

УДК 551.510.5

РЕЗУЛЬТАТЫ РОССИЙСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ СРЕДНЕЙ АТМОСФЕРЫ В 2015–2018 гг.

© 2019 г. А. А. Криволюцкий^{1*}, А. И. Репнев¹, И. А. Миронова²,
А. Н. Груздев³, Т. И. Тунияц¹

¹Центральная аэрологическая обсерватория Росгидромета
141700, Долгопрудный Моск. обл., Первомайская ул., 3

²Санкт-Петербургский Государственный Университет
198504, Санкт-Петербург, Петергоф, Ульяновская ул., 3

³Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН
119017, Москва, Пыжевский пер., 3

E-mail: *alexei.krivolutsky@rambler.ru

Поступила в редакцию 11.07.2019 г.

Принята к печати 07.08.2019 г.

Представлен обзор результатов российских исследований средней атмосферы в 2015–2018 гг., подготовленный Комиссией по средней атмосфере Секции метеорологии и атмосферных наук Национального геофизического комитета для Национального отчета по метеорологии и атмосферным наукам к XXVII Генеральной ассамблее Международного союза геодезии и геофизики (Канада, 2019)*.

Ключевые слова: средняя атмосфера, температура, динамика, химический состав, солнечная активность, модели атмосферы.

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0002-351555648-65>

ВВЕДЕНИЕ

Средняя атмосфера — область атмосферы Земли, расположенная между тропопаузой и турбопаузой (в среднем от 10 до 100 км). В отличие от нижней атмосферы эта область высот контролируется солнечной ультрафиолетовой радиацией, вызывая фотодиссоциацию многих малых газовых составляющих. Результатом этих процессов является образование озоносферы. Пространственные неоднородности озона приводят к неоднородностям температуры и, как следствие, определяют циркуляцию средней атмосферы. К этому же диапазону высот относится и нижняя ионосфера (область D), расположенная на высотах 50–100 км, процессы ионообразования в которой тесно связаны, как с химией нейтральных составляющих, так и с метеорологическими процессами. Следует отметить, что регулярный режим, определяющийся поглощением солнечной радиации (суточный и годовой ход), иногда нарушается воздействием проникающих из тропосферы крупномасштабных (планетарных) волн и ВГВ, а также процессами, связанными с солнечной активностью (вариации

электромагнитной и корпускулярной радиации Солнца).

Данная публикация основана на опубликованных результатах российских исследований, полученных в период 2015–2018 гг. Обзор подготовлен в Комиссии по средней атмосфере Секции метеорологии и атмосферных наук Национального геофизического комитета РАН для Национального отчета.

1. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Численные модели являются мощным современным инструментом исследования процессов в атмосфере наряду с наблюдениями. Исторически важным этапом явилось создание фотохимических моделей, позволивших теоретически описать озоносферу и провести сравнение с экспериментальными данными. Вначале были созданы одномерные модели, двумерные, затем трехмерные глобальные модели. Верхняя граница моделей была ограничена на первом этапе только стратосферой. В настоящее время отечественная трехмерная модель CHARM

* Russian National Report. Meteorology and Atmospheric Sciences. 2015–2018. Edited by I.I. Mokhov and A.A. Krivolutsky. National Geophysical Committee RAS. Moscow: MAX Press. 2019.

интегрировать систему уравнений от поверхности Земли до 90 км.

Глобальная численная фотохимическая модель CHARM (Chemical Atmospheric Research Model) разработана в Лаборатории химии и динамики атмосферы Центральной Аэрологической Обсерватории [1]. В данной работе дается описание модели и результаты трехмерного численного моделирования климатологических распределений озона и других малых газовых составляющих в диапазоне 0–90 км. Приводятся результаты реализации численных сценариев воздействия на озоносферу изменением потоков УФ-радиации Солнца в цикле его активности, а также обусловленного разрушением озона в полярных областях частицами высоких энергий космического происхождения (протонных вспышек). Были учтены вариации УФ-радиации в различных интервалах спектра, характерные для 21 и 22 циклов активности. При расчете скоростей ионизации частицами использовались данные о потоках частиц в различных каналах энергий спутника GOES-10. Для описания пространственного переноса примесей использовались расчеты глобальных полей компонент ветра с помощью модели общей циркуляции ARM. Показано, что одна из наиболее мощных протонных вспышек на Солнце 14 июля 2000 г. практически полностью разрушила озон в мезосфере и верхней стратосфере. В то же время эта же вспышка вызвала достаточно слабые отклики над южной полярной областью (в условиях полярной ночи).

В работе [2] представлено описание глобальной численной фотохимической модели CHARM-I (Chemical Atmospheric Research Model with Ions). В дополнение к 113 химическим и фотохимическим реакциям учитывалось 28 реакций положительных ионов, 29 реакций отрицательных ионов, 9 реакций диссоциации и фотоотлипания для отрицательных ионов и 14 реакций рекомбинации ионов. В качестве ионизирующих факторов в модели включены потоки УФ-радиации на длине волны Ly- α , а также галактические космические лучи. Для расчета концентраций нейтральных составляющих использовался метод «химических семейств», а при расчете концентраций заряженных — на каждом шаге интегрирования по времени накладывалось условие электронейтральности. Впервые получены глобальные распределения электронной концентрации (и ионов) в области D, их суточный и сезонный ход. Новая трехмерная фотохимическая модель позволяет также учитывать воздействие солнечных вспышек и высыпаний частиц на D область.

2. ВОЗДЕЙСТВИЕ НА СТРАТОСФЕРУ, МЕЗОСФЕРУ И АТМОСФЕРНЫЙ ОЗОН

В работе [3] сделана качественная оценка возможности понижения концентрации озона в нижней части области D под воздействием мощной радиоволны (высказанная в [4] по результатам эксперимента на нагревном стенде «Сура» в марте 2009 г.). Эти оценки позволяют утверждать, что делать вывод о влиянии такого воздействия на мезосферный озон пока преждевременно. Необходимо проведение дальнейших экспериментальных и теоретических исследований. Влияние сильных внезапных стратосферных потеплений на озон средней атмосферы рассмотрено в работе [5]. Исследованы особенности изменений озона в средней атмосфере над Москвой по наблюдениям на миллиметровых волнах во время потеплений в середине зимы, произошедших в последние два десятилетия. При этом установлены связи содержания озона с планетарными волнами и интенсивностью полярного стратосферного вихря. Установлено, что относительно длительные понижения содержания озона в декабре связаны с ростом амплитуды планетарной волны с волновым числом $n = 1$. Такие явления предшествовали развитию сильных стратосферных потеплений, которые, в свою очередь, сопровождались значительным увеличением озона в январе. Это увеличение было связано с уменьшением амплитуды волны с $n = 1$ и ростом амплитуды волны с $n = 2$. Эффект сопровождался ростом геопотенциала в центре полярного вихря. Эти особенности изменений озона под влиянием крупномасштабных атмосферных процессов проявляются также и в общей усредненной картине для зим с сильными стратосферными потеплениями.

Критический анализ активных методов восстановления озонового слоя проведен в [6]. Дается анализ различных методов восстановления озонового слоя; выбросы газов класса алканов, разрушение фреонов лазерным ИК-излучением и с помощью СВЧ-разряда, воздействие лазерным УФ-излучением и электрическим разрядом в атмосфере, использование излучения Солнца и лазерного ИК-излучения, использование источников гамма-излучения, создание на больших высотах искусственного образования, экранирующего диссоциирующее озон солнечное излучение. Оптимальными с точки зрения эффективности, экономических затрат и экологических последствий являются использование источников гамма-излучения, электрического разряда в атмосфере и СВЧ-пробоя.

Выполнен анализ аномалий стратосферных содержаний O_3 и NO_2 в связи с внезапным стратосферным потеплением и обусловленной им деформацией стратосферного циркумполярного вихря в начале февраля 2010 г. и широтным смещением вихря в европейский сектор в конце марта 2011 г. накануне финального весеннего потепления. В первом случае в толще стратосферы отмечено увеличение концентрации O_3 до 85% и содержания NO_2 в два раза, во втором — уменьшение концентрации O_3 на четверть и содержания NO_2 вдвое по сравнению со средними значениями за периоды, предшествующие началу аномалий. Получены оценки статистической связи стратосферных содержаний O_3 и NO_2 с потенциальной завихренностью и геопотенциалом [19].

Анализ изменчивости содержания атмосферного озона в разных высотных слоях в окрестности Санкт-Петербурга в 2009–2014 гг. выполнен на основе сопоставления результатов наземных измерений на станции Петергоф с результатами спутниковых измерений с помощью прибора SBUV и результатами численного моделирования. В модели температура, скорость ветра, влажность воздуха и приземное давление задавались по данным реанализа MERRA. По совокупности результатов измерений, численного моделирования и реанализа идентифицированы особенности сезонных и межгодовых изменений содержания озона в разных высотных слоях, а также оценена роль фотохимических и динамических факторов в вариациях содержания озона [20].

Приведены примеры восстановления общего содержания озона (ОСО) по спектрам уходящего теплового излучения, измеренным с помощью прибора ИКФС-2 с борта метеорологического спутника «Метеор-М» № 2. Применена разработанная авторами методика, основанная на нейросетевом подходе с использованием данных измерений ОСО с помощью спутникового прибора OMI. Сравнение полученных результатов с данными наземных измерений ОСО показало изогласие в пределах 2–5% для глобального ансамбля и в пределах 3–6% для отдельных широтных поясов и сезонов. Оценки погрешностей измерений ОСО на ИКФС-2 близки к погрешностям измерений ОСО с помощью аналогичного прибора IASI со спутника MetOp (EUMETSAT) [21].

Обзор работ по наблюдению и исследованию озонового слоя учреждениями Росгидромета, Российской академии наук и Министерства образования и науки подготовлен по материалам Национального сообщения РФ, представлен-

ного во Всемирную метеорологическую организацию в январе 2017 г. Описываются основные современные тенденции исследований и развития мониторинга озонового слоя за рубежом и в России. Предложены первоочередные меры по активизации таких работ в нашей стране [24].

В работе [25] представлен статистический подход к восстановлению концентраций наиболее важных мезосферных малых газовых составляющих на высотах 50–75 км, с использованием фотохимической модели, основанной на временных рядах концентрации озона, которая измерялась в дневное время одного дня с помощью наземного пассивного микроволнового устройства. Используя модель временных рядов с шумом и с допущением реалистичной точности измерений в мезосфере, которую гарантируют имеющиеся озонметры, исследуется точность восстановления неизмеренных мезосферных характеристик как функции высоты и длины временных рядов.

