

УДК 551.510.534:001.89:378.6РГГМУ

## 50 ЛЕТ ИССЛЕДОВАНИЙ АТМОСФЕРНОГО ОЗОНА В ЛГМИ — РГГМУ

*В.В. Осечкин, С.П. Смышляев*

Российский государственный гидрометеорологический университет, smyshl@rshu.ru

Описываются многолетние исследования атмосферного озона в Ленинградском гидрометеорологическом институте и Российском государственном гидрометеорологическом университете — с середины 60-х годов XX века до настоящего времени. Анализируются результаты измерений содержания озона в нижней и средней атмосфере и теоретического моделирования физических и химических процессов, определяющих его изменчивость.

*Ключевые слова:* атмосферный озон, 50 лет, наземные и самолетные измерения, численное моделирование, анализ спутниковых измерений.

## FIFTY YEARS OF ATMOSPHERIC OZONE STUDIES AT LGMI AND RSHU

*V.V. Osechkin, S.P. Smyshlyaev*

Russian State Hydrometeorological University

Long-term studies of atmospheric ozone at the Leningrad Hydrometeorological Institute and the Russian State Hydrometeorological University have been described since the mid-1960s to the present. The results of measurements of ozone content in the lower and middle atmosphere and theoretical modeling of physical and chemical processes that determine its variability are analyzed.

*Keywords:* atmospheric ozone, 50 years, ground and aircraft measurements, numerical modeling, satellite measurements analysis.

### Введение

Озон, являющийся малой газовой примесью в атмосфере, поглощает опасные ультрафиолетовые лучи и защищает все живое на Земле от губительной части излучения Солнца [1, 15]. Наибольшая плотность озона наблюдается на высоте около 20—25 км, наибольшая часть в общем объеме — на высоте 40 км [16]. Химические свойства озона обуславливают его сильные окислительные свойства, поэтому в тропосфере озон — загрязнитель воздуха, оказывающий токсичное влияние на здоровье человека и экосистемы [17]. При обычной температуре озон окисляет все металлы за исключением золота и металлов платиновой группы. Контроль содержания приземного озона осуществляется с целью не допустить увеличения его содержания, поскольку это может привести к ухудшению качества воздуха [18].

Почти столетняя история исследований озонового слоя Земли включает два основных направления: мониторинг его стратосферного и тропосферного содержания путем осуществления дистанционных и контактных измерений, а также теоретические исследования процессов, влияющих на образование и разрушение озона. Мониторинг содержания озона должен осуществляться с хорошим

пространственным и временным разрешением с целью точного понимания изменений в озоновом слое планеты и их влияния на уровень ультрафиолетовой радиации, качество воздуха и климат. Теоретические исследования изменчивости содержания атмосферного озона проводятся, главным образом, путем создания численных моделей, описывающих физические и химические процессы в тропосфере и стратосфере.

В настоящей работе приводится обзор экспериментальных и теоретических исследований атмосферного озона, выполнявшихся в течение последних 50 лет в Ленинградском гидрометеорологическом институте (ЛГМИ) и Российском государственном гидрометеорологическом университете (РГГМУ).

### **Исследования озонового слоя в ЛГМИ**

Теоретические и экспериментальные изучения озонового слоя Земли проводятся во многих зарубежных и российских организациях, специализирующихся на науках о Земле. К систематическим исследованиям атмосферного озона в Ленинградском гидрометеорологическом институте (ЛГМИ) приступили во второй половине 60-х годов XX века по инициативе и под руководством профессора Сергея Васильевича Солонина. Это была небольшая группа молодых энтузиастов, которой представилась возможность реализовать свои творческие планы во вновь созданном Научно-исследовательском институте авиационной метеорологии при ЛГМИ (далее НИИАМ), основанным также С.В. Солониным. В 1972 г. по инициативе С.В. Солонина была организована кафедра космических и авиационных исследований в гидрометеорологии (КАМИ). Хотя основные научные направления по-прежнему разрабатывались в НИИАМ, его административная роль стала значительно ослабевать.

Исследования содержания озона в атмосфере, проводимые в ЛГМИ, вначале носили ярко выраженную авиационную направленность. В связи с токсичными свойствами озона перед коллективом НИИАМ была поставлена задача оценки степени «озоновой опасности» для экипажей и пассажиров дозвуковых и сверхзвуковых транспортных реактивных самолетов (ТРС). В порядке реализации этой задачи Н.Н. Виноградовой в 1965—1970 гг. была проведена большая работа по сбору и статистической обработке данных об общем содержании озона и его вертикальном распределении по всем озонметрическим станциям Северного полушария. Она исследовала связь стратосферных потеплений с вертикальным распределением озона. Ею также были рассчитаны и проанализированы корреляционные связи между общим содержанием озона и его вертикальным распределением, а полученные результаты она использовала для построения карт концентрации озона на изобарических поверхностях 100, 50 и 30 гПа. Совместно с Г.П. Гушиным Н.Н. Виноградова исследовала аэросиноптические условия пространственного распределения общего содержания озона в струйных течениях с искривленными осями.

