

УДК 551.590.21;551.510.4;551.510.534;550.388.2

РОССИЙСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СРЕДНЕЙ АТМОСФЕРЫ В 2019–2022 гг.

© 2023 г. А. А. Криволуцкий^{а, *}, С. В. Веретененко^б

^аЦентральная аэрологическая обсерватория Росгидромета, Первомайская ул., 3, Долгопрудный, 141701 Россия

^бФизико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Политехническая ул., 26, Санкт-Петербург, 194021 Россия

*e-mail: krivolutsky@mail.ru

Поступила в редакцию 30.08.2023 г.

После доработки 07.11.2023 г.

Принята к публикации 15.11.2023 г.

Представлен обзор результатов российских исследований средней атмосферы в 2019–2022 гг., подготовленный Комиссией по средней атмосфере Секции метеорологии и атмосферных наук Национального геофизического комитета для Национального отчета по метеорологии и атмосферным наукам к XXVIII Генеральной ассамблее Международного союза геодезии и геофизики (Германия, 2023 г.)*.

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

DOI: 10.31857/S0002351523070064, **EDN:** HQNVZS

ВВЕДЕНИЕ

Средняя атмосфера — область, расположенная выше тропосферы, между тропопаузой (приблизительно 10 км, эта высота зависит от широты, увеличиваясь к низким широтам и уменьшаясь с увеличением широты) и турбопаузой (приблизительно 100 км). Эта область, в отличие от более низких высот земной атмосферы, характеризуется тем, что находится под воздействием ультрафиолетовой радиации (УФ) Солнца, которое практически не проникает ниже и определяет как термическую структуру и динамический режим этой области, так и химический состав, инициируя процессы диссоциации и ионизации. В результате этих процессов возникает озоносфера и нижняя ионосфера, а также формируется глобальная циркуляция и температурный режим.

Состав средней атмосферы известен хорошо благодаря многочисленным измерениям разными методами, включая спутники и ракеты. Большинство малых составляющих (включая озон) возникают при фотодиссоциации основных составляющих и благодаря множеству дальнейших химических превращений. В современные фотохимические модели включают в настоящее время сотни реакций. Нужно сказать, что основа фотохимии озона была заложена в 1930 г. в работе С. Чепмена, в которой было использовано всего

несколько реакций кислородного цикла, приводящих к образованию озона. В то же время этот цикл является стержнем фотохимических расчетов и в настоящее время. В дальнейшем, по мере накопления данных измерений, выяснилось, что предложенная схема завышает озон и нужно включать реакции с участием окислов водорода, азота и другие малые составляющие, чтобы добиться лучшего согласования с наблюдениями.

Атомы и молекулы могут также ионизоваться либо коротковолновым солнечным излучением (УФ и рентгеновским), либо энергичными корпускулами в высоких широтах, при этом возникает ионосфера, которую принято делить на несколько слоев, основываясь на среднем высотном профиле электронной концентрации. Самая нижняя и сложная область ионосферы, область D, расположена на высотах 60–95 км, являясь, таким образом, важной частью средней атмосферы. В этой области ионизация главным образом обусловлена фотоионизацией молекул NO излучением в линии Лайман-альфа (121.6 нм). Ниже 70 км в ионизацию O₂ и N₂ вносят вклад высокоэнергичные космические лучи. Выше расположена область E, верхняя граница которой расположена на высоте 130 км. В слоях D и E электронная концентрация максимальна при наибольшей высоте Солнца над горизонтом. Ночью электроны практически полностью исчезают в области D, а их концентрация в E-области уменьшается в 100 раз. Следует сказать, что в области нижней ионосферы происходит существенное поглощение радиоволн, кото-

* Russian National Report. Meteorology and Atmospheric Sciences. 2019–2022. Edited by I.I. Mokhov and A.A. Krivolutsky. National Geophysical Committee RAS. Moscow: MAKSS Press. 2023.

рое резко увеличивается в периоды протонных вспышек на Солнце.

Важную роль в этой области играют также атмосферные волны разных масштабов и периодов. Физическая природа этих волн различна. Гироскопическая устойчивость атмосферы приводит к формированию глобальных планетарных волн (волн Россби), которые в нижних слоях определяют погодные процессы. По мере распространения этих волн в более высокие слои эти волны оказывают воздействие на среднее движение и температуру.

Еще одним фактором воздействия на среднюю атмосферу являются внутренние гравитационные волны (ВГВ), длина волны которых составляет примерно 100 км, по контрасту с очень большими планетарными волнами (длина волны порядка 10000 км). Предполагается, что ВГВ образуются в тропосфере за счет различных механизмов, включая взаимодействие воздушных потоков с подстилающей поверхностью. Их амплитуда растет с высотой по мере уменьшения плотности воздуха. На некоторой высоте амплитуда ВГВ может вырасти до таких размеров, что обусловленное ею возмущение температуры вызовет сверхадиабатический градиент, волна станет неустойчивой и разрушается. Выше этого уровня разрушение волны вызывает сильную турбулентность, которая предотвращает дальнейший рост волны. Разработанные параметризации этого процесса дают разумные значения коэффициента турбулентной диффузии на этих высотах.

Взаимодействие крупномасштабных тропосферных волн, в соответствии с теоретическими представлениями, поздней зимой и весной приводит к стратосферным потеплениям, сильному увеличению температуры стратосферы, которое сопровождается охлаждением мезосферы. В этих случаях стратопause может опускаться до 35 км, полярный перенос ослабевает и может даже поменять направление. Стратосферные потепления влияют также на годовое изменение озона и других химических составляющих.

Таким образом, средняя атмосфера охватывает широкий круг интересных явлений, которые начали относительно недавно (по сравнению с метеорологией) интенсивно изучаться мировым научным сообществом. Здесь нужно вспомнить организацию крупного международного проекта в области планетарной геофизики – Международной программы средней атмосферы MAP (Middle Atmosphere Program), в которой участвовали более 40 стран (включая СССР). К настоящему времени изменились как средства измерений, так и методы исследований, включая наблюдения со спутников, в тоже время актуальность этой, по существу продолжающейся программы, не вызывает сомнений.

В данный обзор включены работы российских авторов (иногда в соавторстве с зарубежными коллегами), посвященные результатам исследований средней атмосферы, полученным в период 2019–2022 гг.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

1. Температура

В работе [Данилов и Константинова, 2020] дан обзор основных публикаций последних восьми лет, посвященных выделению долговременных трендов параметров средней атмосферы, термосферы и ионосферы. Показано, что в средней атмосфере отрицательные тренды температуры надежно установлены на основании наблюдений различными методами. В термосфере имеются результаты анализа орбит спутников, дающие отрицательные тренды плотности на высотах ~400 км. Неожиданно высокие отрицательные тренды ионной температуры T_i получены методом некогерентного рассеяния выше ~220 км. На высотах слоя $F1$ те же измерения дают высокие положительные тренды T_i . Есть расхождения в оценках абсолютной величины отрицательных трендов критической частоты и высоты слоя $F2$, но по мнению авторов эти тренды достаточно высоки.

В работе [Данилов и Бербенева, 2021] показано, что в настоящее время наблюдаются тренды параметров средней и верхней атмосферы и ионосферы, которые уже приводят или могут в обозримом будущем привести к изменениям в этих сферах. Указаны тренды этих параметров, которые, на взгляд авторов, уже сейчас имеют выход на прикладные задачи. В средней атмосфере это – увеличение количества паров воды, которое может повлиять на судьбу озонового слоя. Оно объясняет также рост явлений полярных мезосферных летних эхо, беспокоящих оборонные ведомства. Там же происходит изменение системы ветров и усиление проникновения внутренних волн в ионосферу. Это должно приводить к существенному усилению “метеорологического контроля” ионосферы. Тренды плотности на спутниковых высотах уже сейчас приводят к увеличению времени жизни объектов “космического мусора” и повышению вероятности их столкновения с космическими аппаратами. Отрицательный тренд количества атомного кислорода в термосфере указывает, скорее всего, на усиление турбулентной диффузии. Видимо, это потребует корректировки термосферных моделей, используемых для многих прикладных задач. Отрицательные тренды температуры ионов в ионосфере могут уже сейчас влиять на работы систем глобального позиционирования. Тренды полного содержания электронов и приведенной толщины ионосферы связаны с корректировкой систем позиционирования и других подобных систем. Обнаружено, что про-

исходит “опускание” уровней постоянных величин N_e в области D . Это должно учитываться в системах, использующих распространение радиоволн СДВ- и ДВ-диапазонов. Тренды критической частоты слоя F_2 могут уже в ближайшее время привести к изменениям foF_2 , которые, как показывают расчеты, значительно влияют на параметры радиотрасс КВ-диапазона.

В работе [Jakovlev et al., 2021] на основе данных реанализа MERRA2, ERA5, Met Office и численного моделирования с помощью химико-климатической модели (ХКМ) нижней и средней атмосферы за 1980–2019 гг. изучено влияние температуры поверхности моря (SST) на температуру нижней тропосферы и нижней стратосферы в тропических, средних и полярных широтах. Изменчивость температуры поверхности моря анализируется по данным Met Office и ERA5, а изменчивость температуры атмосферы – по данным MERRA2 и ERA5. Анализ трендов температуры поверхности моря по данным реанализа показал, что на земном шаре наблюдается значительный положительный тренд SST, составляющий около 0.1 градуса за десятилетие. В средних широтах северного полушария этот тренд (около 0.2 градуса за десятилетие) в 2 раза превышает среднемировой и в 5 раз – тренд в Южном полушарии (около 0.04 градуса за десятилетие). В полярных широтах наблюдаются противоположные тренды SST в Арктике (положительный) и Антарктике (отрицательный). Обсуждается влияние явления Южного колебания Эль-Ниньо на температуру нижней и средней атмосферы в средних и полярных широтах северного и южного полушарий. Для оценки относительного влияния изменчивости SST, CO_2 и других парниковых газов на температуру нижней тропосферы и нижней стратосферы были проведены численные расчеты с использованием ХКМ для нескольких сценариев учета изменчивости SST и углекислого газа. Результаты численных экспериментов с ХКМ показали, что в тропосфере преобладает влияние SST, а для стратосферы наиболее важную роль играет увеличение содержания CO_2 .

В работе [Переведенцев и др., 2019] рассмотрены характеристики пространственно-временной изменчивости температуры воздуха и массовой доли озона на 26 изобарических поверхностях от уровня земли до высоты 64 км с использованием данных реанализа ERA-Interim за 1979–2016 гг. Выявлены различия в распределении трендов температуры воздуха между сезонами и широтными зонами, Атлантико-Европейским, Азиатско-Тихоокеанским и Американским секторами умеренной зоны Северного полушария, между термическим режимом над сушей и океаном; дана оценка взаимосвязей между слоями, атмосферных циркуляционных мод в разные сезоны.

В работе [Куминов и др., 2021] приведено краткое описание технических характеристик ме-

теорологических ракет, используемых на станциях Росгидромета, включая описание новой метеорологической ракеты МЕРА с высотой подъема до 100 км, метеорологического ракетного зонда МРЗ 100, бортовой измерительной и служебной аппаратуры. Рассмотрены методика измерений атмосферных параметров и результаты исследований долговременной изменчивости температуры и ветра в стратосфере и мезосфере по многолетним (1969–1995 гг.) данным метеорологического ракетного зондирования на станции Волгоград. Показано, что в интервале высот от 25 до 75 км тренды температуры и скорости ветра над станцией ракетного зондирования атмосферы Волгоград в 1969–1995 гг. являются нелинейными и на большинстве высот немонокотонными. Обнаружено увеличение значений размаха трендовых вариаций анализируемых параметров в обозреваемом периоде с высотой: температуры – до 15–19 К в нижней и средней мезосфере, зонального компонента скорости ветра – до 15 м/с в стратопause, меридионального компонента – до 10 м/с в нижней мезосфере.

В работе [Merzlyakov et al., 2021] авторы оценили температуру по данным метеорных радиолокационных измерений с использованием градиентного метода и метода полной ширины на половине максимума (FWHM) над Казанью (56° N, 49° E) и Колмом (51° N, 13° E). Временные ряды охватывают период 2016–2019 гг. Модель температурного градиента построена по данным температурных наблюдений прибора SABER. Авторы показывают, что среднегодовые значения, амплитуды и фазы годовых и полугодовых колебаний радарных температур близки к соответствующим характеристикам для температур MLS и SABER. Среднегодовые температуры над Казанью и Колмом отличаются незначительно. Сезонная изменчивость радиолокационной температуры в основном связана с годовым циклом, который имеет тенденцию к увеличению с широтой. Градиентный метод дает температуры, которые лучше согласуются с температурами SABER, чем с температурами MLS. Гармоники годовых колебаний с периодами от 73 дней до периодов около 40 дней являются наиболее значимыми суточными колебаниями температуры и имеют зональное волновое число, равное нулю. Их периоды и фазы хорошо согласуются с периодами и фазами приборов MLS и SABER. Авторы также приводят некоторые результаты, показывающие, что на 56°N метод FWHM не столь надежен, как градиентный метод.

В работе [Popov et al., 2020] для анализа данных спектральных наблюдений вращательной температуры и интенсивности эмиссии колебательно возбужденного гидроксила (OH^*) на высотах 85–90 км на обсерваториях Звенигород (56°N, 37°E) за 2004–2016 гг. и Торы (52°N, 103°E) за 2012–2017 гг. использовались цифровые разностные фильтры. Получены среднемесячные значения и стандарт-

ные отклонения мезомасштабных возмущений характеристик эмиссии OH^* с периодами 0.8–11 ч. Эти мезомасштабные возмущения могут отражать внутренние гравитационные волны (ВГВ) в области мезопаузы. Для фильтрации мезомасштабных возмущений были получены разности между последовательными значениями характеристик эмиссии OH^* , усредненные по интервалам длительностью от 0.5 до 2 ч. Среднемесячные вариации мезомасштабных возмущений вращательной температуры OH^* , полученные в Торы, больше, чем в Звенигороде. Среднесезонные изменения относительных мезомасштабных вариаций демонстрируют максимумы зимой и летом, причем летний максимум смещен ближе к весенним месяцам для станции Торы. Причинами различий могут быть разные орография и струйные течения в нижней и средней атмосфере, а также разные спектры горизонтальных длин волн ВГВ, обусловленные разной геометрией наблюдений в Торы и Звенигороде.

Когерентные во времени мезомасштабные возмущения вращательной температуры возбужденного гидроксила (OH^*) часто используются как индикатор волновых процессов в мезосфере и нижней термосфере. Для определения мезомасштабной составляющей с периодами в диапазоне 0.8–11 ч в исследовании [Попов и др., 2022] применяются цифровые фильтры, использующие разности измеряемых значений, сдвинутых по времени на фиксированные интервалы, меняющиеся в пределах от 10 мин до 2 ч. Среднемесячная интенсивность мезомасштабных вариаций пропорциональна дисперсии указанных разностей, регистрируемых в течение каждого календарного месяца измерений. Эти дисперсии содержат не только информацию о когерентных мезомасштабных процессах, но также некогерентный во времени шум инструментальной и турбулентной природы. Разработан и применен статистический метод анализа структурных функций анализируемых характеристик ночных свечений для оценки дисперсии некогерентного случайного шума. Эти оценки вычитаются из измеряемой среднемесячной дисперсии мезомасштабных разностей в целях получения информации об интенсивности когерентных мезомасштабных процессов вблизи мезопаузы. Вычитание дисперсии некогерентного шума не меняет характера сезонных вариаций во всех спектральных интервалах, но уменьшает значения мезомасштабных стандартных отклонений на 10–20%. Предлагаемая коррекция позволяет лучше выявить особенности сезонных и межгодовых изменений когерентных мезомасштабных возмущений в различных диапазонах частотного спектра.