В работе [26] приведены результаты моделирования 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. Получено, что распространяющиеся из тропосферы в стратосферу планетарные волны по-разному влияют на газовый состав стратосферы Арктики и Антарктики. В Арктике степень волновой активности критически влияет на формирование циркумполярного вихря, появление полярных стратосферных облаков, галогенную активность на их поверхности и образование озонных аномалий. Как правило при высокой волновой активности озонные аномалии в Арктике не образуются, а при низкой могут проявиться. В Антарктике волновая активность влияет на степень устойчивости вихря и глубину озонных дыр, которые формируются практически при любой волновой активности, а минимальные содержания озона зависят от того, сильная или слабая активность отмечается в конкретные годы.

Для более корректного моделирования стационарных планетарных волн и атмосферных приливов с помощью модели средней и верхней атмосферы (МСВА) создана трехмерная (долгота–широта–высота) полуэмпирическая климатическая модель распределения водяного пара в тропосфере, которая учитывает сезонные изменения. Радиационные блоки нагрева и выхолаживания в МСВА модифицированы с учетом зависимости концентрации водяного пара от

долготы. Расчеты показали, что учет неоднородностей содержания водяного пара вдоль широтного круга приводит к существенной зависимости солнечного нагрева от долготы, что влияет на амплитуды стационарных планетарных волн в стратосфере [27].

В работе [28] проведено сопоставление спутниковых и наземных измерений содержания озона в двух атмосферных слоях (0–25 км и 25–60 км) с данными численного моделирования состава нижней и средней атмосферы для района Санкт-Петербурга. Сравнивались среднедневные и среднемесячные значения содержания озона в течение 3.5 лет (июнь 2011–декабрь 2014 гг.). В целом согласие достаточно хорошее (или удовлетворительное). Тем не менее обнаружены систематические отличия экспериментальных данных от модельных. Модель завышает озон по сравнению со спутниковыми измерениями в осенне-зимний период в слое 0–25 км и занижает в слое 25–60 км в тот же период. Эти особенности проявляются и в среднемесячных значениях. Модель в ряде случаев демонстрирует сильные и «высокочастотные» колебания озона, не всегда регистрируемые в измерениях.

В работе [29] с помощью трехмерной модели химического переноса (СТМ) показано, что восстановление распределения атомарного кислорода и атомарного водорода с использованием допущения о химическом равновесии озона может привести к большим ошибкам ниже 81–87 км. Дан простой полуэмпирический критерий для практического указания нижней границы области химического равновесия озона близ мезопаузы.

В работе [30] введены в модель общей циркуляции средней и верхней атмосферы (МИАМ) параметризация динамического и теплового влияния орографических гравитационных волн (ОГВ) и квазидвухлетних колебаний (КДК) зонального ветра. Исследована чувствительность вертикальных потоков озона к влиянию стационарных ОГВ при разных фазах КДК на высотах до 100 км в январе. Имитируемые изменения в вертикальных скоростях производят соответствующие изменения в потоках озона, вызванных влиянием параметризации ОГВ и переходом от восточной к западной фазе КДК. Эти изменения могут достигать 40–60% в Северном полушарии на высотах средней атмосферы.

В работе [31] временные ряды спутниковых измерений общего содержания озона (ОСО) и содержания озона в двух слоях 0–25 км и 25–60 км

за 2000–2014 гг. сопоставлены с результатами численного моделирования с помощью химико-транспортной модели (ХТМ) и химико-климатической модели ЕМАС. Сравнивались дневные и среднемесячные значения, кратковременные периоды его уменьшения, а также долговременные тренды. Статистические характеристики трех временных рядов (средние, СКО, вариации, медиана, показатели асимметрии и т.д.) хорошо согласованы. Модель ЕМАС занижает содержание озона во всех трех слоях. Рассогласование со спутниковыми данными составляет $(5 \pm 5)\%$, $(7 \pm 7)\%$ и $(1 \pm 4)\%$ для ОСО, слоев 0–25 км и 25–60 км. Рассогласования SBUV и ХТМ составляют $(0 \pm 7)\%$, $(1 \pm 9)\%$ и $(-2 \pm 8)\%$. Линейные долговременные тренды близки к нулевым и по экспериментальным и по модельным данным.

В работе [32] для восстановления атомарного кислорода по наблюдениям озона в протяженной области мезопаузы при солнечном освещении используются допущения фотохимического равновесия озона и потеря озона при фотодиссоциации (без учета разрушения атомарным водородом). Допущения проверены 3D-моделированием. Найдено, что озон близок к фотохимическому равновесию на 75–100 км днем. Однако разрушением озона атомарным водородом нельзя пренебрегать при восстановлении атомарного кислорода по озонным наблюдениям.

В работе [50] впервые измерено общее содержание (ОС) нитрата хлора ClONO_2 ИК Фурье-спектрометром (ФС) Bruker IFS-125HR в 2009–2012 гг. в Петергофе. Средняя величина погрешности составляет $(25 \pm 10)\%$. Эти результаты сопоставлены с измерениями аналогичными приборами на станциях NDACC, со спутниковыми измерениями MIPAS и химико-климатической моделью ЕМАС. Сезонный ход одинаков для станций Петергоф, Kiruna, Eureka с максимумом в феврале–марте. Выявлена корреляция $R = 0.7–0.9$ между данными MIPAS, наземными измерениями в Петергофе и моделью ЕМАС. В среднем модельные значения меньше как наземных, так и спутниковых измерений.

Обнаружено увеличение ночных значений концентрации озона в стратосфере и нижней мезосфере на 30–40% по сравнению с дневными значениями на высоте 50 км и на 50–80% на 60 км. Суточный ход не обнаружен ниже 50 км. Показано, что ночное содержание испытывает межсуточные изменения. Выполнено сопоставление результатов с данными орбитального прибора MLS AURA [51].

В Петергофе в 2009–2012 гг. измерено содержание озона в тропосфере (0–12 км) с погрешностью ~4%, стратосфере (12–50 км) с погрешностью ~3%, в слоях 10–20 км и 20–50 км (3–5%); в слоях 12–18 км, 18–25 км и 25–50 км (4–7%). В сезонном ходе в тропосфере и в слое 12–18 км наблюдается максимум в марте и минимум в ноябре с амплитудой в 30% и 40% соответственно. Для слоя 18–25 км максимум приходится на зимне-весенний период, минимум — на конец лета, амплитуда сезонного хода ~20%. Амплитуда изменений годового хода содержания в слое 25–50 км составляет около 30%, с максимумом вблизи летнего солнцестояния и минимумом вблизи зимнего. За три года прирост содержания озона в этом слое составил ~10% в год от его среднего значения за период. Коэффициент корреляции наземных и спутниковых измерений стратосферного озона составляет 0.76–0.84. Среднеквадратичное рассогласование наземных и спутниковых (MLS) измерений составляет 13.6% и 5% для слоев 10–20 км, 20–50 км и 10–50 км соответственно. Коэффициент корреляции между двумя типами измерений 0.82–0.94 [52].

В работе [53] по наземным спектрометрическим измерениям обнаружена отрицательная аномалия стратосферного содержания NO_2 в зимне-весенний период 2011 г. на ряде станций Северного полушария. Она сопровождалась аномалиями общего содержания озона (ОСО) и стратосферной температуры и была вызвана переносом воздуха из области арктической озонной дыры. Выполнен анализ связи вариаций ОС NO_2 с вариациями ОСО и температуры Северном и Южном полушарии в зимне-весенние периоды. Установлено, что она зависит от фазы квазидвухлетней цикличности экваториального стратосферного ветра.

В работе [54] химико-климатологическая модель нижней и средней атмосферы была использована для исследования чувствительности газового состава и температуры атмосферы к изменению спектральных потоков радиации в 11-летнем цикле на основании данных спутниковых измерений в первом десятилетии XXI века. Модельные расчеты показали, что помимо увеличения спектрального потока в полосах поглощения молекулярного кислорода, ведущего к росту содержания озона, значимыми для состава и температуры атмосферы являются и изменения потока на больших длинах волн. Изменения скоростей разрушения озона в разных каталитических циклах частично компенсируют друг друга, при этом увеличение скорости

разрушения происходит в реакции с атомарным кислородом и в азотном цикле, а уменьшение — в водородном и хлорном циклах.

На станции СПбГУ Петергоф проведено сопоставление данных глобальной модели ЕМАС с данными спектрометрических измерений общего содержания (ОС) озона, HNO_3 , HCl , NO_2 за 2009–2012 гг. Проанализированы как среднесуточные, так и среднемесячные значения. Показано, что сезонные зависимости ОС достаточно хорошо качественно воспроизводятся моделью. Но выявлен ряд рассогласований. Так модель для NO_2 , HCl , HNO_3 недооценивает значения ОС по сравнению с экспериментом (в среднем на 14% для NO_2 , на 22% для HCl и на 36% для HNO_3). Для ОСО модель дает большие значения (в среднем на 12%) [55].

В работе [54] представлены результаты анализа фазовых соотношений между квазидесятилетними вариациями (КДВ) в интервале 8–13 лет общего содержания озона (ОСО) на станции Ароза за 1932–2012 гг. и ряда метеопараметров: среднемесячных значений температуры, меридиональной и зональной компонент скорости ветра и геопотенциальных высот для изобарических поверхностей в слое 10–925 гПа методами Фурье, композитного и кроссвейвлетного анализа. С начала 24 цикла солнечной активности (2008–2010 гг.) вариации ОСО и метеопараметров происходят приблизительно в противофазе с вариациями солнечной активности. Периоды максимальной скорости роста температуры на поверхностях 50–100 гПа примерно соответствуют периодам максимумов ОСО, а периоды максимумов температуры — периодам наибольшей скорости уменьшения ОСО. Моменты максимумов (минимумов) КДВ меридиональной скорости ветра примерно соответствуют периодам максимальной скорости усиления (ослабления) КДВ температуры. КДВ геопотенциальных высот изобарических поверхностей отстают от вариаций ОСО в среднем на 1.5 года. В целом периоды вариаций ОСО и метеопараметров в интервале 8–13 лет меньше, чем период вариаций солнечной активности [60].

Ряд работ посвящен исследованию циркуляции атмосферы [7], планетарным и внутренним гравитационным волнам, влиянию на состав атмосферы [8] и влиянию мезосферных ВГВ на планетарные и приливные волны в термосфере [9].