С 1971 г. в институте приступили к периодическим измерениям концентрации озона в кабинах транспортных самолетов, т.е. представилась возможность

практически оценить степень озоновой опасности, ради чего и были начаты в ЛГМИ исследования содержания озона в атмосфере. Первые летные эксперименты осуществлялись на самолетах Академии гражданской авиации (руководитель программы профессор Павел Дмитриевич Астапенко, исполнители В.В. Осечкин и В.С. Волкова). Начиная с 1972 г. измерения озона стали проводились на самолетах ГосНИИГА и на рейсовых самолетах Аэрофлота (руководители программы С.В. Солонин (от ЛГМИ) и И.А. Медведков (от ГосНИИГА); исполнители В.В. Осечкин, А.Ю. Баскин и В.И. Павлов) [8].

В 1972 г. сотрудники ЛГМИ были приглашены в экспедицию по наблюдению полного солнечного затмения, организованную Академией наук СССР. Во время экспедиции был выполнен очень важный эксперимент: произведены параллельные измерения концентрации озона в гермокабине и грузовом отсеке транспортного самолета Ан-12 на воздушной трассе Анадырь — Уэллен — Анадырь (В.В. Осечкин, В. С. Волкова). Эксперимент обнаружил отсутствие термического распада озона в компрессорах авиадвигателей и системе кондиционирования воздуха. Теоретическое обоснование этого эффекта было получено В.В. Осечкиным в 1974 г.

В 1977 г. впервые в СССР измерения концентрации озона были осуществлены на сверхзвуковом транспортном пассажирском самолете Ту-144 на воздушных трассах Москва — Алма-Ата — Москва и Москва — Актюбинск — Москва на высотах стратосферы (руководитель программы заслуженный летчик-испытатель СССР Эдуард Ваганович Елян, исполнитель В. В. Осечкин). С 1971 по 1980 г. в общей сложности было выполнено 162 исследовательских полета на отечественных транспортных самолетах практически всех типов.

Основные результаты исследований озона в НИИАМ заключались в следующем [9].

1. Изучены аэросиноптические условия наблюдения высоких значений концентрации озона в гермокабинах ТРС на воздушных трассах Аэрофлота в полярных, умеренных и южных широтах СССР. Разработаны соответствующие рекомендации в отношении условий полетов ТРС для ГосНИИГА.

2. Теоретически и экспериментально решен вопрос озоновой безопасности экипажа и пассажиров сверхзвуковых транспортных самолетов.

3. Изучены закономерности пространственно-временной структуры вертикального и горизонтального распределения озона в тропосфере и нижней стратосфере. Проведена типизация вертикальных и горизонтальных профилей концентрации озона в связи с аэросиноптическими условиями (В.В. Осечкин, Л.А. Куликова, Т.М. Соболева, Л.А. Усенкова).

4. Исследованы связи вертикальных движений в атмосфере, потенциального вихря скорости с горизонтальным распределением озона в тропосфере и нижней стратосфере по данным измерений на рейсовых самолетах (Л.И. Толстоброва).

5. Разработана методика измерения концентрации озона применительно к условиям работы экспериментатора на борту рейсового самолета. Внедрены химический (В.В. Осечкин, В.С. Волкова, 1971 г.) и два автоматических метода измерения концентрации озона: электрохимический (В.В. Осечкин, В.Г. Самойлович,

В.Г. Кашко, Г.И. Карпук, 1972 г.) и хемилюминесцентный (ХЛ). Самолетный электрохимический озонметр был сконструирован на базе кулонометрической ячейки газоанализатора «Атмосфера-2». Измерения озона ХЛ методом осуществлялись приборами с чувствительными элементами на отечественном родамине (В.В. Осечкин, Л.Д. Прибытков, М.Т. Дмитриев, 1976 г.). ХЛ озонметр на родаминовом хемилуминофоре успешно использовался также для исследований междусуточной изменчивости концентрации озона в горах Памиро-Алая (А.К. Суслов, 1974 г.).

