоя необходимы для валидации спутниковых измерений, а также для разработки методов и алгоритмов получения достоверных данных ОСО и ВРО с действующих и планируемых спутников;

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

- расчеты изменчивости озонового слоя различного временного масштаба в разных регионах;

- разработка методов и средств, позволяющих по данным наблюдений получать пространственные распределения и 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.

Оценивая достигнутый уровень отечественных исследований в сравнении с уровнем зарубежных исследований в США, Канаде, Германии, Японии, Великобритании, Франции, необходимо отметить, что:

- качество данных наземной озонметрической в России уступает качеству спутниковой аппаратуры TOMS-OMI. В России проводится пополнение баз данных по озону, в основном, за счет данных, получаемых в мировых архивах спутниковых и наземных наблюдений.

Регулярные наблюдения вертикального распределения озона в Российской Федерации не проводятся;

- в международные научные группы, представляющие итоги изменений озонового слоя и дальнейшие планы его исследований, представители России практически не входят, возможно, из-за отсутствия координации с зарубежными организациями;
- достаточно успешно проводится работа по установлению ряда характеристик озонового слоя и озонотворяющих факторов над Санкт-Петербургом с использованием данных спутниковых и наземных оптических измерений сотрудниками кафедры физики атмосферы физического факультета Санкт-Петербургского государственного университета;
- проводимые в ЦАО и ГГО работы по исследованию и моделированию изменчивости озонового слоя частично соответствует мировому уровню.

С учетом стратегических целей к числу первоочередных задач РФ относятся:

- возобновление регулярных наблюдений ОСО в Долгопрудном (ЦАО) высококачественным спектрофотометром (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) – в районах расположения центра стратосферного полярного вихря, где происходит наибольшее в Северном полушарии химическое разрушение озона. Ранее наблюдения вертикального распределения озона осуществлялись в этом регионе в рамках международных проектов специалистами ЦАО и ААНИИ;
- продолжение работ по анализу причин долговременной изменчивости озонового слоя и УФ-облученности, а также их кратковременных аномалий;
- совершенствование моделирования фотохимических и динамических процессов с целью прогнозирования долговременной изменчивости озонового слоя и УФ-радиации и их кратковременных аномалий.

Благодарности. Авторы выражают свою признательность руководству ЦАО, ГГО, НПО «Тайфун», ИФА РАН им. А.М. Обухова, ИОА СО РАН им. В.Е. Зуева и персонально Б.Д. Белану, Ю.Е. Беликову,

К.Н. Вишератину, А.Н. Груздеву, И.Л. Каролу, С.А. Ситнову, С.В. Соломонову, Ю.М. Тимофееву, В.У.Хаттатову, В.А. Юшкову, Н.Е. Чубаровой и др. за предоставленные материалы. Авторы также благодарят рецензента за полезные замечания и предложения.

Поступила в редакцию 15.06.2017 г.