Глобальная циркуляция атмосферы и температурный режим на высотах от 0 до 135 км рассчитывались с помощью модели ARM с учетом вклада солнечной активности [7]. Модель ARM

[Atmospheric Research Model], разработанная в ЦАО, является развитием одной из версий модели СОММА, но с более детальным пространственным разрешением и более совершенными параметризациями радиационных источников и стоков тепла. На нижней границе модели задаются волновые источники возмущений, обусловленные ВГВ и планетарными волнами. Представлены глобальные поля температуры и ветра для среднего уровня солнечной активности и их изменения, вызванные вариациями потоков УФ-радиации в цикле активности Солнца и солнечными протонными вспышками.

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 [8]. Получено, что распространяющиеся из тропосферы в стратосферу планетарные волны по-разному влияют на газовый состав Арктики и Антарктики. В Арктике степень волновой активности критическим образом влияет на формирование циркумполярного вихря, появление полярных стратосферных облаков, галогенную активность на их поверхности и образование озонных аномалий. Как правило, при высокой волновой активности озонные аномалии в Арктике не образуются, а при низкой могут проявиться. В Антарктике волновая активность влияет на степень устойчивости вихря и глубину озоновых дыр, которые формируются практически при любой волновой активности, а минимальные значения содержания озона зависят от того, сильная или слабая волновая активность отмечается в конкретные годы.

Влияние мезосферных ВГВ на планетарные и приливные волны в термосфере и ионосфере во время внезапного стратосферного потепления 2009 г. моделировалось в работе [9]. В качестве источников возмущений учтены локальные возмущения, вызванные планетарной волной с зональным волновым числом $s = 1$, и ВГВ, распространяющиеся из области возмущений в стратосфере. Показано, что включение дополнительного источника возмущений термосферы приводит к существенным изменениям параметров термосферы и ионосферы, включая изменение глобальной структуры распределений газовых компонент и смещение максимальных концентраций атомарного кислорода в область низких широт южного полушария, увеличение средних значений, амплитуд суточных и полусуточных вариаций концентраций ионов в области F

ионосферы. Эти особенности изменений происходили при незначительных возмущениях приливных вариаций в термосфере [9].

Данные радиометеорных измерений ветра в высоких широтах южного полушария (ст. Молодежная, 68° S , 45° E) и на средних широтах северного полушария (ст. Обнинск, 55° N , 37° E) проанализированы в периоды солнечных протонных событий в 1989, 1991, 2000, 2005 и 2012 гг. [10]. В 1989 и 1991 гг. отклик на солнечные протонные события наблюдался одновременно на обеих станциях. Следствием солнечных протонных событий является изменение параметров ветрового режима исследуемой области. В высоких широтах южного полушария наблюдаются изменения скоростей меридиональной и зональной составляющих преобладающего ветра. Амплитуда полусуточного прилива растет в окрестности максимума потока протонов в случае мощных солнечных протонных событий. Отклик на них зависит от сезона. Реакция преобладающего ветра на средних широтах имеет те же особенности, что и реакция ветра в высоких широтах. Однако однозначного отклика амплитуды прилива не наблюдается. В летний сезон даже мощные события (например, в июле 2000 г.) не вызывают изменений параметров ветрового режима среднеширотной области мезосферы/нижней термосферы.

В работе [22] параметризации нормальных атмосферных мод (НАМ) и орографических гравитационных волн (ОГВ) включены в механистическую модель общей циркуляции средней и верхней атмосферы. Проведены численные эксперименты развития внезапных стратосферных потеплений (ВСП) в январе–феврале с использованием данных реанализа метеорологической информации UK Met Office, осредненных за годы с восточными фазами квазидвухлетних колебаний (КДК) в 1992–2011 гг. Моделирование показало, что амплитуды ОГВ увеличиваются на высотах, больших чем 30 км в Северном полушарии после ВСП. Амплитуды ОГВ максимальны на высотах около 50 км, над североамериканскими и европейскими горными системами перед и во время ВСП, а также над Гималаями после потепления. На высоких широтах Северного полушария наблюдаются значительные (до 50–70%) вариации амплитуд стационарных планетарных волн (СПВ) во время и после ВСП. Распространяющиеся на запад НАМ имеют локальные максимумы амплитуд не только в Северном, но и в Южном полушарии, где существуют волноводы для распространения этих мод. Рассчитанные изменения

амплитуд СПВ и НАМ соответствуют изменениям средней температуры и ветра, потоков Элиассена-Пальма и показателя преломления атмосферы для планетарных волн в течение ВСП. Включение параметризации эффектов ОГВ приводит к увеличению амплитуд (до 30–70%) почти всех СПВ перед и во время ВСП и их уменьшению (до 20–100%) после ВСП на средних и высоких широтах Северного полушария.

Для исследования изменчивости динамики стратосферы и ее термической структуры использованы данные реанализа UK Met Office. Полученные результаты показывают, что максимум межгодовой изменчивости среднего зонального потока, связанного с КДК, наблюдался на высоте около 30 км. Показано, что имеется статистически значимое влияние фазы КДК на внетропическую стратосферу, так называемый эффект Холтона–Тана. Результаты анализа данных показывают, что условия при восточной фазе КДК более благоприятны для развития внезапных стратосферных потеплений (ВСП). Выполнен статистический анализ 15 сильных ВСП, наблюдавшихся за последние два десятилетия. Результаты показывают, что в последние годы внутренние процессы, связанные с нелинейным взаимодействием стационарных планетарных волн (СПВ) со средним потоком, играют доминирующую роль. Показано, что первое усиление СПВ1 в верхней стратосфере имеет место из-за усиления нелинейного взаимодействия между этой волной и средним потоком. Это усиление сопровождается последующим увеличением в потоке волновой активности из стратосферы в тропосферу с дальнейшим перераспределением волновой активности в горизонтальной плоскости. Тогда увеличение потока из тропосферы в стратосферу происходит в другой области. Второе усиление активности планетарных волн в стратосфере сопровождается нагревом полярной области и ослаблением или даже обращением стратосферного струйного течения. Таким образом, нелинейное взаимодействие волна–волна и волна–средний поток может играть важную роль до и во время ВСП. Показано, что верхняя стратосфера может рассматриваться как область, где генерируется СПВ2 во время ВСП [33].

Разработанная параметризация стационарных орографических гравитационных волн (ОГВ) [34] была применена в модели общей циркуляции средней и верхней атмосферы. Рассчитан средний зональный ветер, амплитуды стационарных планетарных волн (ПВ) и нормальных атмосферных мод с периодами 4–16 дней на высотах от тропосферы до нижней термосферы в январе для

восточной и западной фаз КДК с учетом и без учета параметризации стационарных ОГВ. Учет динамического и термического влияния ОГВ может привести к существенному изменению (до 50–90%) амплитуд СПВ. Амплитуды бегущих на запад нормальных атмосферных мод изменяются (до 50–90%) на различных высотах и широтах Северного полушария за счет влияния ОГВ. Переход от восточной к западной фазе КДК может менять амплитуды ПВ до +30–90% на средних и высоких широтах. Эти изменения в амплитудах ПВ согласуются с распределением потока Элиассена-Пальма и индексом преломления при различных фазах КДК, включая нашу параметризацию стационарных ОГВ.

В работе [35] было показано, что существует зависимость дат перехода от солнечной активности в случае разделения дат на ранние и поздние переходы, более сильное влияние солнечного сигнала обнаруживается в поздних весенних переходах. Показано также, что в условиях высокой солнечной активности связь между датами перехода и солнечной активностью сильнее, чем при низкой. О наиболее актуальных направлениях исследований в области стратосферно-тропосферных взаимодействий и их влияния на климат сказано в работе [36].

По данным радарных измерений зонального ветра на высотах 82–97 км получено, что в январе и особенно в феврале зональные ветры положительно коррелируют с индексом Эль Ниньо. Замечена задержка около месяца эффекта зонального ветра по отношению к изменчивости температуры поверхности экваториального моря. Сигнал сильнее для больших высот (выше 90 км) и слабеет с уменьшением высоты. Это отражает тот факт, что в годы Эль Ниньо западные струйные течения слабее. Результаты могут быть количественно воспроизведены численными экспериментами с механистической глобальной моделью общей циркуляции с предписанной температурой тропосферы и высвобождением латентного тепла для условий Эль Ниньо и Ла Нинья [37].

В работе [38] были численно смоделированы волны планетарного масштаба (ВПМ), возникающие в тропосфере, для высот от земли до 300 км. Рассчитано влияние солнечной активности (СА) на амплитуды и фазы бегущих на запад ВПМ с зональными волновыми числами 1 и 2 и периодами 4–16 дней, проникающими из тропосферы. Ниже 100 км получены незначительные различия в зональной скорости и амплитудах ВПМ для высокой и низкой СА.

В работе [39] проведено численное моделирование изменений глобальной атмосферной циркуляции и характеристик стационарных планетарных волн (СПВ) с зональными волновыми числами 1–4. Для моделирования общей циркуляции и планетарных волн на высотах 0–300 км использована модель средней и верхней атмосферы (MUAM). Учитываются ионосферные проводимости и их широтные, долготные и временные зависимости. Изменения в условиях распространения и отражения (СПВ), вызванные влиянием солнечной активности на термосферу, могут влиять на атмосферную циркуляцию в широком интервале высот, включая среднюю атмосферу.

Четыре ряда данных: UK Met Office, MERRA, JRA-55 и ERA использованы в работе [40] для оценки климатической изменчивости зонального среднего потока, температуры и стационарных планетарных волн (СПВ1, СПВ2) на высотах от тропосферы до нижней мезосферы. Комбинации метеорологических полей в середине зимы усреднены для 11-летних интервалов 1995–2005 гг. и 2006–2016 гг. и сопоставлены с наибольшим вниманием к межгодовой и внутрисезонной изменчивости. Результаты показывают, что изменения в средних полях СПВ2 слабее и статистическая значимость этих изменений ниже по сравнению с изменениями, наблюдающимися во внутрисезонной изменчивости этих характеристик. Все ряды данных показывают уменьшение амплитуд СПВ1 в высоких-средних широтах в нижней стратосфере и противоположный эффект в верхней стратосфере. Однако имеется статистически значимое увеличение во внутрисезонной изменчивости. Данные UK Met Office дают более сильные изменения и увеличение изменчивости, чем другие данные.