Внезапная, преждевременная кончина С.В. Солониной в 1978 г. не только существенно сузила размах деятельности НИИАМ, но и роковым образом сказала на его судьбе. В 1980 г. НИИАМ как структурная научно-исследовательская единица был упразднен. Работы по исследованию атмосферного озона начали постепенно свертываться. В 1978—1983 гг. НИИАМ — КАМИ принимал участие в межведомственной программе «Оценка влияния деятельности человека на климат». По этой программе проводились исследования воздействия самолетных выбросов на химический состав атмосферы. В частности, путем численного моделирования фотохимических процессов была решена задача о локальном образовании «озоновой дыры» за двигателем летящего самолета (В.В. Осечкин). Этой работой завершился цикл исследований атмосферного озона в коллективе, созданном профессором С.В. Солониным.

Начиная с 1986 г. исследования озона осуществлялись некоторыми сотрудниками прежнего коллектива, но уже в рамках других подразделений ЛГМИ и по другим научным направлениям. На кафедре общей метеорологии работы по исследованию озонового слоя проводились под руководством профессора Виталия Георгиевича Морачевского. Кроме того, в 1967 г. на кафедре была создана научно-исследовательская лаборатория, которую можно смело назвать лабораторией оптики атмосферы. Возглавил ее известный экспериментатор и изобретатель, оставивший свой след во многих областях физики атмосферы, Арнольд Николаевич Отто.

В недавнем прошлом сподвижник Павла Николаевича Тверского и Сергея Федоровича Родионова А.Н. Отто за сравнительно короткий срок сумел сплотить вокруг себя дружный творческий коллектив исследователей, таких как А.П. Афанасьева, Е.Г. Головина, Т.Д. Жуковская, М.М. Коханович, Ю.И. Марченко и др. Непосредственно к работам по озоновой тематике группа А.Н. Отто приступила в 1973 г. Исследования в области атмосферного озона были представлены разработкой специальной аппаратуры для измерения общего содержания озона с метеорологических спутников Земли, микроволновыми спектральными исследованиями атмосферы, работами по усовершенствованию сетевого фильтрового озонметра М-83, автоматизацией измерений общего содержания озона. Сотрудники группы А. Н. Отто не только успешно работали в лаборатории, но и участвовали во многих экспедициях (Эстония, Казахстан, Камчатка и др.).

С приходом на кафедру общей метеорологии В.А. Баженова (1979 г.) постепенно начала формироваться еще одна озонметрическая группа: Е.Л. Мikuшинская, Е.Г. Головина, Е.Г. Аронова, А.В. Шашкин и др. Под руководством В.А. Баженова был разработан новый способ определения общего содержания озона

на основе спектральных измерений, исключая влияние фоновой структуры спектра поглощения солнечной ультрафиолетовой радиации озонем на точность измерения. Сущность предложенного метода заключалась в проведении серии измерений озона не через равные промежутки времени, как это принято на мировой озонметрической сети, а через равные отрезки оптической воздушной массы. На этой основе на кафедре был сконструирован целый ряд автоматических озонметров для использования в научных исследованиях. Был выполнен также цикл работ по совершенствованию метеорологического обеспечения озонметрии и подготовлены соответствующие рекомендации для учреждений, использующих фильтровые озонметры.

Говоря о методических разработках в области озонметрических измерений, необходимо упомянуть о работах А.В. Шашкина (совместно с Л.А. Соколовой), сконструировавшего автоматический комплекс для измерения общего содержания озона и предложившего метод определения общего содержания озона по измерениям солнечной УФР в узком интервале длин волн (319,5—329,5 нм) широкополосными фильтровыми озонотрамами.

В 1982 г. на базе учебной практики ЛГМИ (пос. Даймище Ленинградской области) по инициативе и при непосредственном участии А.Н. Отто была построена озонметрическая обсерватория для обучения студентов основам озонметрии и проведения научных изысканий. Большой вклад в создание обсерватории внес В.В. Яковлев. Под руководством профессора В.Г. Морачевского в 1985—1989 гг. он выполнил несколько серий измерений общего содержания озона в различных морских экспедициях. В результате выполненных им судовых измерений была получена новейшая картина пространственно-временного распределения общего содержания озона над акваториями Атлантического и Тихого океанов.