В работе [Medvedeva et al., 2019] представлены результаты исследования поведения температуры и концентрации атомарного кислорода в области мезопаузы во время мажорного внезапного стра-

тосферного потепления (ВСП) в январе 2013 года. Анализировались данные по интенсивности эмиссии на длине волны 834.0 нм и вращательной температуре молекулы гидроксила $\text{OH}(6-2)$. Эти данные получены в результате спектрометрических измерений в Геофизической обсерватории Института солнечно-земной физики СО РАН (51.8°N, 103.1°E, Торы) и на станции Звенигород Института физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН (55.7°N, 36.8°E). Используя данные измерений эмиссии OH , авторы рассчитали концентрацию атомарного кислорода и ее вариации. Выявлено, что отклик характеристик мезопаузы для двух разнесенных по долготе среднеширотных областей существенно различается. Так, по данным станции Торы максимальное увеличение интенсивности эмиссии OH (в ~ 2 раза) и концентрации $[\text{O}]$ (в ~ 3 раза) произошло в процессе развития внезапного стратосферного потепления (ВСП), тогда как по данным станции Звенигород, увеличение интенсивности эмиссии OH (в ~ 3 раза) и концентрации $[\text{O}]$ (в ~ 3.5 раза) наблюдалось на этапе восстановления ВСП. В результате численного моделирования с использованием модели средней и верхней атмосферы (MUAM) было показано, что причиной выявленного эффекта могут быть долготные различия в суточной вариации вертикального ветра на высотах мезопаузы над указанными станциями во время ВСП. Эти различия можно объяснить генерацией немигрирующих приливов в результате нелинейного взаимодействия усиленной стационарной планетарной волны 1 (СПВ1) с мигрирующими приливами и формирования набора высокочастотных ПВ на стратосферных высотах. Все эти волны способны распространяться в область MLT и вызывать наблюдаемые изменения интенсивности эмиссии OH , температуры и концентрации атомарного кислорода над станциями Торы и Звенигород.

Летняя область мезопаузы (высоты 82–92 км), самое холодное место в земной атмосфере, подвержена влиянию внешних воздействий, включая лунные. В работе [Перцев и др., 2021] гармоники лунных приливов выделяются из рядов температуры излучающего слоя гидроксила (OH^*), полученных из спектрофотометрических измерений на Звенигородской научной станции Института физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН в летние сезоны 2000–2016 гг. Температуры OH^* являются средневзвешенными в слое толщиной ~ 9 км, имеющего максимум на высоте ~ 87 км. Анализ позволил выделить лунные колебания, среди которых две гармоники идентифицируются впервые в температуре области мезопаузы. Данные колебания распознаются как вторая гармоника аномалистического прилива (средний период ~ 13.78 сут), а также лунный прилив с периодом в 8 ч 17 мин или в альтернативной интерпретации —

третья гармоника лунного синодического месяца (~9.84 сут).

В работе [Яковлев и Смышляев, 2019] представлено описание взаимосвязи атмосферы и океана. Проанализированы данные реанализа MERRA, JRA, ERA-Interim и ERA20 Century, а также результаты расчетов с помощью химико-климатической модели ХКМ по среднемесячным значениям температуры воздуха и отношения смеси для озона на изобарических поверхностях 925 и 20 гПа за период с 1980 по 2015 г. Проведено сравнение с данными о температуре поверхности океана. Результаты моделирования хорошо согласуются с данными реанализа для приземного слоя атмосферы, тогда как для стратосферы имеются существенные различия, которые требуют более детального анализа. По результатам моделирования наблюдается повышение температуры в приземном слое и уменьшение температуры и отношения смеси для озона в стратосфере. Данные реанализа не противоречат результатам моделирования в тропосфере, но в стратосфере значительно расходятся.

В работе [Варгин и др., 2021] по результатам пяти 50-летних расчетов с 5-й версией совместной климатической модели ИВМ РАН показано, что зимние сезоны с явлением Эль-Ниньо характеризуются более высокой температурой арктической стратосферы по сравнению с сезонами с Ла-Нинья. Зимним сезонам с положительными аномалиями температуры поверхности в северной части Тихого океана соответствует более низкая температура стратосферы в арктических районах по сравнению с сезонами с отрицательными аномалиями температуры воды.

В работе [Belyaev, 2019] моделируются тепловые изменения в фоновой атмосфере под воздействием “горизонтально движущегося” турбулентного пятна. Автор разделяет процесс взаимной перестройки турбулентного пятна и фоновой атмосферы на две стадии: (i) Быстрый переход от высокого к низкому уровню устойчивости атмосферы в пределах турбулентного пятна, вызванный сильным адиабатическим перемешиванием в “движущемся” турбулентном пятне. (ii) Медленная перестройка фоновой атмосферы к квазистабильзированной, близкой к адиабатической термической стратификации внутри турбулентного пятна. В рамках первого этапа, предполагающего существование фонового нисходящего теплового потока, автор разработал краевую задачу для неоднородного уравнения теплопроводности, учитывающего турбулентный диссипативный нагрев и перемешивание. Эта двухточечная краевая задача была решена аналитически с применением метода Фурье (разделение переменных) для толщины турбулентного пятна. Полученное решение стремится к равновесию по мере увеличения расстояния от передней границы “движущегося” турбулентного пятна. В рамках

второго этапа автором была решена задача о тепловой связи двух теплообменных доменов, один из которых характеризуется высоким коэффициентом теплоотдачи. Решение этой задачи легло в основу предположения о том, что тепловая структура турбулентного пятна не изменяется под воздействием внешней атмосферы, а внешняя атмосфера медленно охлаждается над турбулентным пятном и медленно нагревается под ним. В результате показано, что модельные температурные профили имеют те же особенности, что и наблюдаемые в мезосферных инверсионных слоях (МИС): инверсии температуры и почти адиабатический вертикальный градиент температуры между ними.

В статье [Bakhmetieva and Grigoriev, 2022] представлен краткий обзор исследований ионосферы Земли на высотах мезосферы и нижней термосферы методом, основанным на создании искусственных периодических неоднородностей (ИПН) ионосферной плазмы высокочастотным излучением от мощных тепловых установок. ИПН создаются стоячей волной в результате интерференции распространяющихся вверх радиоволн с отраженными от ионосферы. Исследования ИПН в ионосфере основаны на брэгговском рассеянии зондирующих импульсных сигналов от искусственной периодической структуры. Метод позволяет измерять параметры нейтральной и ионизированной составляющих атмосферы Земли. Отметим, что несмотря на то, что метод ИПН предполагает искусственное возмущение ионосферной плазмы, параметры мезосферы и нижней термосферы определяются на стадии релаксации неоднородности и характеризуют невозмущенную среду. К настоящему времени периодические неоднородности наблюдались на установках для нагрева ионосферы Зименки и Сура (SURA, Васильсурск, Россия), Гиссар (Таджикистан), Аресибо (Пуэрто-Рико, США), HIPAS (High Power Auroral Stimulation) и HAARP (High Frequency Active Auroral Research Program, Гакона, Аляска, США), EISCAT (European Incoherent Scatter, Тромсе, Норвегия). Большинство исследований ионосферы с помощью ИПН проводилось на среднеширотной нагревательной установке SURA (56.1° N; 46.1° E). В обзоре представлены основные результаты определения параметров ионосферы и нейтральной атмосферы на высотах 60–120 км, а также исследования атмосферы во время восходов и заходов Солнца и солнечных затмений. На самом деле обзор далеко не полностью иллюстрирует возможности использования метода ИПН для изучения мезосферы и нижней термосферы.

2. Состав средней атмосферы

В работе [Yankovsky et al., 2019] представлены методы определения высотных профилей концентраций атомарного кислорода [$O(^3P)$], озона [O_3] и углекислого газа [CO_2] в дневной мезосфе-

ре и нижней термосфере (MLT) в рамках модели электронно-колебательной кинетики кислорода YМ2011. В качестве косвенных индикаторов $[O(^3P)]$, $[O_3]$ и $[CO_2]$ используются эмиссии синглетных молекул кислорода $O_2(b^1\Sigma_g^+, v \leq 2)$, $O_2(a^1\Delta_g, v = 0)$ и атома $O(^1D)$. Для всех предложенных методик авторы сравнивают значения неопределенности найденных $[O(^3P)]$, $[O_3]$ и $[CO_2]$, полученные методом Монте-Карло, с оценками, полученными методом анализа чувствительности в более ранних работах. Для всех описанных выше методов получения профилей $[O(^3P)]$, $[O_3]$ и $[CO_2]$ авторы получили аналитические выражения, включающие концентрации возбужденных веществ, рассматриваемых в качестве прокси. Кроме того, по результатам численных экспериментов методом Монте-Карло были определены оптимальные диапазоны высот для использования этих методов дистанционного зондирования.

В работе [Куликов и др., 2022] приведены результаты одновременного микроволнового мониторинга содержания озона в средней атмосфере в Апатитах ($67^\circ N$, $33^\circ E$) и Петергофе ($60^\circ N$, $30^\circ E$) в течение зимы и весны 2021/22 г. Для измерения содержания озона использованы идентичные мобильные микроволновые спектрометры с рабочей частотой 110.8 ГГц. Методики наблюдений и оценки вертикальных профилей O_3 в интервале высот 22–60 км для данных приборов одинаковые. Основное внимание уделено изменениям содержания озона (суточному ходу) в мезосфере во время полярной ночи и динамических возмущений. Для интерпретации изменений концентрации озона на высоте 60 км использованы бортовые спутниковые данные MLS/“Aura” о распределении температуры по высоте в средней атмосфере над Апатитами.

В работе [Kulikov et al., 2022] на основе данных наблюдений прибора SABER (Sounding of the Atmosphere using Broad band Emission Radiometry) на борту спутника TIMED (Thermosphere Ionosphere Mesosphere Energetics and Dynamics) в 2003–2015 гг. получено распределение атомарного кислорода и атомарного водорода в области мезопаузы (~ 77 – 100 км) для дневных условий с учетом реакции озона с атомарным водородом в уравнении баланса озона (УБО). Затем были рассчитаны дневные распределения OH , HO_2 и соответствующая суммарная скорость химического нагрева (СХН) от семи экзотермических химических реакций. Новизна подхода заключается в том, что для процедуры извлечения авторы впервые учитывают реакцию $H + O_3 \rightarrow O_2 + OH$ в дневном УБО. Показано, что пренебрежение этой реакцией мало влияет на распределение H , но приводит к занижению значений O и СХН (до ~ 35 – 40%) и завышению значений HO_2 и OH (до ~ 50 – 85%).

В работе [Bakhmetieva et al., 2020] представлены результаты экспериментов по исследованию нижней ионосферы Земли на мезосферных высотах путем создания искусственных периодических неоднородностей (ИПН) ионосферной плазмы и одновременного измерения спектра излучения атмосферы в линии озона методом наземной микроволновой радиометрии при возмущении ионосферы мощным высокочастотным радиоизлучением от среднеширотной нагревательной установки SURA ($56.15^\circ N$; $46.11^\circ E$). Диагностика ионосферы проводилась на основе измерения амплитуд и фаз сигналов, рассеянных периодическими неоднородностями в диапазоне высот 50–130 км. Для каждого сеанса нагрева продолжительностью 30 мин измерялись два спектра озона. Эти спектры сравнивались со спектрами, измеренными в периоды, когда нагрев был выключен. Во время сеанса нагрева ионосферы наблюдалось уменьшение интенсивности микроволнового излучения атмосферы в линии озона. Нижняя ионосфера характеризовалась интенсивной динамикой. Наблюдались быстрые вариации амплитуды рассеянного сигнала и времени релаксации искусственных периодических неоднородностей. Скорость регулярного вертикального движения в D-области ионосферы постоянно меняла направление со средними значениями до 4–5 м/с. Предположено, что уменьшение спектра эмиссии озона на высоте 60 км можно объяснить увеличением коэффициента присоединения электронов к молекулам кислорода во время сеансов нагрева. Нижняя граница области, обогащенной атомарным кислородом, была оценена по высотному профилю времени релаксации ИПН.

В работе [Куликов и др., 2020] изложены результаты исследования методом микроволновой радиометрии динамики содержания озона в средней атмосфере над Петергофом во время стратосферных потеплений для двух зим 2015–2016 и 2016–2017 гг. В наземных наблюдениях был использован мобильный микроволновый озонометр (рабочая частота 110.8 ГГц). Выполнены оценки вертикального распределения озона в области высот 22–60 км. Эти результаты были сопоставлены как с бортовыми данными об общем содержании озона и высотными профилями озона и температуры в средней атмосфере, так и с данными озонозондов. В средней атмосфере над Петергофом были отмечены значительные (в несколько раз) вариации содержания озона на высотах 40–60 км, которые были вызваны стратосферным потеплением минорного типа.

В работе [Тимофеев и др., 2021] отмечается, что важность контролирования общего содержания озона (ОСО) и ультрафиолетовой освещенности поверхностей является причиной постоянного мониторинга озоносферы с помощью различных наземных и спутниковых методов и

приборов. Глобальный мониторинг ОСО с 2015 г. осуществляется российским прибором ИКФС-2 на спутнике “Метеор-М” № 2. Эти измерения проводят в течение полных суток и в условиях полярной ночи. Разработанный алгоритм, основанный на использовании искусственных нейронных сетей и спутниковых измерений прибора ОМІ, периодически уточняется и позволяет в среднем определять ОСО с суммарной погрешностью 3–5%. Данные измерений ИКФС-2 можно использовать для анализа пространственных и временных (сезонных, межгодовых) вариаций озона, долговременных трендов его содержания, проверки современных численных моделей стратосферы, изучения аномалий содержания озона и т.д. Приведены примеры анализа ОСО в осенние и зимне-весенние периоды и аномалий ОСО зимой и весной 2020 г., наглядно показывающие преимущества спутниковых измерений ОСО методом теплового излучения.

В работе [Никитенко и др., 2022] проведено сопоставление измерений содержания CO_2 в нижней стратосфере (слой 12–18 км) по данным наземных измерений ИК Фурье-спектрометром Bruker 125 HR и спутниковых измерений прибором ACE в период 2009–2019 гг. Анализ двух типов измерений показал, что между ними наблюдается хорошее согласие. В среднем данные наземных измерений CO_2 превышают спутниковые на 2.8 ppm (менее 1%), стандартные отклонения составляют ~5.0 ppm. Коэффициент корреляции между результатами измерений двумя методами 0.77. Наземные и спутниковые данные демонстрируют слабые сезонные вариации, которые противоположны сезонным вариациям CO_2 в тропосфере: в нижней стратосфере максимальные значения содержания CO_2 наблюдаются летом, а минимальные — зимой.

В работе [Никифорова и др., 2019] по данным отечественной сети фильтровых озонметров М-124 и результатам спутникового мониторинга исследована изменчивость общего содержания озона в Арктике в зимний сезон 2015/2016 г. Проанализировано развитие в конце января 2016 г. первой за всю историю наблюдений озоновой мини-дыры, возникшей в первом полугодии. Представлен анализ причин наблюдавшейся изменчивости общего содержания озона над территорией России в первом квартале 2016 г., проведено сопоставление со значительными озоновыми аномалиями в Арктике в 1996/1997 и 2010/2011 гг.

В работе [Варгин и др., 2020б] проведено исследование изменчивости параметров антарктической озоновой аномалии с использованием данных спутникового мониторинга озонового слоя TOMS/OMI, реанализа MERRA-2 и баллонного зондирования вертикального распределения озона и температуры на Южном полюсе. Анализируются динамические процессы в стратосфере

Антарктики, определяющие условия для сильного разрушения озонового слоя, которое за последние 8 лет, несмотря на уменьшение концентраций озоноразрушающих веществ, наблюдалось в Антарктике в 2011 и 2015 гг.

В работе [Кропоткина и др., 2019] представлены результаты наземных микроволновых измерений профилей стратосферного озона над Москвой в холодные полугодия 2014–2015 и 2015–2016 гг., рассмотрены причины наблюдавшихся изменений озона в верхней стратосфере. Зимой 2014–2015 гг. отмечались повышенная активность планетарных волн, большие перепады температуры в начале зимы и пониженные температуры с января по март. Полярный вихрь был неглубоким и долгоживущим, в феврале–марте холодный воздух вихря находился над Москвой. Это привело к сильной отрицательной корреляции измеренного содержания озона с температурой. Наибольшее содержание озона на уровне 2 мбар наблюдалось в середине марта. Напротив, в ноябре–декабре 2015 г. при меньшей активности планетарных волн возник интенсивный полярный вихрь, который был полностью разрушен мажорным финальным потеплением в начале марта 2016 г. Вариации озона в верхней стратосфере над Москвой в декабре 2015 г. и январе 2016 г. были связаны с чередованием воздушных масс вихря и областей вне вихря. В начале 2016 г. более высокие температуры (по сравнению с началом 2015 г.) привели к пониженному содержанию озона. Межгодовое различие содержания озона в первой половине марта превысило 40% от среднемесячного.