В работе [41] представлена разработанная в последние годы Глобальная справочная модель атмосферы (ГСМА) позволяет рассчитывать климатические среднемесячные распределения температуры, относительного давления и плотности, а также зональной и меридиональной составляющих скорости ветра на высотах 0–100 км. Однако в модели отсутствует учет суточных вариаций, которые приводят к существенным отклонениям от среднемесячных значений в зависимости от локального времени, начиная с высот порядка 60 км и выше. Целью исследования является определение высот, начиная с которых необходим учет суточных вариаций атмосферных параметров, оценка их сезонной и внутрисезонной изменчивости и обсуждение возможных путей и подходов для учета этих вариаций в ГСМА.

В работе [59] приводятся результаты зондирования тонкой слоистой структуры поля скорости ветра в стратосфере-мезосфере и нижней термосфере с использованием инфразвуковых волн от наземных взрывов и вулканических извержений. Эти результаты получены с помощью нового метода акустического зондирования, основанного на явлении рассеяния, основанного на явлении рассеяния инфразвука от анизотропных неоднородностей скорости ветра и температуры в области акустической тени.

В работе [14] был рассмотрен регулярный ночной ход температуры в области среднеширотной мезопаузы по измерениям гидроксильного излучения [11], незональная структура отклика глобального поля температуры на солнечную активность [12], атмосферная изменчивость по измерениям температуры области мезопаузы [13] и спектральная структура вариаций температуры в области среднеширотной мезопаузы.

В работе [11] по наземным спектральным измерениям в ближней ИК-области на Звенигородской научной станции ИФА (56° N, 37° E) в течение 2000–2013 гг. получены средние ночные изменения вращательной и колебательной температур гидроксидов ОН, излучающий слой которого локализован на высотах мезопаузы. Вращательная температура отражает кинетическую температуру. Анализ позволил определить характеристики первых трех гармоник суточного температурного хода как с учетом, так и без учета высотных колебаний излучающего слоя ОН. Для обоих случаев статистически значимыми являются вторая и третья гармоники, амплитуды которых составляют ~1 К, а фазы их первых максимумов находятся вблизи 03:00 и 01:30 местного солнечного времени.

В работе [12] приведены результаты обработки глобальных полей температуры с использованием трех баз данных реанализа: «ERA-20C», «NOAA-CIRES 20th Century Reanalysis, v2», «NCEP/NCAR Reanalysis 1». Анализ разностей среднемесячных глобальных полей температуры (январь и июль) между максимумами и минимумами трех циклов активности Солнца (21, 22, 23-й циклы) также выявил их незональную структуру. Показано, что амплитуда эффекта в январе в стратосфере (10 гПа) может составлять 7–29 К в северном полушарии. В июле эффект проявляется в южном полушарии. В тропосфере (500 гПа) незональный температурный отклик присутствует в обоих полушариях, и амплитуда эффекта составляет порядка 5–12 К. Таким образом обнаруженный численным моделированием механизм воздействия солнечной

активности на температуру атмосферы подтверждается при обработке данных реанализа.

Для анализа атмосферной и ионосферной изменчивости в регионе Восточной Сибири использованы данные о температуре атмосферы на высотах мезопаузы (T_m), полученные по спектрометрическим наблюдениям полосы ОН (6–2), 834.0 нм (высота максимума излучения ~87 км), и данные вертикального зондирования о максимуме электронной концентрации (NmF2). Анализировался период 2008–2015 гг. Исследованы и сопоставлены сезонные и межгодовые вариации изменчивости T_m и NmF2 в различных временных периодах: межсуточные вариации ($T > 24$ ч), приливные вариации (8 ч $T < 24$ ч), а также с периодами ВГВ ($T < 8$ ч). Обсуждаются возможные физические причины как общих особенностей, так и различий в поведении анализируемых параметров [13].

В работе [14] по спектральным наблюдениям полосы ОН (6–2) 840 нм на станциях Торы (52° N, 103° E) в 2008–2016 гг. и Звенигород (56° N, 37° E) в 2000–2016 гг. получены многолетние ряды полуночной температуры в области мезопаузы. На их основе определены спектры вариаций Ломба–Скаргла в области периодов от ~12 суток до ~11 лет. Доминирующими колебаниями являются первая и вторая гармоники годовой вариации, амплитуды которых составляют соответственно 23–24 К и 4–7 К. Остальные вариации, количество которых составило 16 для ст. Торы и 22 для ст. Звенигород, имеют малые амплитуды (0.5–3 К). Помимо межгодовых колебаний (периоды от ~2 до ~11 лет) и гармоник годовой вариации (вплоть до ее десятой гармоники) наблюдаются колебания с комбинационными частотами, возникающими при модуляции гармоник годовой вариации.

В работе [23] по данным реанализов NCEP-NCAR, ERA 40 и ERA-Interim были проанализированы статистические характеристики больших и малых внезапных стратосферных потеплений (ВСП) в Северном полушарии за 1958–2015 гг. Выявлена зависимость количества больших ВСП от смещения циркумполярного стратосферного вихря и количества малых ВСП от фазы квазидвухлетней цикличности (КДЦ) экваториального стратосферного ветра и от уровня солнечной активности (СА) в 11-летнем солнечном цикле. Большие ВСП, сопровождающиеся смещением полярного вихря, происходят чаще при высоком уровне СА и при восточной фазе КДЦ экваториального ветра в слое 50–40 гПа, а малые ВСП — наоборот, при низком уровне СА и при западной фазе КДЦ.

Выполнен анализ пространственно-временной динамики полярного стратосферного вихря при больших ВСП, выявлены наиболее вероятные направления смещения вихря в результате ВСП. Анализируется влияние больших ВСП на общее содержание NO₂ и озона, а также на стратосферную температуру.

В работе [42] по данным реанализа метеорологической информации выполнен статистический анализ дат внезапных стратосферных потеплений (ВСП) в 1958–2014 гг. Показано их неравномерное распределение в зимние месяцы с максимумами в начале января, в конце января–начале февраля и в конце февраля. Для объяснения этих закономерностей выполнен климатологический анализ изменений амплитуд и вертикальных компонент потоков Элиассена–Пальма, созданных крупномасштабными планетарными волнами (ПВ), среднезональных ветров и отклонений температур от их среднезимних значений в высоких северных широтах на высотах от земли до 50 км с использованием 20-летнего (1995–2014 гг.) набора ежедневной метеорологической информации из базы данных UK Met Office. Во время более частого наблюдения ВСП обнаружены климатологические максимумы возмущений температуры, локальные минимумы западных ветров, а также локальные максимумы амплитуд и потоков Элиассена–Пальма, ПВ с зональным волновым числом 1 в высокоширотной северной стратосфере. Обнаружены различия между атмосферными характеристиками, усредненными за два последних десятилетия. Главное внезапное стратосферное потепление (ВСП) в начале января 2013 г. привело к росту температуры полярной стратосферы до 60 К на высоте 44 км, изменению направления зонального ветра, разделению стратосферного полярного вихря и изменению температурного и динамического режимов в мезосфере — нижней термосфере. Используя данные реанализов, наземных спектрометрических и спутниковых наблюдений, анализируются связанные с ВСП изменения термодинамических параметров от тропосферы до нижней термосферы. За две недели до ВСП выявлено усиление потоков волновой активности из тропосферы в стратосферу над Восточной Сибирью–Китаем. Показано, что за неделю до ВСП распространяющиеся на восток в верхней тропосфере волновые цепочки могли внести вклад в усиление антициклона над Северо-восточной Атлантикой, которое в ходе ВСП привело к разделению стратосферного полярного вихря на две части [49].

В работе [61] представлены результаты совместного анализа вариаций температуры в области мезопаузы по измерениям в 1966–2015 гг. на Звенигородской станции ИФА РАН и вариаций приповерхностной температуры, характеризующей климатические изменения. Отмеченное сильное уменьшение температуры в области мезопаузы в последние десятилетия, в частности зимой, с тенденцией замедления с 1980-х гг. проявляется на фоне общего увеличения приповерхностной температуры для Северного полушария, T_{ns} , и Земли в целом. Выявлено резкое понижение температуры мезопаузы в 1970-х гг. и его синхронность с климатическим сдвигом в климатических особенностях у поверхности, связанных с явлениями Эль Ниньо. При значимой отрицательной корреляции вариаций температуры мезопаузы и T_{ns} по 56-летним наблюдениям кросс-вейвлетный анализ не выявил значимой когерентности соответствующих наиболее долгопериодных температурных вариаций. Для оценки возможности проявления такой когерентности использовалась глобальная климатическая модель. Согласно расчетам для XX–XXI веков для получения значимой когерентности многолетних вариаций температуры мезопаузы, приведенной к одному уровню солнечной Активности, T_m , и T_{NS} необходимы наблюдения около столетия и более.

В работе [62] предварительные результаты космического эксперимента с ИК-зондировщиком ИКФС-2 (Спутник «Метеор-М» № 2) показали высокое качество измеренных спектров уходящего теплового излучения системы атмосфера–поверхность и адекватность разработанных ИК радиационных моделей атмосферы в 15 мкм полосе поглощения углекислого газа, используемой для восстановления вертикальных профилей температуры. Спектры уходящего излучения, измеренные с помощью ИКФС-2, позволяют восстанавливать вертикальные профили температуры с погрешностями близкими к 1 К в большей части высотной области 0–30 км за исключением тропосферы и высот более 30 км, где эти погрешности близки к 2–3 К.

В работе [63] по данным реанализа ERA-Interim получены оценки изменений температуры, геопотенциала и его крупномасштабных зональных гармоник, скорости ветра, потенциального вихря в тропосфере и стратосфере Северного и Южного полушарий в течение 11-летнего солнечного цикла. Оценки получены с помощью метода множественной линейной регрессии. Выявлены особенности отклика указанных параметров на солнечный цикл в отдельных об-

ластях атмосферы в целом за год и в зависимости от сезона. Результаты анализа указывают на наличие достоверной статистической связи крупномасштабных динамических и термодинамических процессов в тропосфере и стратосфере с 11-летним солнечным циклом.