Список использованных источников

1. Агеева В.Ю., Гришаев М.В., Груздев А.Н. и др. Аномалии стратосферного содержания NO₂ над Сибирью, связанные с арктической озоновой дырой 2011 г. // Оптика атмосферы и океана. 2014. Т. 27, № 1. С. 40-45.
2. Агеева В.Ю., Груздев А.Н., Елохов А.С. и др. Зимне-весенние аномалии стратосферного содержания NO₂ по результатам наземных измерений // Известия РАН. ФАО. 2015. Т. 51, № 4. С. 455-463.
3. Алоян А.Е., Ермаков А.Н., Арутюнян В.О. Моделирование образования полярных стратосферных облаков с учетом кинетических и гетерогенных процессов // Известия РАН. ФАО. 2015. Т. 51, № 3. С. 276-286.
4. Баженов О.Е. Исследование квазидвухлетней цикличности общего содержания и концентраций озона на отдельных высотных уровнях над Арктикой и Томском по данным спутниковой аппаратуры TOMS // Оптика атмосферы и океана. 2014. Т. 27, № 12. С. 1074-1078.
5. Баженов О.Е., Бурлаков В.Д., Гришаев М.В. и др. Сравнение результатов дистанционных спектроскометрических и лидарных измерений O₃, NO₂, температуры и стратосферного аэрозоля с данными спутниковых и радиозондовых измерений // Оптика атмосферы и океана. 2016. Т. 29, № 3. С. 216-223.
6. Бобровников С.М., Матвиенко Г.Г., Романовский О.А., Сериков И.Б., Суханов А.Я. Лидарный спектроскопический газоанализ атмосферы. Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2014. 510 с.
7. Боровский А.Н., Арабов А.Я., Голицын Г.С. и др. Вариации общего содержания диоксида азота в атмосфере на Северном Кавказе // Метеорология и гидрология. 2016. № 2. С. 29-44.
8. Варгин П.Н., Володин Е.М. Анализ воспроизведения динамических процессов в стратосфере климатической моделью ИВМ РАН // Известия РАН. ФАО. 2016. Т. 52, № 1. С. 3-18.
9. Варгин П.Н., Володин Е.М., Карпечко А.Ю. и др. О стратосферно-тропосферных взаимодействиях // Вестник РАН. 2015. Т. 85, № 1. С. 39-46.
10. Варгин П.Н., Медведева И.В. Исследование температурного и динамического режимов внетропической атмосферы Северного полушария в период внезапного стратосферного потепления зимой 2012–2013 гг. // Известия РАН. ФАО. 2015. Т. 51, № 1. С. 20-38.
11. Виротайнен Я.А., Тимофеев Ю.М., Поберовский А.В. и др. Определение содержания озона в различных слоях атмосферы с помощью наземной Фурье-спектроскопии // Известия РАН. ФАО. 2015. Т. 51, № 2. С. 191-200.
12. Виротайнен Я.А., Тимофеев Ю.М., Поберовский А.В. и др. Содержание нитрата хлора в атмосфере над Санкт-Петербургом // Известия РАН. ФАО. 2015. Т. 51, № 1. С. 60-68.
13. Виротайнен Я.А., Тимофеев Ю.М., Поляков А.В. и др. Сопоставление наземных измерений общего содержания O₃, HNO₃, HCl и NO₂ с данными численного моделирования. // Известия РАН. ФАО. 2016. Т. 52, № 1. С. 64-73.
14. Виротайнен Я.А., Тимофеев Ю.М., Поберовский А.В. и др. Эмпирические оценки погрешностей измерений общего содержания озона различными методами и приборами // Оптика атмосферы и океана. 2017. Т. 30, № 2. С. 170-176.
15. Вишератин К.Н. Квазидесятилетние вариации общего содержания озона, ветра, температуры и геопотенциальной высоты над станцией Ароза, Швейцария // Известия РАН. ФАО. 2016. Т. 52, № 1. С. 74-82.

16. Гаврилов Н.М., Коваль А.В., Погорельцев А.И. и др. Численное моделирование влияния стационарных мезомасштабных орографических волн на меридиональную циркуляцию и потоки озона в средней атмосфере // Геомагнетизм и аэрономия. 2014. Т. 54, № 3. С. 412-419.
17. Груздев А.Н. Оценка влияния 11-летнего цикла солнечной активности на содержание озона в стратосфере // Геомагнетизм и аэрономия. 2014. Т. 54, № 5. Р. 678-684.
18. Груздев А.Н. Оценка эффектов извержения вулкана Пинатубо в стратосферном содержании O_3 и NO_2 с учетом вариаций уровня солнечной активности // Оптика атмосферы и океана. 2014. Т. 27, № 6. С. 506-514.
19. Дорохов В.М., Ивлев Г.А., Привалов В.И. и др. Техническое оснащение наземной сети станций измерения общего содержания озона в России и перспективы модернизации // Оптика атмосферы и океана. 2014. Т. 27, № 3. С. 250-257.
20. 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. 800-809.
21. Зуев В.В., Зуева Н.Е., Короткова Е.М. Сравнительный анализ рядов наблюдений общего содержания озона и УФ-В-радиации в зонах произрастания бореальных лесов // Оптика атмосферы и океана. 2015. Т. 28, № 10. С. 914-920.
22. Зуев В.В., Зуева Н.Е., Савельева Е.С. и др. О роли извержения вулкана Мерапи в аномальном понижении ОСО над Томском в апреле 2011 г. // Оптика атмосферы и океана. 2015. Т. 28, № 12. С. 1090-1094.
23. Зуев В.В., Зуева Н.Е., Савельева Е.С. Специфика формирования антарктической и арктической озоновых аномалий // Оптика атмосферы и океана. 2014. Т. 27, № 5. С. 407-412.
24. Зуев В.В., Зуева Н.Е., Савельева Е.С. Температурные и озоновые аномалии как индикаторы вулканогенной сажи в стратосфере // Оптика атмосферы и океана. 2014. Т. 27, № 8. С. 698-704.
25. Иванова А.Р. Стратосферно-тропосферный обмен и его некоторые особенности во внетропических широтах // Метеорология и гидрология. 2016. № 3. С. 22-45.
26. Израэль Ю.А., Белокриницкая Л.М., Дворецкая И.В. и др. Сравнение наземных и спутниковых измерений общего содержания озона // Метеорология и гидрология. 2014. № 6. С. 85-98.
27. Ионов Д.В., Тимофеев Ю.М., Поберовский А.В. Спектроскопические измерения содержания O_3 и NO_2 в атмосфере: коррекция наземного метода и результаты сопоставления с данными спутниковых измерений // Оптика атмосферы и океана. 2015. Т. 28, № 8. С. 704–710.
28. Кашкин В.Б., Рублева Т.В., Хлебопрос Р.Г. Стратосферный озон: вид с космической орбиты. Красноярск: Изд-во СФУ, 2015. 182 с.
29. Кашкин В.Б., Романов А.А., Рублева Т.В. Тренды общего содержания озона в 2005–2015 гг. по данным дистанционного зондирования // Оптика атмосферы и океана. 2016. Т. 29, № 9. С. 752-757.
30. Кашкин В.Б., Рублева Т.В. Зональное движение масс озона в нижней стратосфере по спутниковым данным // Оптика атмосферы и океана. 2014. Т. 27, № 9. С. 826-832.
31. Киселев А.А., Кароль И.Л. Как проживаешь, Антарктическая озоновая дыра? // Природа. 2016. № 10. С. 3-8.
32. Коришунов В.А., Зубачев Д.С. Наблюдение полярных стратосферных облаков над г. Обнинск в декабре 2012 г. // Метеорология и гидрология. 2014. № 4. С. 49-54.
33. Кочеткова О.С., Мордвинов В.И., Руднева М.А. Анализ факторов, влияющих на возникновение стратосферных потеплений // Оптика атмосферы и океана. 2014. Т. 27, № 8. С. 719-727.
34. Кривоулицкий А.А., Вьюшкова Т.Ю., Черепанова Л.А. и др. Трехмерная глобальная фотохимическая модель CHARM. Учет вклада солнечной активности // Геомагнетизм и аэрономия. 2015. Т. 55, № 1. С. 64-93.