Зимой–весной 2019–2020 гг. наблюдалась самая значительная озоновая аномалия в Арктике за всю историю наблюдений. Она была обусловлена необычайно сильным и продолжительным полярным вихрем, повлекшим беспрецедентное химическое разрушение озона. В работе [Баженов, 2021] анализ данных Aura OMI/MLS показал, что общее содержание озона неуклонно сокращалось и составило 230 е.Д. 18 марта в пункте Алерт, 222 е.Д. 18 марта в Эврике, 229 е.Д. 20 марта в Туле и 226 е.Д. 18 марта в Резольют. Минимальная температура была на 9–10% ниже нормы с декабря по апрель в стратосфере над Томском и Арктикой. Концентрация озона уменьшалась до 4 и 6% от многолетней средней на высоте 20 км 27 марта в пункте Эврика и на высоте 19 км 16 апреля в пункте Нью-Олесунн, соответственно. Такое явление вписывается в контекст климатических изменений, ведущих к охлаждению стратосферы. До тех пор, пока уровень озоноразрушающих веществ в стратосфере Арктики не снизится до значений, ожидаемых от реализации Монреальского протокола, будет сохраняться опасность повторения подобных явлений в будущем. Исключительная изоляция вихря в 2020 г. значительно уменьшила его влияние на средние широты.

Зимой–весной 2010/2011 и 2019/2020 гг. наблюдались сильнейшие аномалии озонового слоя в стратосфере Арктики за всю историю спутниковых наблюдений. Они были вызваны чрезвычайно сильным и продолжительным стратосферным полярным вихрем, повлекшим беспрецедентное химическое разрушение озона. В работе [Баженов, 2022] анализ данных TEMIS показывает, что относительное отклонение общего содержания озона (ОСО) от многолетнего (2003–2019 гг., за исключением 2011 г.) среднего составило 37–44% в 2011 г. и 45–55% в 2020 г. на станциях наблюдения, расположенных в арктических широтах, и 27–36% в 2011 г. и 27–32% в 2020 г. – в субарктических. По данным Aura MLS, минимальные температуры над Арктикой были на 8–12% ниже нормы в 2011 г. и на 8–13% ниже нормы в 2020 г. Концентрация озона для ст. Алерт падала до 23% от многолетнего среднего на высоте 20 км 22 марта 2011 г. и до 6% на высоте ~ 19 км 15 апреля 2020 г. Детальный корреляционный анализ показал, что отклонения концентраций водяного пара и озона, водяного пара и температуры, озона и температуры от многолетних средних значений сильнее коррелируют в 2020, чем в 2011 г. Корреляции убывают к периферии вихря вследствие обмена воздушными массами между арктическими и средними широтами, а за пределами Северного полярного круга становятся малозначимы.

В наш ядерный век существуют опасения о судьбе озонового слоя Земли: считается, что как крупномасштабный, так и локальный конфликт с применением ядерного оружия способен на годы разрушить озоновый слой. 22 сентября 1979 г. официально не установленное государство скрытно выполнило ночные ядерные испытания в пустынном районе мирового океана. Это событие принято называть “Инцидент Вела”. В работе [Кашкин и др., 2022] использованы данные об озоне, полученные спутником НАСА Nimbus-7 через 16 мин 44 с после взрыва. Показано, что ударная волна оставляет “след” на озоновом слое. Уменьшения количества озона не замечено, по “следу” определены координаты места взрыва.

Динамические процессы и изменения озонового слоя в арктической стратосфере зимой 2019–2020 гг. анализировались в работе [Smyshlyaev et al., 2021] с использованием численных экспериментов с химико-транспортной моделью (ХТМ) и данных реанализа. Результаты численных расчетов с использованием ХТМ с динамическими параметрами, заданными по данным реанализа MERRA-2 (Modern Era Retrospective analysis for Research and Applications, version 2), проведенных для нескольких сценариев учета химического разрушения озона, продемонстрировали, что в изменения озона над выбранными станциями сети Всемирного центра данных по озону и ультрафиолетовому излучению (World Ozone and Ultraviolet Radiation Data Centre) как в

восточном, так и в западном полушариях, существенный вклад вносят как динамические, так и химические процессы. На основе численных экспериментов с ХТМ для конкретных динамических условий зимы–весны 2019–2020 гг. зафиксировано уменьшение озона до 100 единиц Добсона (DU) в восточном полушарии и более 150 DU в западном полушарии. При этом фотохимическое разрушение озона как в западном, так и в восточном полушарии в максимуме составляло около 50 DU с пиками в апреле в восточном полушарии и в марте–апреле в западном полушарии. Гетерогенная активация галогенных газов на поверхности полярных стратосферных облаков, с одной стороны, привела к резкому увеличению разрушения озона в хлорном и бромном каталитических циклах, а с другой – к уменьшению его разрушения в азотном каталитическом цикле. Анализ волновой активности с использованием 3D потоков Пламба показал, что усиление распространения восходящей волновой активности в середине марта над заливом Аляска наблюдалось на стадии развития минорного внезапного стратосферного потепления (ВСП), которое привело к смещению стратосферного полярного вихря к северу от Канады и уменьшению объема полярных стратосферных облаков.

В работе [Gabis, 2020] исследована межгодовая изменчивость общего содержания озона (ОСО) в экваториальной области (5° S–5° N) по спутниковым суточным и месячным данным за 1978–2018 гг. Связь изменений экваториального ОСО с квазидвухлетними осцилляциями (КДО) зонального ветра в экваториальной стратосфере известна давно. Однако детальный анализ ежедневных десезонированных данных ОСО на протяжении 15 полных циклов КДО ветра убедительно показал некоторые новые важные особенности КДО озона (Δ ОСО). Ключевые точки экваториальных вариаций Δ ОСО четко связаны с определенными моментами времени при распространении вниз от ~10 до ~70 гПа восточного и западного режимов КДО ветра. Экваториальный Δ ОСО заметно максимизируется, когда западный режим достигает ~70 гПа, а восточный режим появляется на ~10 гПа, что происходит одновременно. Времена минимумов экваториального Δ ОСО менее очевидны, что связано с появлением западного режима на уровне ~10 гПа на фоне незавершенного спуска восточного режима. Кроме того, сезонные закономерности КДО ветра обуславливают сезонную зависимость КДО озона в экваториальной области. Максимумы экваториального Δ ОСО определены наблюдаются вблизи месяцев солнцестояния (июнь или декабрь). Этот результат противоречит общепринятому мнению об отсутствии сезонной синхронизации КДО экваториального озона в отличие от сезонно синхронизированного внутропического озона. Однако совпадение максимумов экваториального Δ ОСО с солнцестояниями и, сле-

довательно, их повторяемость каждые 2–2.5 года позволяют прогнозировать экваториальное ОСО, основываясь на долгосрочном прогнозе КДО ветра. Представлен прогноз КДО озона на последующие примерно два года (2019–2021 гг.).

В работе [Габис, 2021] показано, что озоновая дыра, наблюдающаяся в Антарктике ежегодно в весенний период, развивается в результате комплексного воздействия фотохимических и динамических процессов. Повышенное содержание в атмосфере озоноразрушающих веществ является причиной многолетнего отрицательного тренда общего содержания озона, интенсивные межгодовые флуктуации которого, наблюдающиеся на фоне многолетнего тренда и связанные с динамическими атмосферными процессами, не позволяют однозначно оценить направление тренда (рост или спад) в последние годы. Изучение зависимости межгодовых флуктуаций интенсивности озоновой дыры от квазидвухлетних осцилляций зонального ветра в экваториальной стратосфере позволяет выделить естественные причины вариаций и оценить тренд, обусловленный антропогенными факторами. Долгосрочный прогноз квазидвухлетних осцилляций дает возможность прогноза зависящих от них различных явлений.

В работе [Цветкова и др., 2021] приведены оценки химического разрушения озона в зимне-весенние сезоны для стратосферы Арктики на базе многолетних данных наблюдений вертикального распределения озона. Проанализированы особенности и возможные причины необычайно сильного и устойчивого стратосферного полярного вихря в Арктике в зимний сезон 2019/2020 г., приведшего к рекордному за последние годы разрушению озонового слоя, и связанные с этим полярным вихрем динамические процессы. С использованием траекторной модели TRACAO и данных реанализа ERA5 проведен сравнительный анализ разрушения озона в полярном вихре в зимне-весенние сезоны 2010/2011 г. и 2019/2020 гг.

В работе [Смышляев и др., 2020] рассмотрена изменчивость общего содержания озона в Антарктике в период с 1980 по 2018 г. Проведен анализ трендов изменения содержания озона над Антарктикой в течение исследуемого периода, а также физических и химических процессов, влияющих на сезонную изменчивость содержания озона. Основное внимание уделено влиянию динамических процессов на устойчивость антарктического циркумполярного вихря, формированию полярных стратосферных облаков, а также влиянию газофазных и гетерогенных процессов на поверхности полярных стратосферных облаков и сульфатного аэрозоля. Методом исследования является анализ результатов наземных и спутниковых наблюдений и численное моделирование физических и химических процессов над Антарктикой с использованием глобальной модели состава ат-

мосферы с задаваемыми на основании данных реанализа динамическими параметрами.

В работе [Коршунов и др., 2018] приводятся результаты двухволнового лидарного зондирования средней атмосферы в диапазоне высот от 30 до 60 км над г. Обнинском (55.1° N, 36.6° E) в 2012–2017 гг. Усредненные по слоям 40–50 и 50–60 км среднемесячные значения отношения коэффициентов обратного аэрозольного и обратного рэлеевского рассеяний (ОКОАРР) на длине волны 532 нм изменяются от 0 до 0.02, в то время как средние пиковые уровни ОКОАРР в этих слоях варьируют от 0.1 до 0.2. Наблюдаются кратковременные (менее месяца) и долговременные (от полугода и более) вариации обратного рассеяния. Кратковременные вариации соотносятся по времени с прохождением метеорных потоков. Долговременное увеличение обратного рассеяния в слое 50–60 км наблюдалось в 2013 г. после падения Челябинского метеорита, а также в первом полугодии 2016 г. В 2014–2015 гг. среднемесячное ОКОАРР в пределах погрешностей было равно 0 на высотах от 40 до 60 км. Проведен анализ возможности проявления метеорного аэрозоля в обратном рассеянии с учетом потоков метеорного вещества, гравитационного осаждения аэрозоля и влияния вертикального ветра. Показано, что поток видимых метеоров с массой более 6–10 кг и болидов недостаточен для долговременного увеличения обратного рассеяния в слое 50–60 км. Предполагается, что наиболее вероятной причиной увеличения обратного рассеяния является формирование укрупненной фракции частиц метеорной дымки, образующихся при абляции радиометеоров и проникающих в верхнюю стратосферу в области полярного стратосферного вихря. В начале 2016 г. этому способствовали образование необычайно интенсивного полярного стратосферного вихря и его смещение в сторону Евразии.

В работе [Герасимов и др., 2019] пересмотрены результаты лидарного зондирования аэрозоля в стратосфере над Томском за период с 29 июня по 14 июля 1991 г., первоначально интерпретированные как аэрозольные слои после извержения вулкана Пинатубо. С помощью траекторной модели NOAA HYSPLIT показано, что аэрозольные слои, зарегистрированные 29 июня и 11 июля на высотах 12 и 14.2 км соответственно, являлись стратосферным дымовым шлейфом от крупных лесных пожаров, имевших место в июне 1991 г. в провинции Квебек (Канада). Продукты горения достигли стратосферы за счет конвективного подъема внутри пироккумулятивного облака (pyroCb), зарегистрированного 19 июня в 100 км к западу от г. Бэ-Комо (Квебек, Канада). Аэрозольные слои, наблюдаемые 8, 9 и 14 июля на высотах от 11 до 16.5 км, представляли собой суперпозиции дымового шлейфа от квебекского pyroCb и первых следов извержения вулкана Пинатубо.

В работе [Баженов и др., 2020] лидарные измерения на Сибирской лидарной станции (СЛС) Института оптики атмосферы СО РАН в Томске (56.5°N; 85.0°E) показали наличие стратосферных аэрозольных слоев, оседание воздушных масс и дефицита ОСО над городом зимой 2017–2018 гг. Данные Aura OMI/MLS указывали на то, что в декабре 2017 г.–январе 2018 г. общее содержание озона (ОСО) и содержание NO₂ в стратосфере над севером Евразии, а также температура в стратосфере были значительно ниже нормы. Анализ обратных траекторий и интегрального (по профилю) ОСО показал, что динамическое возмущение арктической стратосферы в декабре 2017 г. привело к вытеснению холодных воздушных масс с избыточным содержанием агрессивного хлора (ввиду дефицита NO₂) за пределы полярного круга и их вторжению в стратосферу Томска. По всей видимости, в стратосфере Томска они подверглись воздействию солнечного излучения и, оставаясь пространственно изолированными, перешли в химически возмущенное состояние, сходное с состоянием весенней стратосферы Арктики, в которой озон интенсивно разрушается вплоть до финального потепления.

В работе [Невзоров и др., 2021] представлены подекадно усредненные временные ряды общего содержания озона и интегрального коэффициента обратного аэрозольного рассеяния над Томском в период 2000–2016 гг., полученные с помощью озонметра М-124 и лидарным методом соответственно. Исследована взаимосвязь между ними. Из временных рядов рассматриваемого периода сформированы годовые ходы в виде подекадных значений (всего 36 точек) исследуемых параметров. Проведен анализ и выявлены отличия и подобия этих временных рядов.

В работе [Черемисин и др., 2021] рассматривается вынос в стратосферу аэрозоля горения от пожаров летом 2019 г., когда были зафиксированы многочисленные лесные пожары на территории Сибири, Канады и Аляски. По результатам лидарных наблюдений, проведенных в Томске в августе 2019 г., в нижней стратосфере были обнаружены явно выраженные слои аэрозольного рассеяния. Анализ результатов расчета обратных траекторий движения воздушных масс с привлечением радиометрической информации со спутников о пожарах в Северном полушарии, а также данных космического лидара со спутника CALIPSO позволяет утверждать, что наблюдаемые аэрозольные слои образовались в результате выноса в стратосферу продуктов горения при пожарах в Сибири.

В работе [Зуев и др., 2022a] показано, что в результате крупных извержений тропических вулканов в стратосферу выбрасывается большое количество вулканогенного аэрозоля, способствующего формированию положительных температурных и

отрицательных озоновых аномалий в нижней тропической стратосфере. Крупные извержения с индексом вулканической взрывчатости $VEI \geq 5$ способны вызывать глобальную депрессию озоносферы. Вулканогенное повышение температуры нижней тропической стратосферы приводит к увеличению стратосферного меридионального температурного градиента и последующему усилению полярного вихря. В условиях зимне-весеннего усиления вихря формируются полярные озоновые аномалии. Стратосферные аномалии озона вследствие усиления УФ-Б-радиации могут проявляться в деградации хвойных лесов, которые служат биосферным индикатором климатических изменений. Массовое очаговое усыхание темнохвойных лесов наблюдается в горных районах Южной Сибири с середины 1990-х гг. в условиях увеличения приземной УФ-Б-радиации в результате истощения озонового слоя после извержения вулкана Пинатубо.

В работе [Коршунов и Зубачев, 2022a] представлены результаты лидарного зондирования аэрозольной компоненты нижней мезосферы на длинах волн 355 и 532 нм на лидарных станциях Росгидромета с 2012 по 2021 г. С 2018 г. наблюдается заметный рост отношения обратного рассеяния R в высотном диапазоне 50–70 км. Средний уровень R на высоте 70 км в 2019–2020 гг. достигал 1.25. Измерения температуры рэлеевским методом на длине волны 532 нм в этот период дают завышенные значения температуры в мезосфере на величину до +20 К. Использование двухволнового метода измерения температуры компенсирует эту погрешность.

В работе [Черемисин и др., 2019] с помощью построения траекторий лагранжевых частиц проведен анализ переноса вулканического аэрозоля в атмосфере после извержения вулканов Гримсвотн и Набро в 2011 г. После извержения вулкана Гримсвотн не удалось достоверно выделить вулканический аэрозоль по данным лидарных наблюдений над Томском и Владивостоком на фоне существовавшего аэрозольного наполнения, так как в это время происходило сильное горизонтальное перемешивание в атмосфере Северного полушария. Вулканический аэрозоль, возникший после извержения вулкана Набро, отчетливо проявился в виде пиков аэрозольного рассеяния над Владивостоком и Томском. Это подтвердили данные космического лидара CALIPSO и результаты спутниковых измерений содержания диоксида серы прибором GOME-2. Прослежена динамика формирования эруптивного аэрозольного облака над Северным полушарием.