В работе [43] исследуется динамическая связь нижней и верхней атмосферы через планетарные волны (ПВ). Проведено численное моделирование амплитуд ПВ во время внезапного стратосферного потепления (ВСП) в январе–феврале с использованием модели общей циркуляции средней и верхней атмосферы с начальными и граничными условиями типичными для западной и восточной фазы квазидвухлетних колебаний (КДК). Рассмотрены изменения в амплитудах ПВ в средней атмосфере до, во время и после ВСП для разных фаз КДК. Близ Северного полюса рост средней температуры во время ВСП достигает 10–30 К на высотах 30–50 км для четырех пар модельных расчетов с восточной и западной фазой КДК. Амплитуды стационарных ПВ в средней атмосфере Северного полушария могут отличаться до 30% во время восточной и западной фаз КДК до и во время ВСП. После события ВСП амплитуды стационарных ПВ существенно больше в западной фазе КДК. Рассчитаны индекс преломления ПВ и векторы потока Элиассена-Пальма. Наибольшие потоки (Э-П) в средней атмосфере соответствуют ПВ с зональным волновым числом $m = 1$. Изменения амплитуд ПВ соответствуют неоднородностям в глобальной циркуляции, индексе преломления и потоке, образуемым изменением фаз КДК. ПВ могут обеспечить эффективный механизм взаимодействия и переноса динамических изменений из локальных областей нижней атмосферы в отдаленные области верхней атмосферы обоих полушарий.

В работе [48] рассматривается общая температурная структура атмосферы Земли. Отмечены условия появления разных типов атмосферного аэрозоля в средней и верхней атмосфере: вулканический аэрозоль, перламутровые и серебристые облака. Экспериментальной основой работы являются измерения поляризации рассеяния на частицах вулканического аэрозоля под углом около 90° (после извержения вулкана Рабаул в 2006 г.) и рассеяния на частицах серебристых облаков в широком диапазоне углов в 2014 г. в средних и северных широтах. На основе этих измерений делается оценка характеристик размеров частиц аэрозоля.

Волновые возмущения ночной эмиссии атмосферной полосы (0,0) O_2 исследовались с помощью мезомасштабной гидродинамической

модели и зонально осредненной глобальной циркуляционной модели [15]. Измерения гидроксильного излучения послужили основой для изучения регулярного ночного хода температуры в области среднеширотной мезопаузы [11]. В качестве трассера O_3 в мезосфере и нижней термосфере использовалась ИК-полоса O_2 [16]. Особенности в площади мезосферных облаков исследовались с использованием данных аппарата CIPS на спутнике AIM [17].

В работе [44] рассмотрен уникальный случай распространения внутренней гравитационной волны, которая генерировала компактный и тонкий слой серебристых облаков (СО) на высоте 82.7–85.2 км с характеристикой горизонтального масштаба 65–70 км, наблюдавшихся в Московской области ночью 18–19 июля 2013 г. Это продолжалось около часа. Модельное исследование показало, что волна имела тропосферный источник, связанный с прохождением окклюдированного фронта. Волна была генерирована, вероятно, благодаря сильному горизонтальному сдвигу ветра на высоте около 5 км.

В работе [45] наблюдались атмосферные гравитационные волны в серебристых облаках с очень длинными гребнями (450–500 км) и короткими горизонтальными длинами волн около 20 км. Гравитационные волны медленно двигались в направлении противоположном фоновому ветру, указывая на их вынужденное генерирование вне области мезопаузы. Анализ трассирования хода лучей с использованием метеорологического реанализа и данных эмпирической модели атмосферы показал, что источник таких специфических гравитационных волн располагался близ тропопаузы и мог быть связан со струйным течением на высотах 8–10 км.

В работе [56] построена новая математическая модель глобального переноса многокомпонентных газовых примесей и аэрозоля и формирования полярных стратосферных облаков (ПСО) в обоих полушариях. Рассматриваются два типа ПСО: 1a-образование частиц тригидрата азотной кислоты (NAT), 1b-образование частиц переохлажденного трехкомпонентного раствора $H_2SO_4/HNO_3/H_2O$ -частиц STS (supercooled ternary solutions). Для их моделирования предложены новые уравнения, описывающие изменчивость компонентов в газовой и конденсированной фазах с учетом их термодинамических свойств. Формирование ПСО рассматривается совместно с формированием сульфатного аэрозоля в верхней тропосфере и нижней стратосфере с учетом фотохимии, нуклеации, кон-

денсации–испарения и коагуляции. Проведены численные эксперименты для воспроизведения пространственно-временной изменчивости ПСО в зимний период в обоих полушариях. Изучению особенностей планетарного распределения ионных высыпаний при разных уровнях магнитной активности посвящена работа [18]. Незональные структуры проявления солнечной активности в глобальном поле температуры рассматривались в [12].

В работе [46] рассмотрены неопределенности в скоростях фотолиза, связанные с изменчивостью интенсивности солнечного излучения, относящейся к выбору данных о радиации и к характеристикам расчета расчетов фотолиза, используемых в глобальных химико-климатологических моделях. Показано, что главные реакции фотолиза, ответственные за солнечный сигнал в стратосфере, очень чувствительны к спектральному распределению вариаций радиации. Соответственно изменения озона и обратная связь озона с температурой существенно зависят от используемого ряда данных о радиации, что вызывает необходимость получения точных вариаций радиации. Показано, что в большинстве случаев абсолютные значения скоростей фотолиза и их реакция на применяемые изменения радиации согласуются в пределах 30%.

В работе [47] исследованы сезонные и межгодовые изменения среднемесячных значений и дисперсий вариаций ночного свечения гидроксидов с периодами 0.4–5.4 ч. Усредненный за 2002–2017 гг. годовой ход среднемесячной температуры близ мезопаузы имеет максимум зимой и минимум летом. Среднемесячные интенсивности свечения ОН кроме зимнего максимума имеют дополнительный максимум летом (в июне). Для мезомасштабных вариаций интенсивности свечения ОН весенний максимум сдвинут на июль.

В работе [57] представлена совместная модель тропосферы–стратосферы–мезосферы и D-слоя ионосферы. Модель базируется на трехмерной модели общей циркуляции в гибридной системе координат. В качестве фотохимической модели нижней ионосферы взята пятикомпонентная модель. Исследована роль термодинамических характеристик нейтральной атмосферы в формировании среднего состояния D-слоя. На основе предварительной идентификации модели по данным прямых измерений, поглощения и распространения радиоволн показано удовлетворительное воспроизведение климатических характеристик D-слоя ионосферы.

В работе [58] рассматривается воспроизведение динамических процессов стратосферы внетропических широт в расчетах атмосферного блока глобальной климатологической модели ИВМ РАН с верхней границей на 0.2 гПа (~60 км) для периода с 1979 по 2008 гг. в сравнении с данными реанализа. Анализируются изменения температуры, зонального ветра, активности планетарных волн, потоков тепла в нижней стратосфере, а также внезапные стратосферные потепления со смещением и разделением полярного вихря и распространение связанных с ними аномалий циркуляции в тропосфере.

Ряд работ посвящен изучению изменений стратосферного содержания NO_2 под действием различных циркуляционных факторов с использованием результатов наземных спектрометрических измерений. В работе [63] выполнен анализ зимне-весенних аномалий NO_2 . Значительные отрицательные аномалии наблюдались на ряде станций северного полушария зимой и весной 2011 г. Они сопровождалась аномалиями общего содержания озона (ОСО) и стратосферной температуры и были вызваны переносом воздуха из области арктической озоновой дыры. Вертикальные профили NO_2 , измеренные на Звенигородской научной станции ИФА, показали, что рекордная по величине отрицательная аномалия NO_2 частично обусловлена денитрификацией полярной стратосферы в области озоновой дыры. Установлено, что в целом корреляция общего содержания (ОС) NO_2 в умеренных и высоких широтах северного и южного полушарий с ОСО и стратосферной температурой в зимне-весенний период зависит от фазы квазидвухлетней цикличности (КДЦ) в экваториальной стратосфере. Влияние КДЦ на ОС NO_2 , ОСО и стратосферную температуру подробно анализировалось в [64]. Эффекты КДЦ наиболее значительны в зимне-весенний период, с существенными различиями между северным и южным полушариями. Получены сезонные и широтные распределения амплитуд эффектов КДЦ. Выявлены различия в суточных циклах NO_2 между при западной и восточной фазах КДЦ.

В работах [65, 66] результаты спектрометрических измерений ОС и вертикальных профилей NO_2 и измерений вертикальных профилей O_3 на миллиметровых волнах в Московской области использованы для анализа аномалий содержания примесей, связанных с внезапным стратосферным потеплением (ВСП) в начале февраля 2010 г. и широтным смещением полярного стратосферного вихря в сторону европейского

сектора в конце марта 2011 г. перед финальным весенним потеплением. В первом случае концентрация O_3 в стратосфере увеличилась на величину, достигающую до 85%, а содержание NO_2 в вертикальном столбе стратосферы увеличилось вдвое, а во втором случае концентрация O_3 снизилась на четверть, а содержание NO_2 уменьшилось в два раза по сравнению со средними значениями за периоды времени, предшествующие аномалиям. Выявлена сильная антикорреляция стратосферных содержаний NO_2 и O_3 с потенциальной завихренностью.

Эффекты ВСП в стратосферном содержании NO_2 и ОСО изучались в работах [67, 68]. Статистические характеристики больших (мажорных) и малых (минорных) ВСП в 1958–2015 гг. анализировались с использованием данных реанализов NCEP-NCAR, ERA 40 и ERA-Interim. Выявлена зависимость ВСП от КДЦ и 11-летнего солнечного цикла. Выявлены характерные особенности изменений вертикального распределения и ОС NO_2 , ОСО и стратосферной температуры в результате больших ВСП. Сильные отрицательные аномалии NO_2 , O_3 и температуры обусловлены смещением стратосферного циркумполярного вихря в сторону от полюса. Сильные положительные аномалии чаще наблюдаются при ВСП, сопровождающихся расщеплением полярного вихря, и обусловлены переносом стратосферного воздуха из низких широт. Большие ВСП могут приводить к значительным изменениям вертикального профиля NO_2 . Изменения содержания NO_2 в разных слоях стратосферы могут быть противоположны друг другу, когда край полярного вихря находится над пунктом наземных наблюдений.

В работе [69] выполнен анализ данных измерений массовой концентрации приземного аэрозоля на Звенигородской научной станции Института физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН. Показано, что вариации концентрации с периодами более 1 мес. могут быть связаны с периодичностями повторяемости траекторий атмосферного переноса с определенных направлений. Выявлена статистическая связь концентрации приземного аэрозоля с динамикой арктической верхней тропосферы.