35. *Криволуцкий А.А., Черепанова Л.А., Вьюшкова Т.Ю. и др.* Трехмерная глобальная численная фотохимическая модель CHARM-I. Учет процессов в области D ионосферы // Геоматематизм и аэрономия. 2015. Т. 55, № 4. С. 483-503.
36. *Криволуцкий А.А., Черепанова Л.А., Дементьева А.В. и др.* Глобальная циркуляция атмосферы Земли на высотах от 0 до 135 км, рассчитанная с помощью модели ARM. Учет вклада солнечной активности // Геоматематизм и аэрономия. 2015. Т. 55, № 6. С. 808-828.
37. *Ларин И.К.* О восстановлении озонового слоя в Северном полушарии в XXI веке // Химическая физика. 2015. Т. 34, № 1. С. 80-86.
38. *Ларин И.К., Алоян А.Е., Ермаков А.Н.* Хлорная активация нижней стратосферы в средних широтах: влияние на озоновый слой // Химическая физика. 2016. Т. 35, № 9. С. 76-80.
39. *Макарова М.В., Кирнер О., Тимофеев Ю.М. и др.* Анализ изменчивости атмосферного метана вблизи Санкт-Петербурга по данным наземных измерений и моделирования // Известия РАН. ФАО. 2015. Т. 51, № 2. С. 201-209.
40. *Макарова М.В., Кирнер О., Тимофеев Ю.М. и др.* Годовой ход и долговременный тренд содержания атмосферного метана в районе Санкт-Петербурга // Известия РАН. ФАО. 2015. Т. 51, № 4. С. 493-501.
41. *Маричев В.Н.* Комбинированный метод оптического зондирования нижней и средней атмосферы // Оптика атмосферы и океана. 2016. Т. 29, № 3. С. 210-215.
42. *Маричев В.Н., Матвиенко Г.Г., Лисенко А.А. и др.* Микроволновые и оптические наблюдения озона и температуры средней атмосферы во время стратосферного потепления в Западной Сибири // Оптика атмосферы и океана. 2014. Т. 27, № 1. С. 46-52.
43. *Михайленко С.Н.* Исследования инфракрасных спектров поглощения молекулы озона с 2000 по 2015 г. // Оптика атмосферы и океана. 2015. Т. 28, № 7. С. 587-606.
44. *Невзоров А.А., Бурлаков В.Д., Долгий С.И. и др.* Сравнение лидарных и спутниковых измерений вертикальных профилей озона по данным 2015 г. // Оптика атмосферы и океана. 2016. Т. 29, № 8. С. 703-708.
45. *Никифорова М.П., Варгин П.Н., Звягинцев А.М. и др.* Озоновая «мини-дыра» над севером Урала и Сибири // Труды Гидрометцентра России. 2016. № 360. С. 168-180.
46. *Никифорова М.П., Звягинцев А.М., Варгин П.Н. и др.* 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.
47. *Позорельцев А.И., Савенкова Е.Н., Перцев Н.Н.* Внезапные стратосферные потепления: Роль нормальных атмосферных мод // Геоматематизм и аэрономия. 2014. Т. 54, № 3. С. 387-403.
48. *Поляков А.В., Тимофеев Ю.М., Виролайнен Я.А. и др.* Наземные измерения общего содержания HF в стратосфере вблизи Санкт-Петербурга (2009–2013 гг.) // Известия РАН. ФАО. 2014. Т. 50, № 6. С. 675-682.
49. *Рыскин В.Г., Орозобаков А.Т.* Микроволновые наземные измерения суточных вариаций озона в верхней стратосфере над Киргизией // Известия РАН. ФАО. 2015. Т. 51, № 1. С. 88-95.
50. *Ситнов С.А., Мохов И.И.* Особенности поля общего содержания озона при атмосферном блокировании над европейской территорией России летом 2010 г. (по спутниковым данным) // Метеорология и гидрология. 2016. № 1. С. 41-52.
51. *Ситнов С.А., Мохов И.И.* Формирование озоновой «мини-дыры» в условиях продолжительного блокирующего антициклона в атмосфере над Европейской территорией России летом 2010 года // ДАН. 2015. Т. 460. С. 74-78.
52. *Смышляев С.П., Виролайнен Я.А., Моцаков М.А. и др.* Межгодовые и сезонные вариации интегрального содержания озона в разных высотных слоях вблизи Санкт-Петербурга по данным наблюдений и численного моделирования // Известия РАН. ФАО. 2017. Т. 53 (в печати).
53. *Смышляев С.П., Галин В.Я., Блакитная П.А. и др.* Исследование чувствительности состава и температуры стратосферы к вызванной 11-летним циклом