В работе [Маричев и Бочковский, 2021] приведены и проанализированы результаты наблюдений особенностей внутригодовой изменчивости вертикального распределения фонового аэрозоля в стратосфере над Западной Сибирью за 2016–2018 гг. Экспериментальные данные получены на лидар-

ном комплексе ИОА СО РАН с диаметром приемного зеркала 1 м. Исследования выполнены с целью изучения динамики фонового стратосферного аэрозоля, поскольку в данный период не было вулканических извержений, приводящих к заносу эруптивного аэрозоля в стратосферу. По результатам исследований подтвердился устойчивый внутригодовой цикл максимального аэрозольного наполнения стратосферы зимой, убывания весной до минимального, практического отсутствия летом и возрастания осенью. Вместе с тем отмечается изменчивость стратификации и наполнения аэрозоля для разных лет. Установлено, что аэрозоль в течение всего года, за исключением зимнего периода, концентрируется в слое до 30 км. Показано, что стратификация аэрозоля с высотой в значительной степени определяется термическим режимом пограничного слоя тропосферы – стратосферы. Отсутствие выраженной температурной инверсии – тропопаузы – способствует усилению тропосферно-стратосферного обмена и, как следствие, заносу аэрозоля в стратосферу. Указанная ситуация характерна для холодного периода года. Впервые по данным одностатотного лидарного зондирования получены оценки количественного содержания стратосферного аэрозоля – его массовой концентрации.

3. Циркуляция

В работе [Криволуцкий и др., 2021a] представлен обзор работ, выполненных в лаборатории химии и динамики атмосферы Центральной аэрологической обсерватории, по созданию и использованию глобальных численных моделей атмосферы. Модели созданы в рамках плановой тематики Росгидромета.

В работе [Vargin et al., 2022a] анализируются результаты моделирования на базе 5-й версии комбинированной климатической модели Института Вычислительной Математики (ИВМ) для периода с 2015 по 2100 гг. при умеренном (SSP2-4.5) и жестком (SSP5-8.5) сценариях роста парниковых газов для исследования изменений арктического стратосферного полярного вихря, распространения планетарных волн, частоты внезапных стратосферных потеплений, дат финальных потеплений, меридиональной циркуляции. Выявлены усиление распространения волновой активности и стационарной планетарной волны с волновым числом 1 в средней и верхней стратосфере, ускорение меридиональной циркуляции, увеличение среднего за зимний период объема полярных стратосферных облаков (V_{psc}) и усиление межгодовой изменчивости арктической стратосферы после середины XXI века, особенно по жесткому сценарию. Мартовские среднемесячные значения V_{psc} в отдельные зимы могут примерно в два раза превышать наблюдаемые в арктической стратосфере весной 2011 и 2020 гг., что,

в свою очередь, может привести к большому разрушению озонового слоя. Композитный анализ показывает, что “теплые” зимы с наименьшими среднезимними значениями V_{psc} характеризуются усилением распространения волновой активности из тропосферы в стратосферу в декабре, но более слабым распространением в январе-феврале по сравнению с зимами, имеющими наибольшие значения V_{psc} .

В статье [Шашкин и др., 2019] описаны работы по созданию версии глобальной полулагранжевой модели атмосферы ПЛАВ с высоким пространственным разрешением в стратосфере. Новая версия модели использует вертикальную сетку со 100 уровнями, с шагом 500 м в слое от 100 до 10 гПа и верхней границей на уровне 0.04 гПа. Внедрена параметризация неорографического гравитационно-волнового сопротивления. В блок численного решения уравнений динамики внесен ряд модификаций, повышающих устойчивость модели. Эксперимент по моделированию динамики атмосферы рассчитан на 28 лет. Показано, что модель ПЛАВ воспроизводит основные особенности циркуляции стратосферы, такие как формирование полярных стратосферных вихрей и внезапные стратосферные потепления; воспроизводятся также квазидвухлетние колебания экваториального ветра с реалистичными периодом и амплитудой.

В работе [Korotyshkin et al., 2019a] для изучения долготных структур ветра проанализированы среднеширотные скорости ветра мезосферы и нижней термосферы (MLT), измеренные двумя метеорными радарными (MP) SKiYMET в Колме (51° N, 13° E) и Казани (56° N, 49° E) в течение 2016–2017 гг. Разности между среднемесячными скоростями преобладающего ветра и амплитудами приливов сравнивались с соответствующими разностями, полученными по спутниковым данным ветра TIMED/TIDI и скоростям градиентного ветра по данным прибора AURA/MLS. Показано, что разность ветров MP между двумя пунктами статистически значима. Различия горизонтальных преобладающих ветров можно объяснить суперпозицией фонового зонального потока, который различается на двух широтах, со стационарными планетарными волнами различного происхождения. Существенный вклад в различие полусуточных приливных ветров между двумя точками вносят немигрирующие приливы.

В работе [Korotyshkin et al., 2019b] представлены новые данные по горизонтальному ветру метеорологического радара (MP), полученные в 2015–2018 гг. в Казани (56° N, 49° E). Измерения проводились с помощью современного метеорологического радара SKiYMET. Среднемесячные вертикальные профили зональной и меридиональной составляющих скорости преобладающего ветра, а также амплитуды и фазы составляющих суточного (DT) и полусуточ-

ного (SDT) приливного ветра, осредненные за исследуемый период, представлены в виде контурных графиков и сравниваются с распределениями этих параметров по данным предыдущих многолетних МР измерений в Казани (1986–2002 гг.) и по последней эмпирической модели HWM07. Анализ показывает, что зональные и меридиональные скорости преобладающего ветра SKiYMET в целом хорошо согласуются с сезонными ветрами, полученными ранее с помощью МР, и имеют те же сезонные особенности. Сравнение с моделью HWM07 не дает благоприятных результатов: согласно модели, ячейки направленных на восток ветров вблизи солнцестояний значительно больше, >30 м/с по сравнению с 15–20 м/с. Кроме того, линии разворота слишком меняются по высоте, а положения моделируемых ячеек (положительных и отрицательных) не похожи ни на полученные МР в Казани, ни на других MLT-радаров. Обе системы МР обеспечивают большие амплитуды SDT, около 30 м/с, и вертикальные длины волн, около 55 км, для обеих компонент в средних широтах в зимний период. Они также показывают хорошо известную сильную сентябрьскую особенность SDT (высоты 85–100 км, вертикальная длина волны ~55–60 км) и слабую летнюю SDT на 80–91 км. HWM07 показывает нереальные амплитуды и фазы выше 90 км по высоте и месяцу: минимальные амплитуды в равноденствия и отсутствие сентябрьской особенности.

Слабые DT средних и высоких широт показывают сходные структуры амплитуды и фазы по обоим МР 1986–2002 гг. и 2015–2017 гг.: наибольшие амплитуды (10–12 или 8–10 м/с) для эванесцентного меридионального прилива летом, с пиком в конце июля; наиболее слабые (0–2, 2–4 м/с) на высотах от 80 до 92–96 км, когда прилив распространяется вертикально (январь, февраль, ноябрь, декабрь) с вертикальной длиной волны около 40 км. HWM07 снова показывает отличающиеся структуры амплитуд и фаз: пики амплитуд приходятся на равноденствия: апрель – 15 м/с на 88 км; октябрь – 21 м/с на 89 км.

Связь параметров ветра МР с параметрами ветра ERA5 изучается для 2016 г. Показано, что преобладающие ветры, амплитуды и фазы DT из обоих наборов данных могут быть просто связаны друг с другом, но амплитуды SDT из ERA5 существенно недооценены на верхних модельных уровнях проекта реанализа ERA5.

Новая возможность оценки уровня турбопаузы представлена в работе [Tolmacheva et al., 2019]. В ее основе лежит метод определения параметров атмосферы по искусственным периодическим неоднородностям ионосферной плазмы (методика ИПН). Полученные данные свидетельствуют о наличии вариаций уровня турбопаузы. Для создания ИПН были проведены эксперименты с использованием нагревательной установки SURA

(56.1° N, 46.1° E). Над точкой наблюдения область турбопаузы занимает интервал высот от 94 до 106 км. В течение суток наблюдается изменение уровня турбопаузы: в вечерние часы уровень турбопаузы может понижаться. Наблюдаются временные вариации уровня турбопаузы. Они сопоставляются с вариациями параметров атмосферы на этих высотах.

Авторы статьи [Merzlyakov et al., 2020a] представляют результаты измерений ветра вблизи мезопаузы, выполненных с помощью метеорных радаров (МР) в Колме (51° N, 13° E), Обнинске (55° N, 37° E), Казани (56° N, 49° E), Ангарске (52° N, 104° E) и Анадыре (65° N, 178° E) с 1 октября 2017 по 31 марта 2018 г. МР в Колме и Казани являются радаром SKiYMET с вертикальной передачей и определением высоты радиоэха, остальные радары работают с горизонтальной передачей и без определения высоты. Особое внимание было уделено изменчивости меридионального ветра с периодами 4–6 суток и 9–11 суток. Волны с такими периодами видны как пятна волновой активности в вейвлет-спектрах и включают колебания с разными периодами и разными дискретными зональными волновыми числами. Эти волновые пакеты последовательно распространяются в виде группы волн от одного участка к другому таким образом, что они наблюдаются на одном участке и практически исчезают в предыдущем. Группа волн с периодами 4–6 суток включает колебания планетарного масштаба (отдельные спектральные компоненты), которые имеют фазовые скорости в восточном направлении и преимущественно зональные числа волн 2 и 3, а вертикальная длина волны превышает 70 км в средних широтах. Источником колебаний является неустойчивость полярной струи. Сама группа волн распространяется в западном направлении, а амплитуды колебаний ветра составляют примерно 5–6 м/с, как получено из данных о ветре, осредненных по зоне метеора. Набор волн с периодами 9–11 суток распространяется на запад как группа и состоит в основном из спектральных компонент, имеющих фазовую скорость, направленную на запад, и зональное волновое число 1. Амплитуды этих ветровых возмущений сильно различаются от станции к станции и могут достигать примерно 8 м/с. Вертикальное волновое число составляет 0.014 км^{-1} по данным Казани и 0.05 км^{-1} по данным Колма. Авторы получили глобальное представление о волнах, используя данные геопотенциала AURA MLS. Обнаружено хорошее соответствие между характеристиками волн, полученными по измерениям ветра МР и данным MLS. Подобное распространение планетарной волны в области мезосферы/нижней термосферы (MLT) до сих пор не привлекало особого внимания.

Результаты по временной и долготной модуляции амплитуд полусуточных приливов в мезосфере и ветров нижней термосферы представлены в

работе [Merzlyakov et al., 2020b]. Данные о ветре были получены в октябре—декабре 2017 года при одновременной работе шести метеорных радаров. Сеть радаров охватывает широты от 51°N до 72°N и долготы от 13°E до 178°E . Результаты показывают четкую приливную 8–9-суточную амплитудную модуляцию, которая существенно изменяется с широтой. Доказано, что источником модуляции является нелинейное взаимодействие полусуточного прилива с планетарными волнами, распространяющимися на восток и запад. Модуляция от взаимодействия с распространяющимися на восток волнами с зональным числом волны 1 наблюдается в высоких широтах (65° – 72°N). В средних широтах (51° – 52°N) на смену приходит модуляция, соответствующая нелинейному взаимодействию с распространяющейся на запад волной с зональным волновым числом 1. Кроме того, обнаружена значимая статистическая связь между колебаниями зональной струи в верхней стратосфере и долготной разницей амплитуд приливов, полученных на среднеширотных станциях Колм и Ангарск. Коэффициенты корреляции составляют около 0.61 и 0.55 для зональных и меридиональных амплитуд, соответственно. Разница между приливными ветрами, взятыми на разных долготах, увеличивается по амплитуде для обеих компонент ветра в средних широтах во время нарастания активности стационарной планетарной волны 1 в декабре. Данные по верхнему мезосферному ветру TIDI указывают на то, что ведущим источником этого эффекта является полусуточный прилив, распространяющийся в западном направлении с волновым числом 3. Разница между приливными ветрами в высоких широтах показывает разное поведение зональной и меридиональной компонент ветра в декабре.

В работе [Koval et al., 2019] проведено численное моделирование преобразования средней меридиональной циркуляции в диапазоне высот 0–100 км на разных фазах моделируемых событий стратосферного потепления (СП) в январе—феврале с учетом и без учета влияния мезомасштабных орографических гравитационных волн (ОГВ). Для получения ансамбля из 12 пар модельных прогонов с параметризацией и без параметризации эффектов ОГВ использовалась численная модель средней и верхней атмосферы (MUAM). Полученные результаты свидетельствуют об ослаблении зонально-осредненной меридиональной циркуляции на высотах до 100 км во время и после моделируемого СП по сравнению с интервалом времени до СП. На высотах менее 50 км наблюдается ослабление (до 15%) средних меридиональных ветров, направленных к югу, до и после моделируемых СП. Эффекты ОГВ могут увеличивать средний ветер, направленный к северу, на высотах более 60 км до 10–15%. Наиболее существенные изменения меридиональной циркуляции в средней атмосфере наблюдаются в средних и высоких широтах се-

верного полушария: меридиональная циркуляция, направленная на юг, увеличивается на высотах выше 40 км и уменьшается ниже 40 км. Таким образом, глобальная средняя меридиональная циркуляция в средней атмосфере может существенно зависеть от различных фаз событий СП в зимний сезон в северном полушарии. Она также весьма чувствительна к динамическим и термическим воздействиям ОГВ.

В работе [Shpynev et al., 2019] рассмотрены физические механизмы, ответственные за формирование плоскостойких струйных течений в зимней стратосфере. В отличие от традиционного представления о балансе между энергией поглощения солнечного УФ-излучения стратосферным озоном в полосе Хартли и энергией потерь за счет инфракрасного излучения молекул CO_2 , O_3 , и H_2O , показано, что такой баланс не выполняется. Показано, что наблюдаемый в спутниковых экспериментах дисбаланс этих энергий может быть объяснен динамическим механизмом, увеличивающим гравитационный потенциал воздуха в тропической стратосфере и формирующим бароклинную неустойчивость экватор/зимний полюс, которая порождает струйное течение. Струйные течения переносят энергию и импульс из экваториальной области в полярную и обеспечивают нисходящую ветвь глобальной циркуляции Брюера—Добсона. Высвобождение потенциальной энергии при опускании стратосферного струйного течения составляет $\sim 10^{18}$ Вт/сут; масса воздуха, переносимая струйным течением в область зимней тропопаузы, оценивается в $\sim 10^{14}$ кг/сут. На основе данных реанализа ECMWF ERA-Interim проанализированы временные характеристики движения стратосферного воздуха от области генерации избытка гравитационного потенциала в летней тропической стратосфере до высот полярной зимней тропопаузы, где стратосферный воздух заканчивает свое движение, участвуя в циклогенезе. Продолжительность нисходящей части циркуляции Брюера—Добсона в зимней стратосфере/тропосфере составляет в среднем 50–70 суток.

Арктический стратосферный полярный вихрь обычно формируется осенью, достигает пика интенсивности в середине зимы и затухает весной. Сила и устойчивость полярного вихря в зимне-весенний период играют важную роль в разрушении стратосферного озона с возвращением солнечной радиации в конце зимы. Разрушение полярного вихря в большинстве случаев происходит под воздействием вертикально распространяющихся планетарных волн Россби. Повышенная активность планетарных волн наблюдалась в 1984/1985, 1998/1999 и 2012/2013 гг. и приводила к разрушению полярного вихря в середине зимы, после чего он не наблюдался более месяца. В работе [Zuev and Savelieva, 2019a] потеря арктического морского льда рассматривается как наибо-

лее вероятная причина повышенной активности планетарных волн, приведшей к необычному ослаблению арктического полярного вихря. Осенью 1984, 1998 и 2012 гг. площадь арктического морского льда была рекордно низкой в море Бофорта, на Канадском Арктическом архипелаге и в Центральной Арктике.

Сила стратосферного полярного вихря весной в значительной степени определяет продолжительность и интенсивность разрушения озонового слоя в полярных областях. Размер озоновой дыры в Антарктике обычно достигает максимума в сентябре, а затем снижается в октябре и ноябре. Однако в 1987, 1998, 1999, 2001, 2006, 2011 и особенно в 2015 г. в условиях сильного полярного вихря в октябре и ноябре наблюдалось значительное увеличение площади озоновой дыры по сравнению со средними климатическими значениями. Причем в эти годы оно происходило одновременно с повышением температуры в субтропической нижней стратосфере в южном полушарии. На основе данных реанализа ERA-Interim по температуре и зональному ветру авторы работы [Zuev and Savelieva, 2019b] выявили высокую корреляцию между межгодовыми вариациями субтропической температуры и зонального ветра на 60°S в октябре и ноябре (коэффициенты корреляции Пирсона r равны 0.71 и 0.82 соответственно). Таким образом, повышение температуры в субтропической нижней стратосфере в октябре–ноябре может способствовать усилению антарктического полярного вихря в этот период.