В ряде работ рассматриваются различные аспекты воздействия солнечной активности на атмосферу. В [70, 71] приведены оценки изменений температуры, геопотенциала и его крупномасштабных зональных гармоник, скорости ветра и потенциальной завихренности в тропосфере и стратосфере северного и южного полушарий в течение 11-летнего солнечного цикла

по данным реанализа ERA-Interim. Выявлены особенности реакции указанных атмосферных параметров на солнечный цикл в отдельных регионах атмосферы в течение целого года и в зависимости от сезона. Результаты анализа свидетельствуют о наличии достоверной статистической зависимости крупномасштабных динамических и термодинамических процессов в тропосфере и стратосфере от 11-летнего солнечного цикла.

В работах [72, 73] выполнен анализ связи индекса Североатлантического колебания (САК) и приземной температуры в центральной Англии с 11-летним солнечным циклом по данным длительностью 200 и 300 лет соответственно. Обнаружено, что положительная корреляция температуры с индексом САК испытывает многодекадную модуляцию с ~60-летним периодом, обусловленную мультидекадным атлантическим колебанием. Корреляционная связь температуры и индекса САК с солнечным циклом испытывают ~50-летнюю модуляцию, которая, вероятно, связана с мультидекадными вариациями солнечной активности.

В работе [74] проанализирована зависимость внезапных стратосферных потеплений от 11-летнего солнечного цикла. Обнаружено, что большие потепления, сопровождающиеся смещением стратосферного полярного вихря, чаще происходят при высоком уровне солнечной активности, в то время как малые потепления чаще происходят при низком уровне солнечной активности. Большие потепления, сопровождающиеся расщеплением полярного вихря, не зависят от уровня солнечной активности.

В работе [75] приведены результаты анализа вариаций облачности и повторяемости безоблачного неба в Арктике по данным наземных наблюдений в течение 78 лет. Показано, что балл облачности испытывает вариации примерно в фазе, а повторяемость безоблачного неба — примерно в противофазе с солнечным циклом. В работе [76] получены сезонно зависимые оценки изменений стратосферного содержания NO_2 на Звенигородской научной станции ИФА в течение 11-летнего солнечного цикла с учетом автокорреляции данных. Значительные изменения в противофазе с солнечным циклом, достигающие 8%, выявлены для весеннего периода.

В работе [77] по данным реанализа ERA-Interim показано, что квазидвухлетние колебания зональной скорости ветра в слое экваториальной стратосферы (~50 км) синхронизованы с квазидвухлетними колебаниями ультрафиолетового солнечного излучения. Причина синхронизации

может заключаться в неоднородном нагреве этого слоя за счет поглощения ультрафиолетового солнечного излучения озоном, меридиональный градиент которого изменяется в фазе с квазидвухлетними солнечными вариациями.

В работе [78] выполнены измерения содержания CO_2 и H_2O в древесине годовых колец стволов и корней хвойных деревьев с помощью фотоакустического лазерного газоанализатора. Выявлен квазициклический характер вариаций хронологий CO_2 и $(\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O})$, что, вероятно, обусловлено изменениями климатических условий и солнечной активности.

В работах [79, 80] выполнен анализ влияния 27-суточного солнечного цикла на характеристики крупномасштабных зональных волновых гармоник геопотенциала в северном полушарии по результатам расчетов на трехмерной химико-климатической модели. Обнаружена заметная корреляция амплитуд планетарных волновых компонент зимой в северном полушарии с 27-дневным солнечным циклом. Наибольший отклик получен на возмущения с волновым числом 1 в средних и высоких широтах. Амплитуда колебаний геопотенциальной высоты составляет ~300 м в средней и верхней стратосфере. Результаты указывают на возможность влияния 27-дневного солнечного цикла на крупномасштабную волновую активность в зимней атмосфере средних и полярных широт северного полушария.

В работе [81] представлены первые экспериментальные свидетельства воздействия солнечного протонного события на стратосферное содержание NO_2 по данным наземных спектрометрических измерений в средних и высоких широтах северного полушария. Солнечное протонное событие в октябре 2003 г. вызвало увеличение NO_2 в верхней стратосфере на $0.6 \times 10^{15} \text{ см}^{-2}$, что составило около трети увеличения ОС NO_2 . Солнечные протонные события могут быть важным фактором изменчивости ОС NO_2 в атмосфере высоких и средних широт.

Современное состояние исследований, описывающие роль ионизации, создаваемой средне- и высокоэнергичными протонами, во время вспышечной активности Солнца, а также протонами космических лучей и энергичными электронами для процессов в средней атмосфере представлено в обзоре [82]. Было показано, что до сих пор остается открытым вопрос об атмосферных эффектах ионизации средней атмосферы от среднеэнергичных и высокоэнергичных электронов (от 30 кэВ до нескольких МэВ).

Изучению процессов связанных с высыпанием среднеэнергичных и высокоэнергичных электронов посвящены также работы [81, 82]. Так, работе [82] показана возможность получения скоростей ионизации средней атмосферы, вызванных высыпанием высокоэнергичных электронов, из баллонных наблюдений в полярной атмосфере и их сравнение со скоростями ионизации, рекомендованными для CMIP6 (Coupled Model Intercomparison Project 6 of World Climate Research Programme (WCRP)). Моделирование с использованием 1D-радиационно-конвективной модели с интерактивной нейтральной и ионной химией показало, что различие в данных скоростях ионизации, может привести к недооценке увеличения NO_x более чем на 100% и потере озона до 25% в мезосфере.

Подведем краткий итог сделанного обзора.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На взгляд авторов, исследования средней атмосферы в России в период 2015–2018 гг. велись достаточно широким фронтом. Эти исследования велись, как в таких традиционных направлениях, как исследования вариаций содержания озона и температуры, так и в новых направлениях, например в условиях сильных воздействий, таких как стратосферные потепления, солнечные протонные вспышки, нагревные воздействия на нижнюю ионосферу. В рассматриваемый период были введены в строй мощные отечественные глобальные трехмерные модели, детально описывающие фотохимические процессы, в том числе с учетом ионной химии в области D ионосферы. Получены новые результаты, описывающие волновые воздействия на процессы в средней атмосфере. В тоже время нужно отметить сохраняющееся отставание в области мониторинга параметров с использованием аппаратуры, установленной на спутниках.

Многие опубликованные результаты получены при поддержке РФФИ и РНФ, которым авторы выражают благодарность.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Криволицкий А.А., Вьюшкова Т.Ю., Черепанова Л.А., Куколева А.А., Репнев А.И., Банин М.В. Трехмерная глобальная фотохимическая модель CHARM. Учет вклада солнечной активности // Геомагнетизм и аэронавигация. 2015. Т. 55. № 1. С. 64–93.
2. Криволицкий А.А., Черепанова Л.А., Вьюшкова Т.Ю., Репнев А.И. Трехмерная глобальная численная фотохимическая модель CHARM-I. Учет процессов в области D ионосферы // Геомагнетизм и аэронавигация. 2015. Т. 55. № 4. С. 483–503.
3. Беккер С.З., Козлов С.И., Тасенко С.В. Оценка возможности понижения концентрации озона в нижней части D-области под воздействием мощной радиоволны // Геомагнетизм и аэронавигация. 2016. Т. 56. № 6. С. 796–799.
4. Куликов Ю.Ю., Фролов В.Л., Григорьев Г.И. и др. Отклик мезосферного озона на нагрев нижней ионосферы мощным КВ радиоизлучением // Геомагнетизм и аэронавигация. 2013. Т. 53. № 1. С. 102–109.
5. Соломонов С.В., Кропоткина Е.П., Розанов С.Б., Игнатьев А.Н., Лукин А.Н. Влияние сильных внезапных стратосферных потеплений на озон в средней атмосфере по наблюдениям на миллиметровых волнах // Геомагнетизм и аэронавигация. 2017. Т. 57. № 3. С. 392–400.
6. Беккер С.З., Доронин А.П., Козлов С.И. Критический анализ активных методов восстановления озонового слоя Земли // Геомагнетизм и аэронавигация. 2017. Т. 57. № 5. С. 676–682.
7. Криволицкий А.А., Черепанова Л.А., Дементьева А.В., Репнев А.И., Ключникова А.В. Глобальная циркуляция атмосферы Земли на высотах от 0 до 135 км, рассчитанная с помощью модели ARM. Учет вклада солнечной активности // Геомагнетизм и аэронавигация. 2015. Т. 55. № 6. С. 808–828.
8. Смышляев С.П., Погорельцев А.И., Галин В.Я. Дробашевская Е.А. Влияние волновой активности на газовый состав стратосферы полярных районов // Геомагнетизм и аэронавигация. 2016, Т. 56. № 1. С. 102–116.
9. Карнов И.В., Бессараб Ф.С., Борчевкина О.П., Артеменко К.А., Клопова А.И. Моделирование влияния мезосферных ВГВ на планетарные и приливные волны в термосфере и ионосфере во время внезапного стратосферного потепления 2009 г. // Геомагнетизм и аэронавигация. 2018. Т. 58. № 4. С. 526–539.
10. Трифонов А.Н., Макаров Н.А., Мерзляков Е.Г. Проявление солнечных протонных событий в области мезосферы/нижней термосферы по данным радиометеорологических измерений ветра в высоких и средних широтах // Геомагнетизм и аэронавигация. 2016. Т. 56. № 2. С. 163–177.
11. Перминов В.И., Перцев Н.Н. Регулярный ночной ход температуры в области среднеширотной мезопаузы по измерениям гидроксильного излучения // Геомагнетизм и аэронавигация. 2016. Т. 56. № 5. С. 657–661.
12. Криволицкий А.А., Дементьева А.В. Незональная структура отклика глобального поля температуры атмосферы Земли на солнечную активность // Геомагнетизм и аэронавигация. 2017. Т. 57. № 1. С. 116–122.
13. Медведева И.В., Ратовский К.Г. Сравнительный анализ атмосферной и ионосферной изменчивости по