На кафедре физики ЛГМИ к изучению атмосферного озона приступили в 1975 г. под руководством доцента Виталия Георгиевича Сироты. Определенный вклад в постановку некоторых работ внес профессор В.Г. Морачевский. Первые исследования по озоновой тематике на кафедре были посвящены исследованию проблем химической кинетики: изучению условий образования кислых аэрозолей в результате фотоокисления двуокиси серы озонем (В.Г. Сирота, Л.Г. Копьева, С.Н. Хворостовский). С появлением на кафедре талантливого ученого В.П. Челибанова эти работы значительно расширились. Вскоре указанной группе экспериментаторов удалось оценить сток озона в его реакции с триплетно-возбужденной молекулой  $\text{SO}_2$ . Полученные лабораторные данные о константе скорости упомянутой реакции впоследствии были использованы для численного моделирования процессов образования серноокислых вулканических аэрозолей в стратосфере (В.Г. Сирота, С.Н. Хворостовский).

Другое направление работ на кафедре физики было связано с лабораторным моделированием эффективности гибели озона на твердотельных аэрозолях (преимущественно на окислах металлов). Эти исследования показали, что скорость фотокаталитического распада озона сравнима со скоростью темного аэрозольного стока в условиях, близких к стратосферным (В.Г. Сирота, А.Л. Скобликова). Немало было сделано на кафедре физики и непосредственно в области озонметрии.

Этим работам предшествовали многочисленные лабораторные эксперименты по исследованию механизмов окисления хемиллюминофоров (на родеминовой основе, пропитанной галловой кислотой) под воздействием озоноздушных и озонкислородных смесей. Наряду с этим был изучен спектр свечения галловой кислоты (В.П. Челибанов, С.Г. Лебедев). В результате лабораторных исследований были изучены новые хемиллюминесцентные (ХЛ) композиции, которые широко использовались в качестве чувствительных элементов ХЛ озонметров (В.Г. Сирота, В.Г. Челибанов, С.Г. Лебедев, М.А. Мамаев, И.К. Шургалина).

Фундаментальные исследования механизмов хемиллюминесценции и создание на их основе новых чувствительных элементов позволили перейти непосредственно к разработкам ХЛ озонметров. На кафедре была сконструирована целая серия ХЛМ озонметров различных модификаций (В.Г. Сирота, В.П. Челибанов, С.Г. Лебедев). Изготовленные ХЛ озонметры в 1989 г. прошли успешные испытания в советско-западногерманской экспедиции в море Уэдделла (Л.Н. Юрганов), в исследовательских рейсах учебно-экспедиционного судна «Профессор Сергей Дорофеев» (В.П. Челибанов, Ю.Н. Гуляев, А.В. Дикинис, 1988—1989 гг.), а также в полевых условиях при изучении вариаций приземной концентрации озона (Л.С. Ивлев). Некоторые модификации ХЛ озонметра использовались для исследования вертикального распределения концентрации озона на шарах-зондах. Еще одна конструктивная разработка, выполненная на кафедре физики, связана с созданием генератора озона, работа которого основана на фотолитическом принципе (С.И. Краско, С.Г. Лебедев, В.П. Челибанов).

В метеорологической лаборатории отдела «Система» (1986—1990 гг.) исследования озона проводились под руководством профессора К.В. Кондратовича. В отделе «Система» атмосферный озон изучался как связующее звено между изменениями климата и геомагнитным полем. По климатической программе отдела «Система» Е.Г. Аронова выполнила статистическую обработку результатов наблюдений общего содержания озона на мировой озонметрической сети за 1967—1987 гг. На основании обработанных данных Е.Г. Аронова вычислила климатические тренды общего содержания озона для различных регионов Северного полушария.

В связи с безвременной кончиной С.В. Солонина в 1978 г. авиационную направленность исследований атмосферного озона на кафедре КАМИ пришлось закрыть, однако исследования атмосферного озона на кафедре на этом не прекратились, но приобрели другое направление. Профессор кафедры КАМИ, которая с конца 1980-х годов стала называться кафедрой динамики атмосферы и космического землеведения (ДАКЗ), К.В. Кондратович рискнул открыть небольшую группу «озонщиков» под руководством В.В. Осечкина.

К.В. Кондратович поставил перед новоиспеченной группой сложную задачу — найти причину географической сопряженности климатических максимумов общего содержания озона и районов с повышенной геомагнитной напряженностью. Еще в начале 1960-х годов, изучая механизмы изменения климата, Кондратович заметил, что климатические максимумы общего содержания озона сосредоточены в районах мировых магнитных аномалий (ММА) с повышенной

геомагнитной напряженностью: на севере Якутии (в районе Таймыра), на севере Канады (в районе залива Гудзона) и в австралийском секторе Антарктиды. Для объяснения этого явления Кондратович выдвинул гипотезу, согласно которой повышенное содержание озона в районах ММА объясняется парамагнитным дрейфом молекулярного кислорода. Этой проблеме Кондратович дал общее название «атмосферный озон — геомагнитное поле — климат Земли». В такой форме и была поставлена задача, которая в силу ее исключительной сложности не решена до сих пор. Однако существенная часть проблемы, связанная с пространственно-временным распределением общего содержания и плотности в стратосфере, была решена. При этом изучение гипотезы Кондратовича на кафедре ДАКЗ постепенно переросло в многосторонние и многолетние исследования проблемы атмосферного озона вообще, и в частности с воздействием галактических космических лучей (ГКЛ) на озоносферу.