В работе [Shevchuk et al., 2020] описана динамическая (геометрическая) модель яркости серебристых облаков (СО), вызванных активностью гравитационных волн. Представлены зависимости яркости СО от параметров гравитационной волны. Также рассмотрены результаты решения обратной задачи. Показано, что относительные вариации яркости СО в основном зависят от амплитуды гравитационной волны, ее горизонтальной длины волны и невозмущенной толщины слоя СО. Также показано, что модель может быть использована для определения геометрической амплитуды возмущающей волны по распределению относительной яркости (обратная задача) и что неопределенность геометрической амплитуды волны определяется в основном неопределенностью толщины облачного слоя.

В работе [Лукьянов и др., 2021] представлено краткое описание и некоторые результаты применения траекторной и дисперсионной транспортных моделей, разработанных в ЦАО для исследования процессов переноса примесей в стратосфере и тропосфере. Траекторная модель TRACAO применялась для исследования озоноактивных процессов в зимней полярной стратосфере с целью изучения стратосферно-тропосферного обмена в средних широтах, а также для анализа данных баллонных и самолетных (M55

“Геофизика”, Як-42Д “Росгидромет”) наблюдений. Затем на основе траекторной модели была разработана дисперсионная модель GLADIM, которая рассчитывает траектории множества частиц с учетом турбулентной диффузии и позволяет определить концентрацию примеси в ячейках регулярной сетки. Дисперсионная модель была использована для моделирования распространения вулканического пепла и расчета вертикальных профилей диоксида углерода. Валидация модели осуществлялась путем сравнения с результатами другой широко применяемой модели FLEXPART. Модели используют в Региональном информационно-аналитическом центре “Средняя атмосфера”, созданном в Центральной аэрологической обсерватории.

В работе [Medvedev et al., 2019] представлен новый метод определения вектора скорости нейтрального ветра. В основе метода лежит измерение групповых скоростей внутренних гравитационных волн. Используя случай дисперсионного соотношения Буссинеска, авторы продемонстрировали возможность измерения вектора скорости нейтрального ветра по данным групповой скорости и волнового вектора. Предложен алгоритм получения вектора групповой скорости из спектра волнового вектора. Новый метод был протестирован путем сравнения полученной структуры зимнего ветра с данными о ветре из других источников. Тестирование нового метода показало, что он находится в количественном согласии с измерениями ветра с использованием интерферометра Фабри–Перо для зональных и вертикальных скоростей ветра. Здесь же обсуждаются различия в меридиональных скоростях ветра. Особый интерес представляют результаты, связанные с измерением вертикальных скоростей ветра. Авторы продемонстрировали, что два независимых метода показали наличие вертикальных скоростей ветра с амплитудой ~ 20 м/с. Оценка вклада вертикального ветра в скорость дрейфа плазмы показала важность измерений вертикального ветра и необходимость его учета в физических и эмпирических моделях ионосферы и термосферы.

В работе [Grigoriev et al., 2020] исследуется проблема возбуждения внутренних гравитационных волн (ВГВ) в верхней атмосфере внешним источником с ограниченной длительностью действия. В качестве среды распространения ВГВ была выбрана изотермическая атмосфера при наличии однородного ветра, изменяющегося со временем по гармоническому закону. Для вертикальной компоненты смещения среды решалось уравнение Матье с нулевыми начальными условиями, при этом правая часть моделировала воздействие мощной нагревательной установки на ионосферу. В случае малой амплитуды переменной составляющей ветра получена временная зависимость вертикального смещения в условиях параметрического резонанса с использованием

метода возмущений. Полученная зависимость решения дифференциального уравнения от параметров позволяет провести численный анализ задачи в случае переменного ветра произвольной амплитуды. Для практических оценок полученных величин использованы данные о режимах работы нагревательной установки SURA (56.15° N, 46.11° E) с периодическими (15–30 мин) включениями в течение 2–3 ч для воздействия на ионосферу.

Южное колебание Эль-Ниньо (ENSO) вызывает выброс большого количества тепла и влаги в тропическую атмосферу, что приводит к аномалиям циркуляции. Отклик циркуляции на ENSO распространяется как горизонтально в направлении полюсов, так и вертикально в стратосферу. В работе [Kolennikova and Gushchina, 2022] авторы исследуют удаленный отклик полярной стратосферы на ENSO, используя данные реанализа, а также композитный и регрессионный анализ. В частности, они рассматривают изменчивость, обусловленную двумя типами ENSO (восточно-тихоокеанским (ВТ) и центрально-тихоокеанским (ЦТ) Эль-Ниньо), и различия откликов ENSO между полушариями. В соответствии с предыдущими результатами авторы показывают, что ENSO связано с ослаблением стратосферного полярного вихря, но подчеркивают, что отклик полярной стратосферы сильно зависит от типов ENSO, различается между полушариями и изменяется от нижней к средней стратосфере. Основная асимметрия между полушариями проявляется в отклике на ВТ Эль-Ниньо, который в Южном полушарии незначителен, в то время как события ЦТ связаны с выраженным ослаблением полярного вихря в обоих полушариях. Ослабление стратосферного полярного вихря, возможно, является результатом интенсификации волнового потока из тропосферы в стратосферу и сопровождается усилением переноса тепла. Последний вызывает стратосферное потепление в Арктике и Антарктике и замедляет зональные течения. Реакция циркуляции нижней стратосферы на ENSO примерно противоположна реакции средней стратосферы.

В работе [Коленникова и др., 2021] исследован отклик стратосферы Арктики на климатическое явление Эль-Ниньо с учетом его восточно- и центрально-тихоокеанского типов за период 1950–2005 гг. на основе регрессионного и композитного анализа с использованием расчетов шести совместных климатических моделей проекта CMIP5 и данных реанализа.

Зимний сезон 2021–2022 гг. в арктической стратосфере до начала минорных внезапных стратосферных потеплений (ВСП) в конце февраля – начале марта и мажорного ВСП 20 марта характеризовался устойчивым холодным стратосферным полярным вихрем с объемом полярных стратосферных облаков (ПСО), близким к максимальным значениям с 1980 г. В работе [Vargin et al., 20226] анализ динамических процессов арктиче-

ской стратосферы по данным реанализа показывает, что основными причинами усиления стратосферного полярного вихря в январе–феврале являются минимальное за последние 40 лет распространение планетарной волновой активности из тропосферы в стратосферу и ее отражение в верхней стратосфере–нижней мезосфере во второй половине января. Первое минорное ВСП было ограничено верхней полярной стратосферой, тогда как второе распространилось на среднюю и нижнюю стратосферу и привело к исчезновению ПСО, что предотвратило значительное разрушение озона. Как минорные, так и мажорные ВСП привели к ослаблению остаточной меридиональной циркуляции в верхней арктической стратосфере и ее усилению в средней и нижней стратосфере, что способствовало дополнительному прогреву приполярной области и ослаблению полярного вихря.

Поведение планетарных волн и их влияние на глобальную циркуляцию Северного полушария во время различных типов Эль-Ниньо изучено в работе [Ermakova et al., 2022]. Для каждого типа Эль-Ниньо были выбраны три набора из пяти бо-реальных зим: Модоки I и II и канонический тип Эль-Ниньо. На основе данных японского 55-летнего реанализа и ретроспективного анализа Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications проведен анализ пространственно-временной структуры планетарных волн и остаточной средней циркуляции. Полученные результаты показывают, что канонический тип Эль-Ниньо характеризуется наиболее слабой волновой активностью в марте. Также показано, что потепление полярной стратосферы, сопровождающееся максимизацией волновой активности и ослаблением зонального ветра, может приводить к более раннему разрушению стратосферного полярного вихря и раннему весеннему переходу в условиях Модоки I. Данное исследование является очередным шагом в понимании так называемых дальних телеконнекций, заключающихся в распространении сигнала от тропического источника Южного колебания Эль-Ниньо в полярную стратосферу.

В работе [Кандиева и др., 2019] для исследования влияния осцилляции Маддена–Джулиана и квазидвухлетнего колебания в экваториальной стратосфере на динамические процессы во внутропической стратосфере использована модель циркуляции средней и верхней атмосферы. Источник нагрева осцилляции Маддена–Джулиана в тропической области задавался в виде модулированного по долготе волнового возмущения с зональным волновым числом $m = 2$ и периодом $T = 45$ сут, перемещающегося на восток с фазовой скоростью ~ 5 м/с. Ансамблевые расчеты проводились раздельно для западной и восточной фаз квазидвухлетнего колебания. Анализ полученных результатов показал, что оба явления существенно влияют на циркуляцию зимней внутропиче-

ской стратосферы, разрушение полярного вихря и внезапные стратосферные потепления, причем характер влияния зависит от сочетания их фаз. Хорошая согласованность результатов моделирования с данными реанализа подтверждает полученные результаты.

Устойчивость стратосферного полярного вихря в зимне-весенний период является одним из ключевых факторов, определяющих продолжительность и масштабы разрушения стратосферного озона в полярной области. Максимум скорости арктического полярного вихря наблюдается зимой, а антарктический вихрь, как правило, усиливается в начале весны. В результате над Антарктикой ежегодно с августа по ноябрь наблюдается масштабное разрушение озона, а над Арктикой с января по март – лишь небольшие эпизодические аномалии. В работе [Зуев и др., 2020] рассмотрена причина высокой силы и устойчивости антарктического полярного вихря в зимне-весенний период. На основе данных реанализа ERA-Interim показана высокая согласованность между внутритроповыми изменениями температуры нижней субтропической стратосферы и скорости зонального ветра в субполярной и полярной нижней стратосфере в Южном полушарии. Результаты численного моделирования с использованием модели PlaSim-ICMMG-1.0 демонстрируют усиление зонального ветра в субполярной области при повышении температуры субтропической стратосферы. Показано, что зимне-весеннее усиление антарктического полярного вихря происходит благодаря увеличению стратосферного меридионального температурного градиента в результате сезонного повышения температуры нижней субтропической стратосферы в этот период.

В работе [Зуев и др., 2022б] рассмотрены особенности ослабления стратосферного полярного вихря, предшествующие его разрушению. Для анализа аномальной динамики полярных вихрей использовался метод оценки основных параметров вихря при оконтуривании его границ с помощью значений геопотенциала, определенных по максимальному градиенту температуры и максимальной скорости ветра по данным реанализа ERA5. Показано, что критерии аномального ослабления полярного вихря, предшествующего его разрушению, – это сокращение площади вихря до значений <10 млн км² и последующее уменьшение средней скорости ветра по границе вихря до значений <30 и 45 м/с в нижней и средней стратосфере соответственно. В этом случае полярный вихрь становится небольшим циклоном (характеризующимся высокими температурами и отсутствием динамического барьера) и разрушается в пределах трех недель.

В работе [Варгин и Кирюшов, 2019] проанализированы динамические процессы в стратосфере

над Арктикой в зимний сезон 2017/18 г. с использованием данных реанализа NCEP и результатов измерений с помощью спутниковых приборов SABER и MLS. Выявлены следующие особенности: отражение потоков волновой активности из стратосферы в тропосферу над Канадой в конце декабря 2017 г. и в начале января 2018 г., главное внезапное стратосферное потепление в феврале 2018 г. с изменением направления зонального ветра, с разделением стратосферного полярного вихря, с распространением аномалий циркуляции стратосферы до нижней тропосферы, с похолоданием в мезосфере, с изменением высоты стратопаузы и со снижением температуры нижней стратосферы в тропиках.

В работе [Варгин и др., 2020а] проанализированы основные динамические процессы в стратосфере Арктики в зимний сезон 2018/2019 г. и их влияние на тропосферу, мезосферу и озоновый слой с использованием данных реанализа NCEP и спутниковых наблюдений MLS. По результатам расчетов по траекторной модели TRACAO проведен сравнительный анализ эволюции стратосферного полярного вихря в зимние сезоны 2015/2016 и 2018/2019 гг.

В работе [Курдяева и др., 2022] представлены результаты численного исследования процессов распространения в термосферу внутренних гравитационных волн, возбуждаемых тепловыми источниками в тропосфере. Результаты численных экспериментов показали, что термосферные возмущения от таких источников возникают через ~ 30 мин после начала их действия. Причиной появления быстрой реакции термосферы являются инфразвуковые волны, возбуждаемые при генерации внутренних гравитационных волн. Показано, что термосферный ветер существенно влияет на пространственно-временную структуру волновых возмущений в верхней атмосфере. Это влияние проявляется в повышении амплитуд и уменьшении пространственных масштабов волн, распространяющихся против термосферного ветра. Для волн, распространяющихся в направлении термосферного ветра, отмечается понижение амплитуд и увеличение пространственных масштабов.

В работе [Gavrilov et al., 2022] проведено численное моделирование с высоким разрешением нестационарных нелинейных акустико-гравитационных волн (АГВ), распространяющихся вверх от волнового источника на земной поверхности, для различных временных интервалов относительно времени активации и деактивации волнового воздействия. После включения источников волн на поверхности амплитуды спектральных компонент АГВ достигают квазистационарного состояния. Затем в численной модели происходит отключение поверхностного волнового воздействия, и амплитуды вертикально перемещающихся мод АГВ быстро уменьшаются на всех высотах из-за

прекращения восходящего распространения волновой энергии от источников волн. Однако в дальнейшем стандартное отклонение остаточных и вторичных волновых возмущений испытывает более медленное квазиэкспоненциальное уменьшение. Моделирование с высоким разрешением впервые позволило оценить времена затухания этого волнового шума, создаваемого медленными остаточными, квазистационарными и вторичными спектральными компонентами АГВ, которые в зависимости от высоты и скорости активации и деактивации волновых источников изменяются от 20 до 100 ч. Стандартные отклонения волнового шума больше для случая резкой активации и деактивации волнового форсинга по сравнению с крутыми процессами. Полученные результаты показывают, что переходные волновые источники могут создавать долгоживущие волновые возмущения, которые могут формировать фоновый уровень волнового шума в атмосфере. Это следует учитывать при параметризации атмосферных воздействий АГВ.

Большое количество крупномасштабных динамических явлений в атмосфере Земли связано с процессами распространения и обрушения (опрокидывания) волн Россби. В работе [Гочаков и др., 2021] предлагается новый метод идентификации опрокидываний волн Россби. Метод основан на определении центров опрокидываний на основе исследования геометрии контуров потенциальной завихренности или температуры на квазиматериальных поверхностях — изэнтропических и изэнтальпических (поверхностях постоянной потенциальной завихренности — PV) и дальнейшей кластеризации центров опрокидываний в крупные регионы. В данной работе метод реализован для уровней PV от 0.3 до 9.8 PVU с шагом 0.5 PVU на поверхности потенциальной температуры 350 K для 12 ч ВСВ. Основой для разработки метода послужили данные реанализа ERA-Interim с 1979 по 2019 г. На основе анализа геометрии вихря для каждого уровня PV для каждого дня определяется тип опрокидывания — циклонический или антициклонический, а также площадь и центр опрокидывания. Для первичных опрокидываний, полученных на данном этапе за каждый месяц, применяется алгоритм кластеризации DBSCAN (Density-based Spatial Clustering of Applications with Noise). В результате сформирован архив графической информации, содержащий сведения об основных областях опрокидывания и их динамике в течение каждого месяца в период 1979–2019 гг. Также рассчитаны повторяемости опрокидываний волн Россби для каждой долготы, учитывающие длительность опрокидываний и число уровней, формирующих каждое опрокидывание, а также аномалии этих величин.

4. Влияние солнечной активности

В работе [Гинзбург и др., 2020] представлены результаты сравнительного анализа потоков и спектров солнечных протонов, измеренных в сентябре 2017 г. на ИСЗ, имеющих разные орбиты, ЭЛЕКТРО-Л № 2, GOES 13 и МЕТЕОР-3 № 2, а также результатов моделирования скорости ионизации в полярной атмосфере на основе данных указанных экспериментов. Установлено, что спектры протонов по данным российских и американского космических аппаратов достаточно близки друг к другу и имеют экспоненциальный характер. Проведенные расчеты скорости ионизации полярной атмосферы по данным трех указанных экспериментов показали близкие результаты, за исключением малых высот.