солнечной активности изменчивости спектральных потоков солнечной радиации // Известия РАН. ФАО. 2016. Т. 52, № 1. С. 19-36.

54. *Смышляев С.П., Погорельцев А.И., Галин В.Я. и др.* Влияние волновой активности на газовый состав стратосферы полярных районов // Геомagnetизм и аэрoномия. 2016. Т. 56, № 1. С. 102-116.

55. *Соломонов С.В., Кропоткина Е.П., Розанов С.Б. и др.* Особенности межгодовых изменений озона в средней стратосфере над Москвой по наблюдениям на миллиметровых волнах // Кр. сообщения по физике ФИАН. 2016. № 2. С. 3-11.

56. *Тимофеев Ю.М., Поляков А.В., Поберовский А.В.* Рост содержания хлорводорода в атмосфере Северного полушария прекращается // ДАН, 2016. Т. 470, № 3. С. 344-346.

57. *Тимофеев Ю.М., Виролайнен Я.А., Смышляев С.П. и др.* Озон над Санкт-Петербургом: сопоставление экспериментальных и модельных данных // Оптика атмосферы и океана. 2017. Т. 30, № 1. С. 20-26.

58. *Чубарова Н.Е., Жданова Е.Ю., Хаттатов В.У. и др.* Актуальные проблемы изучения ультрафиолетовой радиации и озонового слоя // Вестник РАН. 2016. Т. 86, № 9. С. 839-846.

59. *Чубарова Н.Е., Незваль Е.И., Беликов И.Б. и др.* Климатические и экологические характеристики московского мегаполиса за 60 лет по данным Метеорологической обсерватории МГУ // Метеорология и гидрология. 2014. № 9. С. 49-64.

60. *Шур Г.Н., Волков В.В., Ситников Н.М. и др.* Мезомасштабная структура неоднородностей в стратосфере высоких широт в периоды эволюции циркумполярного вихря по материалам самолетных экспериментов // Известия РАН. ФАО. 2014. Т. 50, № 2. С. 197-204.

61. *Bazhenov O.E.* Quasi-biennial oscillation of the total ozone and ozone concentrations at separate altitude levels over Arctic and Tomsk according to TOMS, OMI, and MLS observations // Int. J. Rem. Sensing. 2015. Vol. 36. P. 3033-3040.