Совершенно новая тематика исследований потребовала более глубоких знаний современной физики. Для этого К.В. Кондратович стал привлекать различных специалистов, наиболее перспективным из которых оказался физик-теоретик из ЛГУ Евгений Владимирович Гниловский, подключившийся к изучению озона по рекомендации В.В. Осечкина. Научный дуэт Гниловский — Осечкин оказался успешным и просуществовал до 2014 г., до ухода Евгения Владимировича в мир иной.

Возвращаясь к научной составляющей гипотезы К.В. Кондратовича, можно отметить, что, к сожалению, расчеты, выполненные Е.В. Гниловским и В.В. Осечкиным, показали, что парамагнитный дрейф молекулярного кислорода совершенно ничтожен. Действительно, в рассматриваемых условиях тепловое движение в атмосфере настолько значительно, что на его фоне дрейфом молекулярного кислорода можно пренебречь. Тем не менее гипотеза Кондратовича послужила стимулом для продолжения поиска нефотохимического источника озонообразования в районах ММА.

Получив упомянутые результаты, В.В. Осечкин и Е.В. Гниловский решили перейти к поиску других нефотохимических источников. Выполненные ими исследования позволили выяснить, какими физическими механизмами нельзя объяснить повышенное содержание озона в полярных и субполярных районах в весеннее время — это воздействие электронных высыпаний на молекулярный кислород, тормозное рентгеновское излучение в результате электронных высыпаний и нуклон-ядерное взаимодействие космических лучей в озоносфере [10].

Снова получив отрицательные результаты в попытке объяснить повышенное содержание озона в полярных районах, Осечкин и Гниловский решили перейти к изучению роли галактических лучей (ГКЛ) в физике озоносферы. И такой механизм, объясняющий повышенное содержание озона в полярных районах весной, им удалось найти!

На основе рассмотрения противоречий фотохимической теории стратосферного озона была подробно исследована роль ГКЛ в дополнительном озонообразовании в стратосфере в полярных и субполярных широтах в весеннее время. Известно, что во время полярной ночи УФР излучение отсутствует. Также известно, что

зимой в полярных широтах в нижней стратосфере консервативность концентрации озона в зависимости от высоты составляет от 100 до 500 суток. При такой высокой консервативности содержание озона в полярной стратосфере должно было бы сохраниться до весны на осеннем уровне. В действительности же в период полярной ночи ежегодно наблюдается рост общего содержания озона от осени к весне, что показывает существование отличного от фотохимического источника озона.

В результате многолетних исследований В.В. Осечкин и Е.В. Гниловский пришли к выводу о том, что единственным нефотохимическим механизмом озонобразования в полярной стратосфере зимой является радиолитиз молекулярного кислорода галактическими космическими лучами (протонами ГКЛ). С учетом консервативности озона происходит его накопление в нижних слоях стратосферы, что и является причиной весеннего максимума общего содержания озона в полярной и субполярной областях. Это происходит из-за того, что процесс диссоциации молекулярного кислорода в полярной стратосфере в основном ограничивается высотой 8—18 км с максимальным поглощением в высотном слое 13—16 км, т.е. как раз на тех высотах, где в зимне-весенний период происходит формирование вторичного максимума в вертикальном распределении плотности озона. Этот механизм подробно описан в работе В.В. Осечкина и С.П. Смышляева, опубликованной в Докладах РАН. Именно вторичный максимум плотности озона, расположенный ниже основного максимума, и является ответственным за формирование весеннего максимума общего содержания озона в полярных и субполярных широтах.

Основные положения этой нетрадиционной феноменологически, но фундаментальной теории, разрешающей противоречие меридионального распределения общего содержания и плотности озона в стратосфере, заключаются в следующем [7].

1. Фотохимическая теория стратосферного озона достаточно точно объясняет образование озона в стратосфере в высотном слое 25—30 км и определяет его меридиональное распределение в соответствии с изменением высоты солнца с широтой.