В работе [Кириллов и др., 2021] на основании моделей электронной кинетики триплетных состояний молекулярного азота и синглетных состояний молекулярного кислорода для средней атмосферы Земли проведен расчет профилей интенсивностей полос первой и второй положительных систем N_2 , Инфракрасной Атмосферной и Атмосферной систем O_2 в случае высыпания в атмосферу Земли высокоэнергичных протонов во время события GLE № 69 от 20 января 2005 г. Расчеты показали, что практически на всем рассматриваемом интервале высот 20–80 км имеется значительный вклад процессов гашения состояния V^3P_g при молекулярных столкновениях. Кинетика синглетных состояний O_2 на высотах средней атмосферы во время высыпания протонов рассмотрены как с учетом прямого возбуждения высокоэнергичными частицами, так и с учетом межмолекулярных процессов переноса электронного возбуждения. Показано, что процессы гашения состояния $b^1\Sigma_g^+$ во время неупругих молекулярных столкновений приводят к значительному понижению интенсивностей полос Атмосферной системы на высотах средней атмосферы.

В работе [Коршунов и Зубачев, 2022б] для выявления влияния факторов солнечной активности на стратосферный аэрозоль проведен анализ лидарных наблюдений на длинах волн 532 и 355 нм, выполненных в г. Обнинск (55° N) с 2014–2018 гг. в слое 13–23 км. В период 2016–2018 гг. обнаружено уменьшение обратного аэрозольного рассеяния на величину примерно в несколько процентов в интервале от 0 до 2 дней после начала Форбуш-понижений потока галактических космических лучей. В 2014–2017 гг. после солнечно-протонных событий с задержкой в 3–8 дней следует увеличение обратного аэрозольного рассеяния в пределах 20–70%. Показано, что этот эффект наблюдается, преимущественно, при переносе стратосферного воздуха в точку наблюдения из области высоких широт.

Недавние исследования позволили прояснить важную роль стратосферного полярного вихря в

физическом механизме воздействия солнечной активности на циркуляцию нижней атмосферы. Полученные результаты показывают, что временная изменчивость, наблюдаемая в солнечно-атмосферных связях на мультидекадной временной шкале, может быть вызвана вариациями состояния вихря. В работах [Veretenenko and Ogurtsov, 2019a, 2019b; Veretenenko, 2022a] проведено сравнение временного хода коэффициентов корреляции между давлением в нижней атмосфере во внетропических широтах и числами солнечных пятен с эволюцией форм крупномасштабной циркуляции по классификации Вангенгейма-Гирса, а также с изменениями характеристик стратосферного полярного вихря. Обнаружено, что эффекты солнечной активности и потоков галактических космических лучей (СА/ГКЛ) в вариациях давления тропосферы (развитии внетропических барических систем) характеризуются примерно 60-летней периодичностью, которая тесно связана с изменениями режима крупномасштабной циркуляции атмосферы и переходами между различными состояниями полярного вихря. Предполагается, что характер эффектов СА/ГКЛ зависит от интенсивности полярного вихря, влияющей на взаимодействие тропосферы и стратосферы посредством планетарных волн. Полученные результаты свидетельствуют о том, что стратосферный полярный вихрь является важным связующим звеном между циркуляцией нижней атмосферы и солнечной активностью, при этом переходы между различными состояниями вихря являются причиной обращения знака корреляции между характеристиками атмосферы (давлением, облачностью) и солнечной активностью на мультидекадной временной шкале. В свою очередь, расположение вихря благоприятно для воздействия изменений скорости ионизации, связанных с вариациями потоков энергичных заряженных частиц (космических лучей, авроральных электронов и электронов радиационного пояса), которые влияют на химический состав и температурный режим полярной атмосферы, а также на ее электрические характеристики и состояние облачности. В работах [Veretenenko and Ogurtsov, 2020; Veretenenko, 2021a, 2021b, 2022b] представлены результаты, свидетельствующие о влиянии солнечной активности на состояние стратосферного полярного вихря на различных временных шкалах.

В январе 2005 г. произошла серия мощных солнечных протонных событий (СПС), обусловленных усилением вспышечной активности на Солнце, что привело к значительному увеличению скорости ионизации в полярной атмосфере. В работах [Veretenenko and Ogurtsov, 2020; Veretenenko, 2021a] исследовалось влияние этих событий на циркуляцию средней атмосферы северного полушария на основе среднесуточных значений скорости зонального ветра на разных уровнях стратосферы, взятых из архива реанализа

NCEP-DOE (R-2). В ходе исследуемых СПС выявлено заметное увеличение скорости западного ветра в широтном поясе $60\text{--}80^\circ\text{ N}$ на всех исследуемых уровнях. Обнаруженные эффекты свидетельствуют об интенсификации стратосферного полярного вихря, играющего важную роль в механизме солнечно-атмосферных связей. Показано, что изменения скорости ионизации, связанные с мощными СПС и, возможно, авроральными явлениями, могут влиять на состояние стратосферного полярного вихря на временных масштабах порядка нескольких суток. Возможной причиной усиления полярного вихря являются вариации температуры, которые могут быть связаны с изменениями химического состава полярной атмосферы, вызванными усилением ионизации, а также с радиационным форсингом изменений состояния облачности.

В работе [Veretenenko, 2021b] обнаружено, что во время мощных СПС в январе 2005 и декабре 2006 г., сопровождавшихся увеличением потока частиц с энергиями более нескольких сотен МэВ, происходило заметное усиление зонального западного потока в области формирования полярного вихря ($50^\circ\text{--}75^\circ\text{ N}$) на всех уровнях стратосферы северного полушария. Исследование эффектов СПС с энергией частиц $>100\text{ МэВ}$, произошедших в 23-м солнечном цикле (1996–2008 гг.), показало, что интенсификация полярного вихря в ходе этих событий наблюдается преимущественно при западной фазе квазидвухлетних колебаний атмосферы. Показано, что увеличение скорости западного ветра на разных уровнях стратосферы в наибольшей степени коррелирует с изменением скорости ионизации на высотах $\sim 50\text{ км}$. Полученные результаты позволяют предположить, что обнаруженная интенсификация стратосферного полярного вихря обусловлена изменениями радиационно-теплового баланса полярной атмосферы, которые связаны с изменением ее химического состава.

Влияние СПС января 2005 г. на стратосферную циркуляцию в южном полушарии изучалось в работе [Veretenenko, 2022b] с использованием данных реанализа NCEP-DOE (R-2). Обнаружено, что в ходе рассматриваемых событий в верхней стратосфере ($30\text{--}10\text{ гПа}$), где в летний сезон (декабрь–февраль) доминирует восточный перенос воздушных масс, имело место заметное ослабление восточных ветров на средних и высоких широтах ($>40^\circ\text{ S}$) и усиление на более низких широтах. В нижней стратосфере ($100\text{--}50\text{ гПа}$) ослабление восточных ветров происходило только в полярной области ($>60^\circ\text{ S}$). Проведено сравнение эффектов СПС января 2005 г. в циркуляции северного и южного полушарий. Показано, что в северном (зимнем) полушарии эффекты СПС января 2005 г. в вариациях скорости зонального ветра выражены сильнее, чем в южном (летнем) полушарии. Предполагается, что

возмущения циркуляции, обнаруженные в обоих полушариях в ходе СПС, могут быть вызваны изменениями температурного режима полярной атмосферы из-за изменения ее химического состава (разрушения озона) в связи со значительным увеличением скорости ионизации.

Результаты работ [Veretenenko and Ogurtsov, 2020; Veretenenko, 2022a] показывают, что, наряду с изменениями скорости ионизации за счет вариаций космических лучей, возможной причиной изменений интенсивности стратосферного полярного вихря на мультидекадной временной шкале является геомагнитная активность и связанные с ней высыпания авроральных электронов. Обнаружено значительное усиление вихря в период повышенной повторяемости магнитных бурь с постепенным началом (~1980–2000 гг.) и ослабление в период снижения повторяемости этих бурь (~1950–1980 гг.). Примерно 60-летняя вариация интенсивности полярного вихря может быть связана также с долговременными изменениями интегральной солнечной радиации (TSI). В работах [Veretenenko and Ogurtsov, 2019a, 2019b] выявлены доминирующие гармоники с периодами ~80 и ~60 лет в вариациях TSI согласно усовершенствованной реконструкции Хойта-Шаттена. Установлено, что при увеличении потоков TSI в периоды ~1920–1950 и ~1980–2000 гг. имело место усиление полярного вихря, что позволяет рассматривать вариации солнечного излучения как один из возможных факторов изменений состояния полярного вихря на мультидекадной временной шкале.

В работах Ковалю и соавторов [Коваль, 2019; Koval et al., 2022] исследовалось влияние изменений солнечной активности на амплитуды долгопериодных планетарных волн. В работе [Коваль, 2019] для зимнего периода в северном полушарии с помощью численного моделирования изучается влияние изменений в термосфере, обусловленных уровнем солнечной активности (СА), на амплитуды долгопериодных планетарных волн (ПВ). Используется модель средней и верхней атмосферы (МСВА), позволяющая производить расчеты на высотах 0–300 км. Изменения СА в радиационном блоке МСВА задаются различными значениями потока солнечного излучения на длине волны 10.7 см для высот более 100 км. Для учета влияния заряженных частиц в ионосфере на динамику нейтрального газа в МСВА включены ионосферные проводимости для различных уровней СА. Для повышения статистической достоверности результатов получены два ансамбля расчетов, состоящие из 16 модельных прогонов каждый и соответствующие минимуму и максимуму СА. Проведен расчет статистической значимости средних разностей амплитуд ПВ при высокой и низкой СА. Показано, что полученные результаты достоверны почти во всем диапазоне высот 0–300 км. Моделирование впервые показало, что в

средней атмосфере северного полушария статистически достоверные различия амплитуд долгопериодных ПВ могут составлять 10–15% в зависимости от зонального волнового числа ПВ. При этом существенное влияние на распространение ПВ в средней атмосфере оказывает отражение волн на высотах нижней термосферы.

В работе [Koval et al., 2022] проведено численное моделирование общей атмосферной циркуляции для оценки изменения амплитуд перемещающихся в западном направлении планетарных волн (ПВ) на высотах от поверхности Земли до 300 км при различных уровнях солнечной активности (СА). Использовалась трехмерная нелинейная механистическая модель циркуляции средней и верхней атмосферы МСВА. Общая циркуляция атмосферы и амплитуды ПВ рассчитывались на основе ансамблей, содержащих 16 прогонов моделей для условий, соответствующих низкой и высокой СА. Рассматривались ПВ с периодами от 4 до 10 дней. Сравнение с данными цифровых ионозондов показало, что модель МСВА способна воспроизводить рассматриваемые моды ПВ на высотах термосферы. Показано, что в условиях высокой СА амплитуды ПВ значительно больше в термосфере и меньше в средней атмосфере. На наблюдаемые структуры ПВ влияют не только изменения атмосферного показателя преломления и потока Элиассена-Палма, но также и изменение отражения ПВ в нижней термосфере, что может изменить пропорции волновой энергии, передаваемой из нижних слоев атмосферы в верхние слои, и отражаемой вниз.

В работе [Gavrilov et al., 2020] численное моделирование с высоким разрешением нелинейных акустико-гравитационных волн (АГВ), генерируемых на поверхности Земли и распространяющихся в термосфере, показывает, что характеристики волн зависят от изменений средней плотности, температуры, молекулярной диссипации и состава, обусловленных вариациями солнечной активности (СА). Амплитуды температурных волновых возмущений, как правило, больше при высокой СА на высотах более 150 км, что связано с большей средней температурой и меньшей молекулярной теплопроводностью. Увеличение кинематических коэффициентов молекулярной теплопроводности и вязкости приводит к более сильному уменьшению амплитуд АГВ на высотах более 150 км при низкой СА. Диссипирующие АГВ обычно вызывают нагрев на высотах менее 120 км. На больших высотах АГВ, как правило, нагревают термосферу при низкой СА и охлаждают ее при высокой СА. Волновые потоки энтальпии направлены в основном вверх на высотах ниже 120 км и вниз на высотах более 150 км, где они могут иметь направления, противоположные восходящим волновым потокам энергии. Направленные вниз волновые потоки энтальпии соответствуют АГВ-охлаждению верхней атмосферы при высокой СА. Не-

линейные диссипирующие АГВ могут создавать восходящий и нисходящий перенос массы в атмосфере. Эти потоки массы могут производить адиабатические притоки тепла в верхней атмосфере. В основном положительные остаточные потоки массы, наведенные волнами на высотах более 150 км могут способствовать волновому охлаждению верхней атмосферы. Разрушение волн и взаимодействие между волнами и средним потоком в нелинейной модели сильнее при больших амплитудах возбуждения АГВ у земли, что приводит к большим потерям энергии для волн с большой амплитудой. При высоких СА результирующие эффекты в термосфере зависят от баланса между, с одной стороны, увеличением амплитуд волн, вызванным ослаблением молекулярной диссипации и меньшим переходом энергии волн к индуцированным струйным потокам, и, с другой стороны, уменьшением амплитуд из-за большей плотности и большего отражения АГВ. Тепловые эффекты волн в верхней атмосфере могут зависеть от конкуренции между нагреванием из-за диссипации восходящего волнового потока энергии и охлаждением из-за дивергенции нисходящего волнового потока энтропии (или потенциальной энтальпии) нисходящей волны. При высокой СА большие средние температуры и большие возмущения температуры могут увеличивать величины нисходящих потоков энтропии, что может приводить к более частым нисходящим волновым потокам энтропии и охлаждению волнами верхней атмосферы.

За прошедшие годы, с 2019 по 2022 г., достигнут определенный прогресс в оценке роли воздействия высыпаний энергичных частиц (ВЭЧ) на состояние средней атмосферы. Правильная оценка производства ионов и спектров для расчета скоростей ионизации является важным вопросом для оценки атмосферных и климатических сил. Серия работ Мироновой и соавторов в 2019–2022 гг. была посвящена исследованию спектров и скоростей ионизации, вызванных высыпаниями энергичных электронов (ВЭЭ). В работах [Mironova et al., 2019a, 2019b] изучена изменчивость скорости ионизации над Мурманской областью в 1961–2019 гг. с помощью аэростатных наблюдений вторичного тормозного излучения, инициированного ВЭЭ. Скорости ионизации в атмосфере, вызванные высыпаниями энергичных электронов в результате наблюдений с аэростата в полярной атмосфере, сравниваются со скоростями ионизации, рекомендованными для Phase 6 of the Coupled Model Intercomparison Project [Mironova et al., 2019a]. В качестве основных результатов показано, что моделирование с использованием одномерной радиационно-конвективной модели с интерактивными нейтральной и ионной химией демонстрирует различие скоростей ионизации, восстановленных на основе баллонных наблюдений и в рамках форсинга предложенного для

Phase 6 of the Coupled Model Intercomparison Project, что может привести к недооценке NO_x более чем на 100% и привести к потере озона до 25% в мезосфере. В статье [Mironova et al., 2021a] предлагается современный метод расчета скоростей ионизации с использованием новой параметризации образования ионов и новой формы спектра, которые позволяют учитывать диапазон высыпавшихся частиц от десятков кэВ до нескольких МэВ. Справочные таблицы с функцией отклика атмосферы на высыпания частиц для изотропно высыпавшихся моноэнергетических электронов можно легко использовать для расчета скоростей ионизации, а также их можно использовать в моделях атмосферы и химико-климатических моделей для точной количественной оценки параметров атмосферы во время ВЭЭ.

Существует много исследований, в которых широко изучался вклад энергичных частиц во время солнечных протонных событий в образование радикалов оксида водорода и потерю озона. Однако не было убедительных доказательств того, что уменьшение потоков галактических космических лучей во время магнитной бури, известное как эффект Форбуша, прямо и заметно влияет на химический состав стратосферы полярной ночи. В статье [Mironova et al., 2021b] авторы исследовали влияние снижения потока галактических космических лучей во время Форбуш-понижений на поведение радикалов оксида водорода с использованием трехмерной химико-климатической модели SOCOLv2 (Solar Climate Ozone Links). Было обнаружено, что радикал оксида водорода способен терять около половины своей концентрации над полярно-бореальной ночной стратосферой из-за снижения скоростей ионизации, вызванных Форбуш-понижениями после солнечных протонных событий. Несмотря на вышеприведенные выводы указано, что устойчивый отклик в озоне не обнаружен.