62. *Bazhenov O.E., Burlakov V.D., Dolgii S.I. et al.* Optical monitoring of character-

istics of the stratospheric aerosol layer and total ozone content at the Siberian Lidar Station (Tomsk: 56° 30' N; 85° E) // Int. J. Remote Sensing. 2015. Vol. 36. P. 3024-3032.

63. *Belikov Yu., Nikolayshvili S.* The role of the dipole interaction of molecules with charged particles in the polar stratosphere // J. Earth Science and Engineering. 2016. Vol. 6. P. 115-149. DOI: 10.17265/2159-581X/2016.03.001.

64. *Chubarova N., Zhdanova Y., Nezval Y.* A new parameterization of the UV irradiance altitude dependence for clear-sky conditions and its application in the on-line UV tool over Northern Eurasia // Atmos. Chem. Phys. 2016. Vol. 16. P. 11867-11881.

65. *Dorokhov V., Tsvetkova N., Yushkov V. et al.* Ozone monitoring in Salekhard and Tomsk, Western Siberia // Int. J. Remote Sensing. 2014. Vol. 35, No.15. P. 5598-5608.

66. *Dorokhov V., Yushkov V., Makshtas A. et al.* Brewer, SAOZ and ozonesonde observations in Siberia // Atmosphere-Ocean. 2015. Vol. 53, No. 1. P. 14-18.

67. *Gavrilov N.M., Makarova M.V., Pobеровskii A.V. et al.* Comparisons of CH4 ground-based FTIR measurements near Saint-Petersburg with GOSAT observations // Atmos. Meas. Techn. 2014. Vol. 7. P. 1003-1010. DOI: 10.5194/amt-7-1003-2014.

68. *Gavrilov N.M., Makarova M.V., Timofeyev Yu.M. et al.* Comparisons of satellite (GOSAT) and ground-based spectroscopic measurements of CH4 content near Saint Petersburg: influence of data collocation // Int. J. Rem. Sensing. 2014. Vol. 35, No. 15. P. 5628-5636.

69. *Kostsov V.S., Timofeyev Yu.M., Zaitsev N.A. et al.* Application of the information approach to the analysis of two-year microwave observations of the atmosphere by the RPG-HATPRO radiometer at St. Petersburg University // Int. J. Rem. Sensing. 2016. Vol. 37, No. 14. P. 3346-3364.

70. *Makarova M.V., Gavrilov N.M., Timofeyev Yu.M. et al.* Comparisons of Satellite (GOSAT) and Ground-Based Fourier Spectroscopic Measurements of Methane Content near St. Petersburg // Izvestiya. Atm. Ocean. Phys. 2014. Vol. 50, No. 9. P. 904-909.

71. *Pastel M., Ionov D. et al.* Construction of merged satellite total O₃ and NO₂ time series in the tropics for trend studies and evaluation by comparison to NDACC SAOZ measurements // *Atmos. Meas. Tech.* 2014. Vol. 7. P. 3337-3354.

72. *Peters D., Vargin P.* Impact of extratropical Rossby wave trains on planetary wave activity in the polar southern lower stratosphere in September 2002 // *Tellus A.* 2015. Vol. 67. P. 25875.

73. *Timofeyev Yu., Virolainen Ya., Makarova M. et al.* Ground-based spectroscopic measurements of atmospheric gas

composition near Saint Petersburg (Russia) // *J. Mol. Spectr.* 2016. Vol. 323. P. 2-14.

74. *Virolainen Y., Timofeyev Y., Polyakov A. et al.* Intercomparison of satellite and ground-based measurements of ozone, NO₂, HF, and HCl near Saint Petersburg, Russia // *Int. J. Rem. Sensing.* 2014. V. 35, No. 15. P. 5677-5697.

75. *Zuev V.V., Zueva N.E., Savelieva E.S., Gerasimov V.V.* The Antarctic ozone depletion caused by Erebus volcano gas emissions // *Atmos. Environ.* 2015. Vol. 122. P. 393-399.

SUMMARIES

Russian studies of ozone layer in 2014-2016 / Zvyagintsev A.M., Vargin P.N. // *Proceedings of the Hydrometcentre of Russia.* 2017. Vol. 365. P. 101-117.

A review of observations and investigations of the ozone layer which were performed in the Russian institutions of Roshydromet, Russian Academy of Sciences and Ministry of Science and Education and Science of the Russian Federation in 2014–2016 is presented. Review based on Russian National Report on monitoring and research of ozone layer that was presented to World meteorological organization in January 2017. The main present-day tendencies of ozone studies in the world and the state of such studies in Russia are described. Some immediate measures for activation of these studies are proposed.

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