2. Значения максимальной плотности озона в слое основного озонового максимума уменьшаются от экваториальных широт к полярной области в соответствии с уменьшением высоты солнца.

3. Чем больше высота солнца, тем активнее происходит процесс озонирования, так как доля озонобразующей радиации увеличивается.

4. Годовой ход общего содержания озона в экваториальных и субтропических широтах находит соответствие положениям фотохимической теории, т.е. максимум общего содержания озона наблюдается в летние месяцы.

5. Повышенное содержание озона в средних широтах можно рассматривать как промежуточное состояние между полярными и экваториальными широтами.

6. Фотохимическая теория не в состоянии объяснить рост общего содержания озона от экватора к полюсам. По-видимому, это обстоятельство связано с проявлением циркуляционных факторов, особенно активных на высотах менее 20—30 км, т.е. ниже максимума плотности озона.

7. Фотохимическая теория не может объяснить весенний максимум общего содержания озона в полярных и субполярных широтах. В этих регионах существенное влияние на баланс общего содержания озона оказывают ГКЛ, вызывающие дополнительное озonoобразование и формирующие вторичный максимум плотности озона на высоте 13—16 км. Независимые от фотохимии методы позволили получить оценки дополнительного озonoобразования, которые подтвердили данные наблюдений.

### **Численное моделирование изменчивости атмосферного озона**

Создание численных моделей озонового слоя началось в ЛГМИ на кафедре общей метеорологии в начале 80-х годов XX века по инициативе В.Г. Морачевского. По его инициативе сотрудники кафедры С.Г. Звенигородский и С.П. Смышляев стали разрабатывать одномерную фотохимическую модель тропосферы и стратосферы, учитывающую радиационные и химические процессы и вертикальный турбулентный обмен в атмосфере. Основной направленностью первых попыток численного моделирования озонового слоя в ЛГМИ было исследование влияния гетерогенных химических процессов на поверхности атмосферного аэрозоля на изменчивость содержания озона. Первая одномерная модель ЛГМИ включала изменчивость 40 малых газовых примесей атмосферы, взаимодействующих в 95 химических реакциях и 25 процессах фотодиссоциации. По результатам выполненных исследований С.Г. Звенигородским в 1983 г. была защищена диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук на тему «Аэрозольные эффекты в фотохимических моделях атмосферы».

Одномерная численная модель озоносферы пригодна для исследования чувствительности озонового слоя к различным фотохимическим факторам, однако не может быть использована для изучения временной эволюции содержания озона, в значительной степени определяемой динамическими факторами, в частности меридиональным переносом озона. В этой связи со второй половины 80-х годов XX века на кафедре общей метеорологии, а затем на кафедрах ДАКЗ и метеопрогнозов началась разработка двумерной глобальной фотохимической модели нижней и средней атмосферы. Для улучшения качества моделирования радиационных и динамических процессов к этой работе были привлечены выпускники физического факультета Ленинградского государственного университета В.А. Юдин и В.Л. Дворцов. Общее руководство работой осуществляли профессора К.В. Кондратович и Б.Д. Панин. В созданной двумерной модели ЛГМУ была сохранена фотохимическая схема из одномерной модели, но рассматривались и меридиональный, и вертикальный перенос атмосферной массы под воздействием средней зональной глобальной циркуляции.

Двумерная модель ЛГМИ — РГГМУ использовалась для исследования влияния промышленных выбросов фреонов и других хлорфторуглеродов на озоновый слой Земли, для изучения различных механизмов образования весенних озоновых аномалий в Антарктике и Арктике, для получения количественных оценок влияния гетерогенных процессов на поверхности атмосферного аэрозоля

на пространственно-временное распределение озона, получения численных оценок влияния на озоновый слой выбросов стратосферной авиации. По результатам проведенных исследований с двумерной фотохимической моделью озонового слоя Земли С.П. Смышляевым в 1993 г. была защищена диссертация на соискание ученой степени канд. физ.-мат. наук на тему «Численное моделирование влияния антропогенных факторов на атмосферный озон».