В работах [Karagodin et al., 2019, 2022] исследовался ионосферный потенциал, а также гипотеза о том, что флуктуация межпланетного магнитного поля (ММП) может модулировать глобальную электрическую цепь атмосферы (ГЭЦ) над полярными регионами и влиять на приземную метеорологию (эта гипотеза была названа эффектом Мансурова). Данный эффект был исследован с помощью химико-климатических моделей. Исследование эффекта Мансурова за период 1999–2002 гг. с использованием ансамблевых экспериментов, смоделировали их с помощью химико-климатической модели SOCOLv3, было проведено в работе [Karagodin et al., 2022]. Используя наблюдаемые вариации B_y компоненты ММП, авторы смоделировали влияние на давление и температуру воздуха на уровне земли, чтобы проверить одну из предложенных гипотез ГЭЦ–облака, согласно которой реакция приземной метеорологии на флукту-

ации ММП V_y происходит через J_z -ассоциированное усиление скорости слияния облачных капель. Результаты показали, что аномалии приземного давления и температуры воздуха в контрольном прогоне, где ММП V_y опущены, не сильно отличаются от экспериментов, в которые включена зависимость скорости слияния облачных капель от ММП V_y . Гипотеза, названная эффектом Мансурова, на данный момент, не имеет модельных подтверждений.

Исключительно сильное высыпание высокоэнергичных электронов, со скоростями ионизации, локально сравнимыми с сильными солнечными протонными выбросами, было обнаружено с помощью аэростатных измерений в геомагнитных средних широтах и изучено в работе [Mironova et al., 2022]. Это высыпание электронов, возможно, было вызвано взаимодействиями волн и частиц в щелевой области между внутренним и внешним радиационными поясами, связанными с еще малоизученными природными явлениями в магнитосфере. Спутниковые наблюдения нечетного азота и азотной кислоты согласуются с широко распространенными высыпаниями электронов в средних магнитных широтах, а моделирование с помощью трехмерной химико-климатической модели HAMMONIA указывает на почти полное разрушение озона (до 90%) в верхней мезосфере над регионом, где произошли высыпания высокоэнергичных электронов.

В работе [Pikulina et al., 2022] авторы изучали реакцию средней атмосферы на повышенное излучение от нескольких мощных солнечных вспышек X-класса в сентябре 2017 г. Обе вспышки вызвали увеличение солнечной радиации в экстремальной ультрафиолетовой и мягкой рентгеновской областях спектра, а также в линии Ly- α . Для получения данных о потоках излучения от солнечных вспышек использовалась эмпирическая модель FISM2. Для анализа влияния радиации на нейтральную атмосферу использовалась химико-климатическая модель HAMMONIA. Показано значительное увеличение концентраций реакционноспособных оксидов азота и водорода в экваториальных широтах и южных высоких широтах. Это увеличение не повлияло на изменение содержания озона в тропической стратосфере, так как разрушение озона оксидами азота в верхней мезосфере неэффективно и отсутствуют устойчивые нисходящие движения, которые могут выносить лишние NO_x вниз в стратосферу. Оксиды водорода не оказывают существенного влияния на озон в течение рассматриваемых сезонов, однако в южном полушарии моделируется некоторое небольшое истощение озона, коррелированное с увеличением HO_x .

В статье [Grankin et al., 2023] авторы оценили разрушение озона во время событий ВЭЭ с использованием одномерных фотохимических ра-

диационно-конвективных моделей, принимая во внимание как параметризацию, так и ионную химию, а также предоставили оценку электронной плотности в эти периоды. Показано, что во время геомагнитных возмущений, характеризуемых индексом $K_p \sim 4$, происходит увеличение концентрации реактивных оксидов азота и водорода, относительно спокойных условий, достигая значительных значений для интенсивных событий ВЭЭ. Увеличение концентрации радикалов приводит к разрушению озона на высотах мезосферы в течение суток с максимальным разрушением около 14–25% на высоте около 75 км для интенсивных явлений. Эффекты, полученные для событий средней интенсивности, зависят от метода учета ионной химии.

Увеличение концентрации оксида азота в атмосфере на высотах 64–90 км во время ВЭЭ в период 2002–2012 гг. оценено в работе [Махмутов и др., 2021] из измерений спектрометром SCIAMACHY, установленным на борту европейского спутника ENVISAT.

В монографии [Криволицкий и др., 2021б], наряду с описанием трехмерной глобальной численной фотохимической модели ЦАО CHARM, приводятся результаты модельных расчетов, иллюстрирующих воздействие протонных вспышек на Солнце на состав средней атмосферы в 23-м цикле активности Солнца.

ВЫВОДЫ

Обзор публикаций по исследованиям средней атмосферы российскими учеными в 2019–2022 гг. показал широкий диапазон направлений, которые привели к достаточно важным результатам в разных областях изучения средней атмосферы. Основные результаты вошли в Национальный отчет по метеорологии и атмосферным наукам, который был представлен на XXVIII Генеральной ассамблее Международного союза геодезии и геофизики (Берлин, Германия, 2023 г.).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Баженов О.Е. Озоновая аномалия зимой-весной 2019–2020 гг. в Арктике и над севером Евразии по данным спутниковых (AuraMLS/OMI) наблюдений // Оптика атмосферы и океана. 2021. Т. 34. № 7. С. 524–529.
<https://doi.org/10.15372/AOO20210706>
- Баженов О.Е. Озоновые аномалии в стратосфере Арктики и Северной Евразии: сравнение явлений 2011 и 2020 гг. по данным TEMIS и AuraMLS // Оптика атмосферы и океана. 2022. Т. 35. № 5. С. 390–396.
<https://doi.org/10.15372/AOO20220507>
- Баженов О.Е., Невзоров А.А., Невзоров А.В., Долгий С.И., Макеев А.П. Возмущение стратосферы над Томском зимой 2017/2018 гг. по данным лидарных и спутниковых (AuraMLS/OMI) наблюдений // Оптика атмосферы и океана. 2020. Т. 33. № 7.

- С. 509–515.
<https://doi.org/10.15372/AOO20200702>
- Варгин П.Н., Кирюшов Б.М. Внезапное стратосферное потепление в Арктике в феврале 2018 г. и его влияние на тропосферу, мезосферу и озоновый слой // Метеорология и гидрология. 2019. № 2. С. 41–56.
- Варгин П.Н., Коленникова М.А., Кострыкин С.В., Володин Е.М. Влияние аномалий температуры поверхности экваториальной и северной частей Тихого океана на стратосферу над Арктикой по расчетам климатической модели ИВМ РАН // Метеорология и гидрология. 2021. № 1. С. 5–16.
- Варгин П.Н., Лукьянов А.Н., Кирюшов Б.М. Динамические процессы в стратосфере Арктики в зимний сезон 2018/19 г // Метеорология и гидрология. 2020а. № 6. С. 5–18.
- Варгин П.Н., Никифорова М.П., Звягинцев А.М. Изменчивость антарктической озоновой аномалии в 2011–2018 гг. // Метеорология и гидрология. 2020б. № 2. С. 20–34.
- Габис И.П. Квазидвухлетние осцилляции зонального ветра в экваториальной стратосфере и их влияние на межгодовые изменения мощности озоновой дыры в Антарктике // Метеорология и гидрология. 2021. № 5. С. 5–15.
- Герасимов В.В., Зуев В.В., Савельева Е.С. Следы канадских пирокумулятивных облаков в стратосфере над Томском в июне–июле 1991 г // Оптика атмосферы и океана. 2019. Т. 3. № 1. С. 39–46.
<https://doi.org/10.15372/AOO20190106>
- Гинзбург Е.А., Криволуцкий А.А., Куколева А.А., Мяжкова И.Н. Расчет скорости ионизации в атмосфере в полярной области во время солнечных протонных событий // Геомагнетизм и аэрономия. 2020. Т. 60. № 5. С. 600–607.
- Гочаков А.В., Антохина О.Ю., Крупчатников В.Н., Мартынова Ю.В. Метод идентификации и объединения в кластеры событий обрушения волн Россби в Северном полушарии // Метеорология и гидрология. 2021. № 1. С. 17–28.
- Данилов А.Д., Бербенева Н.А. Некоторые прикладные аспекты изучения трендов в верхней и средней атмосфере // Геомагнетизм и аэрономия. 2021. Т. 61. № 4. С. 520–531.
- Данилов А.Д., Константинова А.В. Долговременные вариации параметров средней и верхней атмосферы и ионосферы (обзор) // Геомагнетизм и аэрономия. 2020. Т. 60. № 4. С. 411–435.
- Зуев В.В., Боровко И.В., Крупчатников В.Н., Савельева Е.С. Влияние температуры нижней субтропической стратосферы на динамику антарктического полярного вихря // Оптика атмосферы и океана. 2020. Т. 33. № 5. С. 415–418.
<https://doi.org/10.15372/AOO20200512>
- Зуев В.В., Зуева Н.Е., Савельева Е.С., Короткова Е.М., Павлинский А.В. Роль крупных вулканических извержений в разрушении стратосферного озона и деградации хвойных лесов // Оптика атмосферы и океана. 2022а. Т. 35. № 2. С. 150–154.
<https://doi.org/10.15372/AOO20220210>
- Зуев В.В., Савельева Е.С., Павлинский А.В. Особенности ослабления стратосферного полярного вихря, предшествующие его разрушению // Оптика атмосферы и океана. 2022б. Т. 35. № 1. С. 81–83.
<https://doi.org/10.15372/AOO20220112>
- Кандиева К.К., Анискина О.Г., Погорельцев А.И., Зоркальцева О.С., Мордвинов В.И. Влияние осцилляции Маддена–Джулиана и квазидвухлетнего колебания на динамику внутритропической стратосферы // Геомагнетизм и аэрономия. 2019. Т. 59. № 1. С. 114–124.
<https://doi.org/10.1134/S0016794018060068>
- Кашкин В.Б., Одинцов Р.В., Рублева Т.В. О влиянии ядерного взрыва на стратосферный озон // Оптика атмосферы и океана. 2022. Т. 35. № 3. С. 212–216.
<https://doi.org/10.15372/AOO20220306>
- Кириллов А.С., Белаховский В.Б., Маурчев Е.А., Балабин Ю.В., Германенко А.В., Гвоздевский Б.Б. Свечение молекулярного азота и молекулярного кислорода в средней атмосфере Земли во время выпадения высокоэнергетических протонов // Геомагнетизм и аэрономия. 2021. Т. 60. № 6. С. 769–776.
- Коваль А.В. Статистически значимые оценки влияния солнечной активности на планетарные волны в средней атмосфере северного полушария по данным модели МСВА // Солнечно-земная физика. 2019. Т. 5. № 4. С. 64–72.
- Коленникова М.А., Варгин П.Н., Гущина Д.Ю. Влияние Эль-Ниньо на стратосферу Арктики по данным моделей CMIP5 и реанализа // Метеорология и гидрология. 2021. № 6. С. 5–23.
<https://doi.org/10.52002/0130-2906-2021-6-5-23>
- Коршунов В.А., Зубачев Д.С. Увеличение обратного аэрозольного рассеяния в нижней мезосфере в 2019–2021 гг. и его влияние на измерения температуры рэлееским методом // Оптика атмосферы и океана. 2022а. Т. 35. № 1. С. 32–36.
<https://doi.org/10.15372/AOO20220105>
- Коршунов В.А., Зубачев Д.С. Проявление эффектов солнечной активности в лидарных наблюдениях стратосферного аэрозоля // Геомагнетизм и аэрономия. 2022б. Т. 62. № 1. С. 67–74.
- Коршунов В.А., Мерзляков Е.Г., Юдаков А.А. Наблюдения метеорного аэрозоля в верхней стратосфере – нижней мезосфере методом двухволнового лидарного зондирования // Оптика атмосферы и океана. 2018. Т. 31. № 10. С. 805–814.
<https://doi.org/10.15372/AOO20181006>
- Криволуцкий А.А., Вьюшкова Т.Ю., Черепанова Л.А., Банин М.В., Репнев А.И., Куколева А.А. Численные глобальные модели ионосферы, озоносферы, температурного режима и циркуляции для высот 0–130 км. Результаты и перспективы // Метеорология и гидрология. 2021а. № 9. С. 56–69.
- Криволуцкий А.А., Вьюшкова Т.Ю., Банин М.В. Глобальная трехмерная численная фотохимическая модель CHARM. М.: ГЕОС, 2021б. 134 с.
- Кропоткина Е.П., Розанов С.Б., Лукин А.Н., Игнатьев А.Н., Соломонов С.В. Особенности изменений содержания озона в верхней стратосфере над Москвой в холодные полугодия 2014–2015 и 2015–2016 гг // Геомагнетизм и аэрономия. 2019. Т. 59. № 2. С. 227–235.
<https://doi.org/10.1134/S0016794019010097>
- Куликов Ю.Ю., Кириллов А.С., Поберовский А.В., Имхасин Х.Х. Микроволновый мониторинг содержания озона в средней атмосфере в Апатитах и Петергофе зимой 2021/22 г // Метеорология и гидрология. 2022. № 12. С. 99–107.

- Куликов Ю.Ю., Поберовский А.В., Рыскин В.Г., Юшков В.А. Обнаружение больших флуктуаций в содержании озона средней атмосферы во время внезапных стратосферных потеплений в приполярных широтах Арктики // Геомагнетизм и аэрономия. 2020. Т. 60. № 2. С. 261–269. <https://doi.org/10.31857/S0016794020020091>
- Куминов А.А., Юшков В.А., Гвоздев Ю.Н., Штырков О.В., Лыков А.Д., Балугин Н.В. Метеорологическое ракетное зондирование для атмосферных исследований и мониторинга геофизической обстановки // Метеорология и гидрология. 2021. № 9. С. 21–31.
- Курдяева Ю.А., Кшевецкий С.П., Борчевкина О.П., Карпов М.И. Ветровые эффекты в термосфере при распространении атмосферных волн, генерируемых тепловым тропосферным источником // Геомагнетизм и аэрономия. 2022. Т. 62. № 4. С. 537–544. <https://doi.org/10.31857/S0016794022040113>
- Лукьянов А.Н., Ганышин А.В., Юшков В.А., Вязанкин А.С. Траекторное моделирование средней атмосферы // Метеорология и гидрология. 2021. № 9. С. 95–104. <https://doi.org/10.52002/0130-2906-2021-9-95-104>
- Маричев В.Н., Бочковский Д.А. Мониторинг изменчивости стратосферного слоя аэрозоля над Томском в 2016–2018 гг. по данным лидарного зондирования // Метеорология и гидрология. 2021. № 1. С. 61–72.
- Махмутов В.С., Базилевская Г.А., Миронова И.А., Синхубер М., Розанов Е., Суходолов Т., Гвоздецкий Б.Б., Свирижевский Н.С. Атмосферные эффекты во время выпадений энергичных электронов // Изв. РАН. Серия физическая. 2021. Т. 85. № 11. С. 1650–1653.
- Невзоров А.В., Баженов О.Е., Ельников А.В., Логинов В.А. Сравнение временных рядов интегрального содержания аэрозоля в стратосфере и общего содержания озона // Оптика атмосферы и океана. 2021. Т. 34. № 5. С. 358–363. <https://doi.org/10.15372/AOO20210507>
- Никитенко А.А., Тимофеев Ю.М., Виролайнен Я.А., Неробелов Г.М., Поберовский А.В. Сравнения измерений стратосферного содержания CO₂ наземным и спутниковым методами // Оптика атмосферы и океана. 2022. Т. 35. № 3. С. 191–194. <https://doi.org/10.15372/AOO20220303>
- Никифорова М.П., Варгин П.Н., Звягинцев А.М. Аномалии содержания озона над территорией России в зимне-весенний период 2015/16 г. // Метеорология и гидрология. 2019. № 1. С. 36–49.
- Переведенцев Ю.П., Шанталинский К.М., Васильев А.А., Гурьянов В.В. Термический режим в тропосфере, стратосфере и нижней мезосфере Северного полушария в 1979–2016 гг. // Метеорология и гидрология. 2019. № 8. С. 5–20.
- Перцев Н.Н., Далин П.А., Перминов В.И. Лунные приливы в области мезопаузы по данным о летней температуре излучающего гидроксид // Геомагнетизм и аэрономия. 2021. Т. 61. № 2. С. 259–266.
- Попов А.А., Гаврилов Н.М., Перминов В.И., Перцев Н.Н. Статистическая коррекция мезомасштабных дисперсий температуры верхней атмосферы по наблюдениям ночной эмиссии гидроксид в Звенигороде // Геомагнетизм и аэрономия. 2022. Т. 62. № 1. С. 130–136.
- Смышляев С.П., Блакитная П.А., Моцаков М.А. Численное моделирование влияния физических и химических факторов на межгодовую изменчивость содержания озона в Антарктике // Метеорология и гидрология. 2020. № 3. С. 21–32.
- Тимофеев Ю.М., Неробелов Г.М., Поляков А.В., Виролайнен Я.А. Спутниковый мониторинг озоносферы // Метеорология и гидрология. 2021. № 12. С. 71–79. <https://doi.org/10.52002/0130-2906-2021-12-71-79>
- Цветкова Н.Д., Варгин П.Н., Лукьянов А.Н., Кирюшов Б.М., Юшков В.А., Хаттатов В.У. Исследования химического разрушения озона и динамических процессов в стратосфере Арктики зимой 2019/20 г // Метеорология и гидрология. 2021. № 9. С. 70–83. <https://doi.org/10.52002/0130-2906-2021-9-70-83>
- Черемисин А.А., Маричев В.Н., Бочковский Д.А., Новиков П.В., Романченко И.И. Стратосферный аэрозоль сибирских лесных пожаров по данным лидарных наблюдений в Томске в августе 2019 г // Оптика атмосферы и океана. 2021. Т. 34. № 11. С. 898–905. <https://doi.org/10.15372/AOO20211110>
- Черемисин А.А., Маричев В.Н., Новиков П.В., Павлов А.Н., Шмирок К.А., Бочковский Д.А. Оценка переноса вулканического аэрозоля в стратосфере над Томском и Владивостоком в 2011 г. по данным лидарных наблюдений // Метеорология и гидрология. 2019. № 5. С. 50–62.
- Шашкин В.В., Толстых М.А., Володин Е.М. Моделирование циркуляции стратосферы с помощью полулагранжевой модели атмосферы ПЛАВ // Метеорология и гидрология. 2019. № 1. С. 5–21.
- Яковлев А.Р., Смышляев С.П. Численное моделирование воздействия Мирового океана на температуру и содержание озона в нижней и средней атмосфере // Метеорология и гидрология. 2019. № 9. С. 25–37.
- Bakhmetieva N.V., Grigoriev G.I. Study of the Mesosphere and Lower Thermosphere by the Method of Creating Artificial Periodic Irregularities of the Ionospheric Plasma // Atmosphere. 2022. V. 13. № 9. 1346. <https://doi.org/10.3390/atmos13091346>
- Bakhmetieva N.V., Kulikov Y.Y., Zhemyakov I.N. Mesosphere Ozone and the Lower Ionosphere under Plasma Disturbance by Powerful High-Frequency Radio Emission // Atmosphere. 2020. V. 11. № 11. 1154. <https://doi.org/10.3390/atmos11111154>
- Belyaev A.N. Local temperature changes in the mesosphere due to a “horizontally propagating” turbulent patch // J. Atmos. Sol.-Terr. Phys. 2019. V. 190. P. 62–73. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2019.05.006>
- Ermakova T.S., Koval A.V., Smyshlyaev S.P., Didenko K.A., Aniskina O.G., Savenkova E.N., Vinokurova E.V. Manifestations of Different El Niño Types in the Dynamics of the Extratropical Stratosphere // Atmosphere. 2022. V. 13 № 12. 2111. <https://doi.org/10.3390/atmos13122111>
- Gabis I.P. Quasi-biennial oscillation of the equatorial total ozone: A seasonal dependence and forecast for 2019–2021 // J. Atmos. Sol.-Terr. Phys. 2020. V. 207. 105353. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2020.105353>
- Gavrilov N.M., Kshevetskii S.P., Koval A.V. Thermal effects of nonlinear acoustic-gravity waves propagating at thermospheric temperatures matching high and low solar activity // J. Atmos. Sol.-Terr. Phys. 2020. V. 208. 105381. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2020.105381>