- измерениям температуры области мезопаузы и максимума электронной концентрации NmF2 // Геомагнетизм и аэрономия. 2017. Т. 57. № 2. С. 236–248.
14. *Перминов В.И., Семенов А.И., Медведева И.В., Перцев Н.Н., Суходоев В.А.* Спектральная структура вариаций температуры в области среднеширотной мезопаузы // Геомагнетизм и аэрономия. 2018. Т. 58. № 1. С. 133–140.
 15. *Полуаришинов М.А., Беляев А.Н., Моисеенко К.Б., Николайшвили С.Ш.* Модели волновых возмущений ночной эмиссии атмосферной полосы (0.0) молекулярного кислорода // Геомагнетизм и аэрономия. 2015. Т. 55. № 3. С. 386–396.
 16. *Мартышенко К.В., Янковский В.Я.* ИК-полоса 1.27 мкм O₂ как трассер O₃ в мезосфере и нижней термосфере: коррекция метода // Геомагнетизм и аэрономия. 2017. Т. 57. № 2. С. 249–261.
 17. *Кудабаева Д.А.* Стационарные долготные неоднородности в площадях мезосферных облаков по данным SIPS/AIM (июнь–июль) // Геомагнетизм и аэрономия. 2015. Т. 55. № 6. С. 829–832.
 18. *Воробьев В.Г., Ягодкина О.И., Антонова Е.Е.* Особенности планетарного распределения ионных высыпаний при разных уровнях магнитной активности // Геомагнетизм и аэрономия. 2015. Т. 55. № 5. С. 611–622.
 19. *Груздев А.Н., Кропоткина Е.П., Соломонов С.И., Елохов А.С.* Зимне-весенние аномалии содержания O₃ и NO₂ в стратосфере над Московским регионом в 2010 и 2011 гг. // Физика атмосферы и океана. 2017. Т. 53. Вып. 2. С. 223–231.
 20. *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 // Физика атмосферы и океана. 2017. Т. 53. Вып. 3. С. 343–358.
 21. *Гаркуша А.С., Поляков А.В., Тимофеев Ю.М., Виролайнен Я.А.* Определение общего содержания озона по данным измерений спутникового ИК Фурье-спектрометра // Физика атмосферы и океана. 2017. Т. 53. Вып. 4. С. 493–501.
 22. *Гаврилов Н.М., Коваль А.В., Погорельцев А.И., Савенкова Е.Н.* Численное моделирование волновых взаимодействий во время внезапного стратосферного потепления // Физика атмосферы и океана. 2017. Т. 53. Вып. 6. С. 674–685.
 23. *Агеева В.Ю., Груздев А.Н., Елохов А.С., Мохов И.И., Зуева Н.Е.* Внезапные стратосферные потепления: статистические характеристики и их влияние на общее содержание NO₂ и O₃ // Физика атмосферы и океана. 2017. Т. 53. Вып. 5.0. С. 545–555.
 24. *Звягинцев А.М., Варгин П.Н.* Российские исследования озонового слоя в период 2014–2016 гг. // Труды Гидрометцентра России. 2017. Вып. 365. С. 101–117.
 25. *Nechaev A.A., Ermakova T.S., Kulikov V.Yu.* Determination of the trace-gas concentrations at the altitudes of the lower and middle mesosphere from the time series of ozone concentration // Radiophysics and Quantum Electronics. December 2016. V. 59. № 7. P. 547–557.
 26. *Смышляев С.П., Погорельцев А.И., Галин В.Я., Дробышевская Е.А.* Влияние волновой активности на газовый состав стратосферы полярных районов // Геомагнетизм и аэрономия. 2016. Т. 56. № 1. С. 102–116.
 27. *Ермакова Т.С., Статная И.А., Федулина И.Н., Суворова Е.В., Погорельцев А.И.* Трехмерная полуэмпирическая климатическая модель распределения водяного пара и ее использование в радиационном блоке модели средней и верхней атмосферы // Метеорология и гидрология. 2017. № 9. С. 75–80.
 28. *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. 20–24
 29. *Belikovich M.Yu., Kulikov V.Yu., Grygalashvily M., Sonnemann G.R., Ermakova T.S., Nechaev A.A., Feigin A.M.* Ozone chemical equilibrium in the extended mesopause under the nighttime conditions // Adv. in Space Res. 2017. P. 1–7.
 30. *Gavrilov N.M., Koval A.V., Pogoreltsev A.I., Savenkova E.N.* The influence of orographic waves and quasi-biennial oscillations on vertical ozone flux in the model of general atmospheric circulation // Proc. SPIE, 10466, 23rd Internat. Symp. Atmos. and Ocean Optics: Atmos. Phys. 1046651. 2017. doi: 101117/12.2284689
 31. *Виролайнен Я.А., Тимофеев Ю.М., 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.) // Исследование Земли из космоса. 2017. № 3. С. 3–10.
 32. *Kulikov M.Y., Belikovich M.V., Grygalashvily M., Sonnemann G.R., Ermakova T.S., Nechaev A.A., Feigin A.M.* Daytime ozone loss term in the mesopause region. Ann. Geophys. 2017. V. 35. P. 1–6.
 33. *Pogoreltsev A.I., Savenkova E.N., Aniskina O.G., Savenkova T.S., Chen W., Wei K.* Interannual and interseasonal variability of stratospheric dynamics and stratosphere-troposphere coupling during northern winter // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. 2015. V. 136. P. 187–200.
 34. *Gavrilov N.M., Koval A.V., Pogoreltsev A.I., Savenkova E.N.* Simulating influences of QBO phases and orographic gravity wave forcing on planetary waves in the middle atmosphere // Earth, Planets and Space. 2015. V. 67:86. P. 2–16.
 35. *Rakushina E.V., Kanukhina A.Yu., Savenkova A.Yu., Pogoreltsev A.I.* Influence of QBO and solar activity

- on interannual variability of the spring-time transition of stratospheric circulation // *J. Atmos. Solar-Terr. Physics*. 2015. V. 136. P. 231–234
36. Варгин П.Н., Володин Е.М., Карпечко А.Ю., Погорельцев А.И. О стратосферно-тропосферных взаимодействиях // *Вестник РАН*. 2015. Т. 85. № 1. С. 39–46.
 37. Jacobi Ch., Ermakova T., Mewes L., Pogoreltsev A.I. El Nino influence on the mesosphere/lower thermosphere circulation at midlatitudes as seen by VHF meteor radar at Collm (51.3 N, 13 E) // *Adv. Radio Sci*. 2017. V. 15. P. 199–206.
 38. Koval A.V., Gavrilov N.M., Pogoreltsev A.I., Shevchuk N.O. Influence of solar activity on penetration of travelling planetary-scale waves from the troposphere into the thermosphere // *J. Geophys. Res. Space Phys*. 123. <https://doi.org/10.1029/2018JAO25680>
 39. Kova A.V., Gavrilov N.M., Pogoreltsev A.I., Shevchuk N.O. Propagation of stationary planetary waves to the thermosphere at different levels of solar activity // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys*. 2018. V. 173. P. 140–149.
 40. Rakushina E.V., Ermakova T.S., Pogoreltsev A.I. Changes in the mean zonal flow, temperature and planetary waves observed in the Northern Hemisphere mid-winter months during last decades // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys*. 2018. V. 171. P. 234–240.
 41. Ермакова Е.С., Моцаков М.А., Погорельцев А.И., Фомин А.Н. Зависимости от сезона суточных вариаций ветра на высотах средней атмосферы // *Труды ЦНИИ*. 2017. Вып. 135. С. 35–39.
 42. Савенкова Е.Н., Гаврилов Н.М., Погорельцев А.И., Мануйлова Р.О. Статистическая неравномерность дат внезапных стратосферных потеплений в зимнем Северном полушарии // *Физика атмосферы и океана*. 2017. Т. 53. № 3. С. 287–295.
 43. Koval A.V., Gavrilov N.M., Pogoreltsev A.I., Savenkova E.N. Comparison of planetary wave propagation to the upper atmosphere during stratospheric warming events at different QBO phases // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys*. 2018. V. 171. P. 201–209.
 44. Dalin P, Pogoreltsev A., Pertsev N., Perminov V., Shevchuk N., Dubietis A., Zalcik M., Kulikov S., Zadorozhny A., Kudobayeva D., Solodovnik A., Salakhutdinov G., Grigoryeva I. Evidence of the formation of noctilucent clouds due to propagation of an isolated gravity wave caused by a tropospheric occluded front // *Geophys. Res. Lett*. 2015. V. 12. P. 2037–2046.
 45. Dalin P, Gavrilov N., Pertsev N., Perminov V., Pogoreltsev A., Shevchuk M., Dubietis A., Volger P, Zalcik M., Ling A., Kulikov S., Zadorozhny A., Salakhutdinov G., Grigorieva I. A case study of long gravity wave crests in noctilucent clouds and their origin in the upper troposphere jet stream // *J. Geophys. Res. Atmos*. 727. doi: 10.1012/2016JDO25422
 46. Sukhodolov T., Rozanov E., Ball W.T., Bais A., Tourpali K., Shapiro A.I., Telford P., Smyshlyaev S., Fomin B., Sander R., Bossay R., Bekki S., Marchand M., Chipperfield M.P., Dhomse S. Haig J.D., Peter T., Schmutz W. Evaluation of simulated photolysis rates and their response to solar irradiance variability // *J. Geophys. Res. Atmos*. 727. 6066–6084. doi: 10.1002/2015JDO24277
 47. Попов А.А., Гаврилов Н.М., Андреев А.Б., Погорельцев А.И. Межгодовые изменения интенсивности мезомасштабных вариаций ночного свечения гидроксила в Алма-Ате // *Солнечно-земная физика*. 2018. Т. 4. № 2. С. 101–107.
 48. Угольников О.С., Маслов И.А., Козелов Б.В., Кириллов В.И. Средняя и верхняя атмосфера Земли: слои холода и высокие облака // *Phys. Auror. Phenom. Proc. XXXIX Annual Seminar. Apatity*. 2016. P. 142–145.
 49. Варгин П.Н., Медведева И.В. Исследование температурного и динамического режима внутропической атмосферы Северного полушария в период внезапного стратосферного потепления зимой 2012–2013 гг. // *Физика атмосферы и океана*. 2015. Т. 51. № 1. С. 20–38.
 50. Виролайнен Я.А., Тимофеев Ю.М., Поберовский А.В., Кирнер О., Хёпфнер М. Содержание нитрата хлора в атмосфере над Санкт-Петербургом // *Физика атмосферы и океана*. 2015. Т. 51. № 1. С. 60–68.
 51. Рыскин В.Г., Орозобаков А.Т. Микроволновые наземные измерения суточных вариаций озона в верхней стратосфере над Киргизией // *Физика атмосферы и океана*. 2015. Т. 51. № 1. С. 88–95.
 52. Виролайнен Я.А., Тимофеев Ю.М., Поберовский А.В., Еременко М., Дюфор Г. Определение содержания озона в различных слоях атмосферы с помощью наземной Фурье-спектрометрии // *Физика атмосферы и океана*. 2015. Т. 51. № 2. С. 191–200.
 53. Аеева В.Ю., Груздев А.Н., Елохов А.С., Гришаев М.В. Зимне-весенние аномалии стратосферного содержания NO₂ по результатам наземных измерений. // *Физика атмосферы и океана*. 2015. Т. 51. № 4. С. 455–463.
 54. Смышляев С.П., Галин В.Я., Блакитная П.А., Лемущенко А.К. Исследование чувствительности состава и температуры стратосферы к вызванной 11-летним циклом солнечной активности изменчивости спектральных потоков солнечной радиации // *Физика атмосферы и океана*. 2016. Т. 52. № 1. С. 19–36.
 55. Виролайнен Я.А., Тимофеев Ю.М., Поляков А.В., Ионов Д.В., Кирнер О., Поберовский А.В., Имхасин Х. С опоставление наземных измерений общего содержания O₃, HNO₃, HCl и NO₂ с данными численного моделирования // *Физика атмосферы и океана*. 2016. Т. 52. № 1. С. 64–73.
 56. Алоян А.Е., Ермаков А.Н., Арутюнян В.О. Моделирование образования полярных стратосферных облаков с учетом кинетических и гетерогенных процессов // *Физика атмосферы и океана*, 2015, Т. 51. № 3. С. 276–286
 57. Кулямин Д.В., Дымников В.П. Моделирование климата нижней ионосферы // *Физика атмосферы и океана*. 2015. Т. 51. № 3. С. 317–337.