Начиная с середины 90-х годов XX века дальнейшее развитие численных моделей озонового слоя РГГМУ осуществлялось в тесном сотрудничестве с Университетом штата Нью-Йорк в Стони Брук. Основным направлением развития двумерной фотохимической модели было ее объединение с трехмерной моделью общей циркуляции атмосферы для использования в двумерной фотохимической модели рассчитанных в трехмерной модели полей ветра, температуры и влажности воздуха. Обновленная двумерная модель озонового слоя, учитывающая влияние незональных вариаций метеорологических параметров, получила международное название SUNY-SPB и принимала участие в широком круге проводимых в то время исследований влияния выбросов самолетов на озоновый слой. Кроме того, модель SUNY-SPB принимала участие в проводимых Всемирной метеорологической организацией (ВМО) оценках влияния антропогенных факторов на озоновый слой с выработкой стратегии политических рекомендаций, направленных на уменьшение опасности сокращения озонового слоя Земли. По результатам проводимых в конце 1990-х — начале 2000-х годов исследований с участием сотрудников РГГМУ были опубликованы статьи в журналах *Journal of Geophysical Research*, *Journal of Atmospheric Sciences*, *Geophysical Research Letters*, *Annales of Geophysicae* и др., а в 2003 г. С.П. Смышляевым была защищена диссертация на соискание ученой степени д-ра физ.-мат. наук на тему «Теоретическое исследование естественных и антропогенных воздействий на долгопериодную изменчивость атмосферного озона».

С начала 2000-х годов развитие численного моделирования озонового слоя в РГГМУ осуществлялось в направлении создания глобальной трехмерной химико-климатической модели (ХКМ), объединяющей в едином программном решении модели общей циркуляции (МОЦА) и газового состава (МГС) атмосферы. Создание ХКМ осуществлялось в сотрудничестве РГГМУ и института вычислительной математики Российской академии наук (ИВМ РАН). Особенностью ХКМ является оперативный обмен данными о содержании озона и других газов, рассчитываемыми в МГС, и данными о полях ветра, давления, температуры и влажности воздуха, рассчитываемыми в МОЦА. Использование ХКМ позволяет учитывать обратные связи между радиационными, химическими и динамическими процессами в атмосфере, определяющими ее состав и структуру. По результатам первых экспериментов с ХКМ П.А. Зименко в 2007 г. защитила диссертацию на соискание ученой степени канд. физ.-мат. наук на тему «Модельное исследование влияния солнечной активности на газовый состав и тепловой режим атмосферы».

Со второй половины 2000-х годов одним из основных направлений численного моделирования изменчивости озонового слоя Земли стало изучение влияния

изменений климата на содержание озона и других малых газовых составляющих атмосферы с акцентом на изменение озона в полярных районах. Среди последствий изменений климата главное внимание обращалось на влияние охлаждения стратосферы на процессы формирования полярных стратосферных облаков и разрушение озона в результате гетерогенных реакций на их поверхности, на изменчивость динамического воздействия на озоновый слой, связанного с сезонными неоднородностями и устойчивостью циркумполярного вихря, и на обмен теплом и массой между океаном и атмосферой. По результатам исследований по одному из этих направлений в 2010 г. М.А. Моцаковым была защищена диссертация на соискание ученой степени канд. физ.-мат. наук на тему «Модельное исследование влияния сезонных неоднородностей концентрации озона на газовый состав и тепловой режим атмосферы».

В последнее время значительное внимание в РГГМУ уделяется одновременному использованию результатов численного моделирования и данных наземных и спутниковых измерений для анализа изменчивости озонового слоя Земли. Для этого используется методика модельной ассимиляции данных спутниковых и наземных измерений содержания озона и метеорологических параметров, что позволяет на каждом шаге в режиме реального времени сравнивать результаты измерений и численного моделирования и анализировать причины наблюдаемых изменений содержания озона в атмосфере Земли. По результатам ассимиляции результатов спутниковых наблюдений Г. Шаарийбу в 2010 г. была защищена диссертация на соискание ученой степени канд. физ.-мат. наук на тему «Ассимиляция спутниковых данных при численном моделировании озонового слоя».

### Заключение

Начавшиеся 50 лет тому назад в ЛГМИ и продолжающиеся в РГГМУ исследования озонового слоя Земли поставили ЛГМИ — РГГМУ в ряд ведущих в СССР и России центров по исследованию озона. Результаты рассмотренных выше и других исследований озонового цикла опубликованы в многочисленных изданиях, в том числе в журналах «Известия РАН. Физика атмосферы и океана», «Метеорология и гидрология», «Доклады РАН», «Геомагнетизм и аэрономия», *Journal of Geophysical Research*, *Journal of Atmospheric Sciences*, *Geophysical Research Letters*, *Annales of Geophysic* и др. В конце 80-х и начале 90-х годов в издательстве ЛГМИ были выпущены два сборника статей «Атмосферный озон». В целом, по различным проблемам атмосферного озона за последние 50 лет специалистами ЛГМИ — РГГМУ опубликовано более 200 научных работ; результаты многих исследований обсуждались на всесоюзных и международных конференциях и симпозиумах. Свообразным рупором исследований атмосферного озона в РГГМУ в последние годы стали «Ученые записки РГГМУ», в 50 выпусках которых было опубликовано несколько десятков статей, посвященных этой тематике, наиболее значимые из которых представлены в [2—14].