- Gavrilov N.M., Kshevetskii S.P., Koval A.V. Decay time of atmospheric acoustic-gravity waves after deactivation of wave forcing // *Atmos. Chem. Phys.* 2022. V. 22. № 20. P. 13713–13724.
<https://doi.org/10.5194/acp-22-13713-2022>
- Grankin D., Mironova I., Bazilevskaya G., Rozanov E., Egorova T. Atmospheric Response to EEP during Geomagnetic Disturbances // *Atmosphere*. 2023. V. 14. № 2. 273.
<https://doi.org/10.3390/atmos14020273>
- Grigoriev G.I., Lapin V.G., Kalinina E.E. Generation of Internal Waves in the Thermosphere during Operation of the SURFA Facility under Parametric Resonance Conditions // *Atmosphere*. 2020. V. 11. № 11. 1169.
<https://doi.org/10.3390/atmos11111169>
- Jakovlev A.R., Smyshlyaev S.P., Galin V.Y. Interannual Variability and Trends in Sea Surface Temperature, Lower and Middle Atmosphere Temperature at Different Latitudes for 1980–2019 // *Atmosphere*. 2021. V. 12. № 4. 454.
<https://doi.org/10.3390/atmos12040454>
- Karagodin A., Rozanov E., Mareev E., Mironova I., Volodin E., Golubenko K. The representation of ionospheric potential in the global chemistry-climate model SOCOL // *Sci. Total. Environ.* 2019. V. 697. 134172.
- Karagodin A., Rozanov E., Mironova I. On the Possibility of Modeling the IMF B_y-Weather Coupling through GEC-Related Effects on Cloud Droplet Coalescence Rate // *Atmosphere*. 2022. V. 13. № 6. 881.
<https://doi.org/10.3390/atmos13060881>
- Kolennikova M., Gushchina D. Revisiting the Contrasting Response of Polar Stratosphere to the Eastern and Central Pacific El Niños // *Atmosphere*. 2022. V. 13. № 5. 682.
<https://doi.org/10.3390/atmos13050682>
- Korotyshkin D., Merzlyakov E., Jacobi C., Lilienthal F., Wu Q. Longitudinal MLT wind structure at higher mid-latitudes as seen by meteor radars at central and Eastern Europe (13° E/49° E) // *Adv. Space Res.* 2019a. V. 63. № 10. P. 3154–3166.
<https://doi.org/10.1016/j.asr.2019.01.036>
- Korotyshkin D., Merzlyakov E., Sherstyukov O., Valiullin F. Mesosphere/lower thermosphere wind regime parameters using a newly installed SKiYMET meteor radar at Kazan (56°N, 49°E) // *Adv. Space Res.* 2019b. V. 64. № 7. P. 2132–2143.
<https://doi.org/10.1016/j.asr.2018.12.032>
- Koval A.V., Gavrilov N.M., Didenko K.A., Ermakova T.S., Savenkova E.N. Sensitivity of the 4–10-Day Planetary Wave Structures in the Middle Atmosphere to the Solar Activity Effects in the Thermosphere // *Atmosphere*. 2022. V. 13. № 8. 1325.
<https://doi.org/10.3390/atmos13081325>
- Koval A.V., Gavrilov N.M., Pogoreltsev A.I., Drobashkevskaya E.A. Numerical simulation of the mean meridional circulation in the middle atmosphere at different phases of stratospheric warmings and mountain wave scenarios // *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.* 2019. V. 183. P. 11–18.
<https://doi.org/10.1016/j.jastp.2018.12.012>
- Kulikov M.Yu., Belikov M.V., Grygalashvily M., Sonnemann G.R., Feigin A.M. Retrieving daytime distributions of O, H, OH, HO₂, and chemical heating rate in the mesopause region from satellite observations of ozone and OH* volume emission: The evaluation of the importance of the reaction $H + O_3 \rightarrow O_2 + OH$ in the ozone balance // *Adv. Space Res.* 2022. V. 69. № 9. P. 3362–3373.
<https://doi.org/10.1016/j.asr.2022.02.011>
- Medvedev A.V., Ratovsky K.G., Tolstikov M.V., Vasilyev R.V., Artamonov M.F. Method for Determining Neutral Wind Velocity Vectors Using Measurements of Internal Gravity Wave Group and Phase Velocities // *Atmosphere*. 2019. V. 10. № 9. 546.
<https://doi.org/10.3390/atmos10090546>
- Medvedeva I.V., Semenov A.I., Pogoreltsev A.I., Tatarnikov A.V. Influence of sudden stratospheric warming on the mesosphere/lower thermosphere from the hydroxyl emission observations and numerical simulations // *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.* 2019. V. 187. P. 22–32.
- Merzlyakov E., Korotyshkin D., Jacobi Ch., Lilienthal F. Long-period meteor radar temperature variations over Collm (51° N, 13° E) and Kazan (56° N, 49° E) // *Adv. Space Res.* 2021. V. 67. № 10. P. 3250–3259.
- Merzlyakov E., Solovyova T., Yudakov A., Korotyshkin D., Jacobi Ch., Lilienthal F. Some features of the day-to-day MLT wind variability in winter 2017–2018 as seen with a European/Siberian meteor radar network // *Adv. Space Res.* 2020a. V. 65. № 6. P. 1529–1543.
<https://doi.org/10.1016/j.asr.2019.12.018>
- Merzlyakov E., Solovyova T., Yudakov A., Korotyshkin D., Jacobi Ch., Lilienthal F. Amplitude modulation of the semidiurnal tide based on MLT wind measurements with a European/Siberian meteor radar network in October–December 2017 // *Adv. Space Res.* 2020b. V. 66. № 3. P. 631–645.
<https://doi.org/10.1016/j.asr.2020.04.036>
- 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. Lett.* 2019a. V. 46. P. 990–996.
<https://doi.org/10.1029/2018GL079421>
- Mironova I.A., Bazilevskaya G.A., Kovaltsov G.A., Artamonov A.A., Rozanov E.V., Mishev A., Makhmutov V.S., Karagodin A.V., Golubenko K.S. Spectra of high energy electron precipitation and atmospheric ionization rates retrieval from balloon measurements // *Sci. Total Environ.* 2019b. V. 693. P. 133–242.
- Mironova I., Kovaltsov G., Mishev A., Artamonov A. Ionization in the Earth's Atmosphere Due to Isotropic Energetic Electron Precipitation: Ion Production and Primary Electron Spectra // *Remote Sens.* 2021a. V. 13. 4161.
<https://doi.org/10.3390/rs13204161>
- Mironova I., Karagodin-Doyennel A., Rozanov E. The Effect of Forbush Decreases on the Polar-Night HO_x Concentration Affecting Stratospheric Ozone // *Front. Earth Sci.* 2021b. 8:618583.
<https://doi.org/10.3389/feart.2020.618583>
- Mironova I., Sinnhuber M., Bazilevskaya G., Clilverd M., Funke B., Makhmutov V., Rozanov E., Santee M.L., Sukhodolov T., Ulich T. Exceptional middle latitude electron precipitation detected by balloon observations: implications for atmospheric composition // *Atmos. Chem. Phys.* 2022. V. 22. P. 6703–6716.
<https://doi.org/10.5194/acp-22-6703-2022>
- Pikulina P., Mironova I., Rozanov E., Karagodin A. September 2017 Solar Flares Effect on the Middle Atmosphere // *Remote Sens.* 2022. V. 14. 2560.
<https://doi.org/10.3390/rs14112560>

- Popov A.A., Gavrilov N.M., Perminov V.I., Pertsev N.N., Medvedeva I.V. Multi-year observations of mesoscale variances of hydroxyl nightglow near the mesopause at Tory and Zvenigorod // *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.* 2020. V. 205. 105311.
https://doi.org/10.1016/j.jastp.2020.105311
- Shevchuk N., Pertsev N., Dalin P., Perminov V. Wave-induced variations in noctilucent cloud brightness: model and experimental studies // *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.* 2020. V. 203. 105257.
https://doi.org/10.1016/j.jastp.2020.105257
- Shpynev B.G., Khabituiev D.S., Chernigovskaya M.A., Zorkal'tseva O.S. Role of winter jet stream in the middle atmosphere energy balance // *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.* 2019. V. 188. P. 1–10.
https://doi.org/10.1016/j.jastp.2019.03.008
- Smyshlyaev S.P., Vargin P.N., Motsakov M.A. Numerical Modeling of Ozone Loss in the Exceptional Arctic Stratosphere Winter–Spring of 2020 // *Atmosphere*. 2021. V. 12. № 11. 1470.
https://doi.org/10.3390/atmos12111470
- Tolmacheva A.V., Bakhmetieva N.V., Grigoriev G.I., Egerev M.N. Turbopause range measured by the method of the artificial periodic irregularities // *Adv. Space Res.* 2019. V. 64. № 10. P. 1968–1974.
https://doi.org/10.1016/j.asr.2019.05.002
- Vargin P.N., Kostykin S.V., Volodin E.M., Pogoreltsev A.I., Wei K. Arctic Stratosphere Circulation Changes in the 21st Century in Simulations of INM CM5 // *Atmosphere*. 2022a. V. 13. № 1. 25.
https://doi.org/10.3390/atmos13010025
- Vargin P.N., Koval A.V., Guryanov V.V. Arctic Stratosphere Dynamical Processes in the Winter 2021–2022 // *Atmosphere*. 2022b. V. 13. № 10. 1550.
https://doi.org/10.3390/atmos13101550
- Veretenenko S. Effects of Solar Proton Events of January 2005 on the middle atmosphere dynamics in the Northern hemisphere // *Adv. Space Res.* 2021a. V. 68. № 4. P. 1814–1824.
https://doi.org/10.1016/j.asr.2021.04.005
- Veretenenko S.V. Effects of Energetic Solar Proton Events of Solar Cycle 23 on Intensity of the Stratospheric Polar Vortex // *Geomagn. Aeron.* 2021b. V. 61. № 7. P. 985–992.
https://doi.org/10.1134/S0016793221070227
- Veretenenko S. Stratospheric Polar Vortex as an Important Link between the Lower Atmosphere Circulation and Solar Activity // *Atmosphere*. 2022a. V. 13. № 7. 1132.
https://doi.org/10.3390/atmos13071132
- Veretenenko S.V. Effects of Solar Proton Events of January 2005 on the Middle Atmosphere Circulation in the Southern Hemisphere // *Geomagn. Aeron.* 2022b. V. 62. № 7. P. 924–931.
https://doi.org/10.1134/S0016793222070180
- Veretenenko S., Ogurtsov M. Manifestation and possible reasons of ~60-year oscillations in solar-atmospheric links // *Adv. Space Res.* 2019a. V. 64. № 1. P. 104–116.
https://doi.org/10.1016/j.asr.2019.03.022
- Veretenenko S.V., Ogurtsov M.G. 60-Year Cycle in the Earth's Climate and Dynamics of Correlation Links between Solar Activity and Circulation of the Lower Atmosphere: New Data // *Geomagn. Aeron.* 2019b. V. 59. № 7. P. 908–917.
https://doi.org/10.1134/S0016793219070260
- Veretenenko S.V., Ogurtsov M.G. Influence of Solar-Geophysical Factors on the State of the Stratospheric Polar Vortex // *Geomagn. Aeron.* 2020. V. 60. № 7. P. 974–981.
https://doi.org/10.1134/S0016793220070282
- Yankovsky V., Vorobeve E., Manuilova R. New techniques for retrieving the [O(³P)], [O₃] and [CO₂] altitude profiles from dayglow oxygen emissions: Uncertainty analysis by the Monte Carlo method // *Adv. Space Res.* 2019. V. 64. № 10. P. 1948–1967.
https://doi.org/10.1016/j.asr.2019.07.020
- Zuev V.V., Saveliyeva E. Arctic polar vortex splitting in early January: The role of Arctic Sea ice loss // *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.* 2019a. V. 195. 105137.
https://doi.org/10.1016/j.jastp.2019.105137
- Zuev V.V., Saveliyeva E. The cause of the strengthening of the Antarctic polar vortex during October–November periods // *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.* 2019b. V. 190. P. 1–5.
https://doi.org/10.1016/j.jastp.2019.04.016

Russian Studies of the Middle Atmosphere in 2019–2022

A. A. Krivolutsky^{1, *} and S. V. Veretenenko²

¹Central Aerological Observatory, Roshydromet, Pervomayskaya st., 3, Dolgoprudny, 141701 Russia

²Ioffe Institute, Russian Academy of Sciences, Politekhnikeskaya st., 26, St. Petersburg, 194021 Russia

*e-mail: krivolutsky@mail.ru

A review of the results of Russian studies of the middle atmosphere in 2019–2022 prepared by the Commission of the Middle Atmosphere of the Meteorology and Atmospheric Sciences Section (MASS) of the Russian National Geophysical Committee for the National Report on Meteorology and Atmospheric Sciences to the XXVIII General Assembly of the International Union of Geodesy and Geophysics (Germany, 2023)* is presented.

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