58. *Варгин П.Н., Володин Е.М.* Анализ воспроизведения динамических процессов в стратосфере климатической моделью ИВМ РАН // *Физика атмосферы и океана*. 2016. Т. 52. № 1. С. 3–18.
59. *Чунгузов И.П., Куличков С.Н., Попов О.Е., Перепелкин В.Г., Васильев А.П., Глушков А.И., Фирстов П.П.* Характеристики тонкой вертикальной структуры ветра в стратосфере и нижней термосфере по инфразвуковым сигналам в области акустической тени // *Физика атмосферы и океана*. 2015. Т. 51. № 1. С. 69–87.
60. *Вишератин К.Н.* Квазидесятилетние вариации общего содержания озона, ветра, температуры и геопотенциальной высоты над станцией Ароза, Швейцария // *Физика атмосферы и океана*. 2016. Т. 52. № 1. С. 74–82.
61. *Мохов И.И., Семенов А.И., Володин Е.М., Дембицкая М.А.* Выхолаживание в области мезопаузы при глобальном потеплении по данным измерений и модельным расчетам // *Физика атмосферы и океана*. 2017. Т. 53. № 4. С. 435–444.
62. *Асмус В.В., Тимофеев Ю.М., Поляков А.В., Успенский А.Б., Головин Ю.М., Завелевич Ф.С., Козлов Д.А., Рублев А.Н., Кухарский А.В., Пяткин В.П., Русин Е.В.* Температурное зондирование атмосферы по данным спутникового ИК Фурье-спектрометра // *Физика атмосферы и океана*. 2017. Т. 53. № 4. С. 487–492.
63. *Груздев А.Н.* Изменения температуры и циркуляции атмосферы в 11-летнем цикле солнечной активности по данным реанализа ERA-INTERIM // *Физика атмосферы и океана*. 2017. Т. 53. № 4. С. 502–511.
64. *Агеева В.Ю., Груздев А.Н., Елохов А.С., Гришаев М.В.* Зимне-весенние аномалии стратосферного содержания NO₂ по результатам наземных измерений // *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*. 2015. Т. 51. № 4. С. 455–463.
65. *Агеева В.Ю., Груздев А.Н.* Сезонные особенности квазидвухлетних вариаций стратосферного содержания NO₂ по результатам наземных измерений // *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*. 2017. Т. 53. № 1. С. 74–85.
66. *Груздев А.Н., Кропоткина Е.П., Соломонов С.В., Елохов А.С.* Аномалии содержания озона и двуокиси азота в стратосфере над Московским регионом как проявление динамики стратосферного полярного вихря // *Доклады АН*. 2016. Т. 468. № 4. С. 451–455.
67. *Груздев А.Н., Кропоткина Е.П., Соломонов С.В., Елохов А.С.* Зимне-весенние аномалии содержания O₃ и NO₂ в стратосфере над московским регионом в 2010 и 2011 гг. // *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*. 2017. Т. 53. № 2. С. 223–231.
68. *Агеева В.Ю., Груздев А.Н., Елохов А.С., Мохов И.И., Зуева Н.Е.* Внезапные стратосферные потепления: статистические характеристики и влияние на общее содержание NO₂ и O₃ // *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*. 2017. Т. 53. № 5. С. 545–555.
69. *Груздев А.Н., Агеева В.Ю., Елохов А.С.* Изменения вертикального распределения и общего содержания NO₂ под действием внезапных стратосферных потеплений // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана*. 2018. Т. 54. № 4. С. 417–427. doi: 10.1134/S0002351518040077
70. *Груздев А.Н., Исаков А.А.* О природе долгопериодных вариаций массовой концентрации приземного аэрозоля // *Оптика атмосферы и океана*. 2015. Т. 28. № 9. С. 810–815.
71. *Груздев А.Н.* Изменения температуры и циркуляции атмосферы в 11-летнем цикле солнечной активности по данным реанализа ERA-Interim // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана*. 2017. Т. 53. № 4. С. 502–511.
72. *Груздев А.Н., Безверхний В.А., Шмидт Х., Брассёр Г.П.* Влияние вариаций уровня солнечной активности на динамические процессы в атмосфере: анализ эмпирических данных и моделирование / В сб. «Турбулентность, динамика атмосферы и климата», ред. Голицын Г.С., Мохов И.И., Куличков С.Н., Курганский М.В., Репина И.А., Чхетиани О.Г., 2018. М.: Физматкнига. С. 213–221.
73. *Gruzdev A.N., Bezverkhniy V.A.* Analysis of relation of Central England surface air temperature to the 11-year solar cycle // *Proc. SPIE*. 2018. V. 108333. P. 1083376-1-1083376-5.
74. *Груздев А.Н., Чернокульский А.В.* Тренды и эффект солнечного цикла в характеристиках арктической облачности по результатам многолетних наблюдений // *Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы: Материалы XXIII Международного симпозиума*. Томск: Издательство ИОА СО РАН. 2017. С. D387–D390.
75. *Груздев А.Н.* Учет сериальной корреляции при анализе геофизических данных методом множественной линейной регрессии / В сб. «Турбулентность, динамика атмосферы и климата», ред. Голицын Г.С., Мохов И.И., Куличков С.Н., Курганский М.В., Репина И.А., Чхетиани О.Г., 2018. М.: Физматкнига. С. 333–342.
76. *Sapozhnikova V.A., Ageev B.G., Gruzdev A.N., Ponomarev Yu.N.* Cyclic variations of gas components in tree-ring chronologies as response to climatic cycles // *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci*. 2018. V. 211. 012039. P. 1–8. doi: 10.1088/1755-1315/211/1/012039
77. *Gruzdev A.N., Schmidt H., Brasseur G.P.* The effect of the 27-day solar cycle on the wave activity of the atmosphere calculated by a chemistry-climate model // *Proc. SPIE*. 2018. V. 108333. P. 1083399-1-1083399-5. doi: 10.1117/12.2502979
78. *Агеева В.Ю., Груздев А.Н., Елохов А.С.* Увеличение стратосферного содержания NO₂ по результатам наземных наблюдений после солнечного протонного события в октябре 2003 г. // *Доклады*

- АН. 2018. Т. 479. № 6. С. 688–691. doi: 10.7868/S0869565218120174
79. Mironova I.A., Aplin K.L., Arnold F., Bazilevskaya G.A., Harrison R.G., Krivolutsy A.A., Nicoll K.A., Rozanov E.V., Turunen E., Usoskin I.G. Energetic particle influence on the Earth's Atmosphere // Space. Sci. Rev. V. 194. P. 1–96. 2015. doi: 10.1007/s11214-015-0185-4
80. Mironova I., Bazilevskaya G., Kovaltsov G., Artamonov A., Rozanov E., Mishev A., Makhmutov V., Karagodin A., Golubenko K. Spectra of high energy electron precipitation and atmospheric ionization rates retrieval from balloon measurements // Science of the Total Environment. 2019. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.07.048
81. Mironova I.A., Artamonov A.A., Bazilevskaya G.A., Rozanov E.V., Kovaltsov G.A., Makhmutov V.S., Mishev A., Karagodin A.V. Ionization of the polar atmosphere by energetic electron precipitation retrieved from balloon measurements, Geophys. Res. Letters. 2019 V. 46. P. 990–996. https://doi.org/10.1029/2018GL079421
82. Karagodin A., Mironova I., Artamonov A., Konstantinova N. Response of the total ozone to energetic electron precipitation events // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. 180. P. 153–158. 2018. https://doi.org/10.1016/j.jastp.2017.12.009
83. Artamonov A., Mironova I., Kovaltsov G., Mishev A., Plotnikov E., Konstantinova N. Calculation of atmospheric ionization induced by electrons with non-vertical precipitation: Updated model CRAC-EPII // Advances in Space Research. 59 (9). P. 2295–2300. 2017. https://doi.org/10.1016/j.asr.2017.02.019

Results of Russian studies of the middle atmosphere (2015–2018)

A. A. Krivolutsky^{1*}, A. I. Repnev¹, I. A. Mironova², A. N. Gruzdev³, T. I. Tuniyants¹

¹Central Aerological Observatory

Pervomayskaya ul., 3, Dolgoprudny, Moscow region, 141700, Russia

²Saint Petersburg State University

Ulyanovskaya ul., 3, Saint Petersburg, Petergof, 198504, Russia

³A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics RAS

Pyzhevski per, 3, Moscow, 119017, Russia

E-mail: *alexei.krivolutsky@rambler.ru

Received: 11.07.2019

Accepted: 07.08.2019

An overview of the results of Russian studies of the average atmosphere in 2015–2018, prepared by the Commission on the average atmosphere of the Section of meteorology and atmospheric Sciences of the National geophysical Committee for the National report on meteorology and atmospheric Sciences to the XXVII General Assembly of the International Union of Geodesy and Geophysics (Canada, 2019).

Keywords: middle atmosphere, temperature, dynamics, chemical composition, solar activity, atmospheric models.