В последнее время исследование озонового слоя в РГГМУ нацелены, главным образом, на изучение особенностей изменения содержания озона в полярных

районах и проводятся в рамках научных проектов, поддерживаемых Министерством образования и науки Российской Федерации (проект 5.6493.2017/БЧ в рамках госзадания), Российским фондом фундаментальных исследований (проект РФФИ 17-05 01277-а) и Российским научным фондом (проект РНФ 14-17-00096).

### Список литературы

1. Александров Э.Л., Израэль Ю.А., Кароль И.Л., Хргиан А.Х. Озонный щит Земли и его изменения. СПб: Гидрометеиздат, 1992. 288 с.
2. Блаkitная П.А., Смышляев С.П., Атласкин Е.М., Шаарийбуу Г. Модельное исследование влияния солнечной активности на газовый состав и тепловой режим атмосферы // Ученые записки РГГМУ. 2010. № 12. С. 25—36.
3. Гниловской Е.В., Осечкин В.В. О поглощении солнечной радиации в отдельных теллурических линиях в желто-красной области спектра в нижней атмосфере // Ученые записки РГГМУ. 2006. № 2. С. 7—9.
4. Лемещенко А.К., Смышляев С.П. Моделирование влияния солнечной активности на межгодовую изменчивость содержания озона и температуры атмосферы // Ученые записки РГГМУ. 2015. № 39. С. 49—54.
5. Моцаков М.А., Смышляев С.П. Параметризация фотохимии озона для использования в моделях общей циркуляции атмосферы // Ученые записки РГГМУ. 2009. № 9. С. 80—85.
6. Осечкин В.В., Гниловской Е.В., Потемкин В.Е. Опыт математической формализации некоторых уравнений атмосферной химии (озонового цикла) на основе теории вольтерра // Ученые записки РГГМУ. 2009. № 9. С. 66—69.
7. Осечкин В.В., Гниловской Е.В., Смышляев С.П. Что может и что не может объяснить фотохимическая теория стратосферного озона. Подводя итоги // Ученые записки РГГМУ. 2012. № 23. С. 67—77.
8. Осечкин В.В., Смирнов С.С. Еще раз о меридиональном распределении общего содержания и плотности озона в стратосфере Арктики // Ученые записки РГГМУ. 2016. № 42. С. 148—154.
9. Погорельцев А.И., Суворова Е.В., Федулina И.Н., Ханна Эдвард Трехмерная климатическая модель распределения озона в средней атмосфере // Ученые записки РГГМУ. 2009. № 10. С. 43—52.
10. Смышляев С.П., Галин В.Я., Моцаков М.А., Суходолов Т.В., Хорева Е.И. Модельное исследование одновременных изменений содержания озона и температуры стратосферы // Ученые записки РГГМУ. 2011. № 22. С. 149—156.
11. Смышляев С.П., Погорельцев А.И., Дробашевская Е.А., Канухина А.Ю. Влияние динамических факторов на озоновые аномалии в Арктике // Ученые записки РГГМУ. 2015. № 41. С. 136—148.
12. Смышляев С.П., Галин В.Я. Исследование влияния изменений стратосферного озона на химию тропосферы // Ученые записки РГГМУ. 2016. № 44. С. 165—179.
13. Суворова Е.В., Дробашевская Е.А., Погорельцев А.И. Климатическая модель трехмерных распределений озона по данным реанализа MERRA // Ученые записки РГГМУ. 2016. № 49. С. 58—72.
14. Суходолов Т.В., Блаkitная П.А., Боровская О.П., Смышляев С.П. Модельное исследование одновременных изменений содержания озона и температуры стратосферы // Ученые записки РГГМУ. 2011. № 22. С. 90—103.
15. Хргиан А.Х. Физика атмосферного озона. Л.: Гидрометеиздат, 1973. 296 с.
16. WMO (World Meteorological Organization), Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2010, Global Ozone Research and Monitoring Project. Report No. 52. Geneva, Switzerland, 2011. 516 p.
17. WMO (World Meteorological Organization), Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2006, Global Ozone Research and Monitoring Project. Report No. 50. Geneva, Switzerland, 2007. 572 p.
18. WMO (World Meteorological Organization), Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2002, Global Ozone Research and Monitoring Project. Report No. 47. Geneva, Switzerland, 2003. 498 p.