

на правах рукописи



Перцев Николай Николаевич

**Регулярная и нерегулярная изменчивость
температуры и характеристик серебристых
облаков в области среднеширотной мезопаузы**

Специальность 25.00.29 - Физика атмосферы и гидросферы

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Москва
2015

Работа выполнена в:

Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте физики атмосферы им. А.М. Обухова Российской академии наук

Официальные оппоненты:

Гвишвили Гиви Васильевич, доктор физико-математических наук, зав. лабораторией Института земного магнетизма и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова Российской академии наук

Лапшин Владимир Борисович, доктор физико-математических наук, профессор, директор Института Прикладной Геофизики им. академика Е.К.Федорова Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды

Портнягин Юрий Иванович, доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник Института экспериментальной метеорологии НПО «Тайфун» Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования Санкт-Петербургский Государственный Университет

Защита диссертации состоится 12 ноября 2015г. в 11 часов на заседании диссертационного совета Д002.096.01 по защите диссертаций на соискание ученой степени доктора наук при Институте физики атмосферы им. А.М. Обухова Российской академии наук по адресу: 119017, Москва, Пыжевский пер., 3.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте www.ifaran.ru Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики атмосферы им. А.М. Обухова

Автореферат разослан « 16 » июля _____ 2015г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
кандидат геогр. наук



Л.Д.Краснокутская

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследований. Изучение динамических процессов, протекающих в различных слоях атмосферы Земли и взаимодействия самих слоев и оболочек Земли является одной из важнейших задач геофизики. Мощное развитие аэрокосмических и наземных систем наблюдения за состоянием и динамикой атмосферы на различных высотах, обеспечивающее накопление новых данных измерений, требует разработки глобальных эмпирических и полуэмпирических моделей атмосферных характеристик, учитывающих временную и пространственную изменчивость метеорологических полей.

Одним из слоев, требующих таких обобщений, является область мезопаузы (высоты ~ 75 — 105 км). Как и другие области атмосферы, область мезопаузы даже в первом приближении нельзя считать статической для многих практических задач, поскольку регулярные и нерегулярные изменения в ней весьма значительны. Анализ результатов обработки данных измерений показывает постоянное присутствие в области мезопаузы возмущений разных пространственно-временных масштабов. Важнейшим свойством атмосферных гидродинамических волн является то, что при распространении из нижних слоев в более высоко-лежащие, они переносят энергию и импульс. Диссипируя на высотах средней атмосферы и термосферы, эти волны передают энергию и импульс среде, воздействуя таким образом на тепловой баланс и среднезональную циркуляцию. Турбулентность, тесно взаимодействуя с атмосферными волнами, рождает вертикальные тепловые и диффузионные потоки. Исходя из всего этого, приходим к выводу, что, с одной стороны, область мезопаузы может быть изучена лишь в совокупности с соседними к ней слоями, с другой стороны, знание пространственной и временной изменчивости области мезопаузы необходимо для изучения соседних с ней слоев.

Исследованию изменчивости области мезопаузы уделяется большое внимание практически во всех международных проектах по

среднеатмосферной и солнечно-земной физике. Например, в последние годы выполняются глобальные международные программы NDMC (Network for the Detection of Mesopause Change, с 2007 г., продолжается) и CAWSES- II (Climate And Weather of the Sun-Earth System, 2009-2013), вторая из которых организована и проводится под руководством Scientific Committee on Solar-Terrestrial Physics (SCOSTEP). Часть работ, представленных в диссертации, выполнялась в рамках указанных проектов (автор входил в одну из рабочих групп – «PMC/NLC altitude, frequency and brightness changes related to changes in dynamics and chemical composition» программы CAWSES-II). Кроме указанной рабочей группы еще две рабочих группы программы CAWSES-II занимались непосредственно вопросами изменчивости области мезопаузы. В настоящее время начато выполнение новой международной программы VarSITI (Variability of the Sun and its terrestrial impact), пришедшей на смену CAWSES-II. Актуальность изучения динамических процессов, обуславливающих изменчивость области мезопаузы, объясняется также тем, что пространственные и временные неоднородности различных масштабов, наблюдаемые в нейтральной средней атмосфере и ионосфере Земли, играют важную роль в функционировании современных технологических систем. Точность локализации наблюдаемых объектов с помощью спутниковых навигационных систем зависит от состояния ионосферы, которое в большой степени определяется системой ветров нейтральных частиц на ионосферных высотах. Изменчивость нижней части области E ионосферы, тесно связанная с изменчивостью области мезопаузы, определяет непостоянные условия распространения радиоволн в диапазоне 0,2-6 МГц.

Слои и оболочки Земли подвержены непостоянным по времени космическим воздействиям и возрастающему агрессивно-технологическому воздействию человечества. Некоторые длительные циклы автоколебаний и космических влияний еще не изучены и даже не найдены, поскольку некоторые новые методы измерений существуют меньше четверти века. Не все найденные из измерений закономерности получили однозначную теоретическую интерпретацию. Аэрономия и физика атмосферы сталкиваются и обязательно

будут сталкиваться в дальнейшем с новыми практическими задачами, включающими и область мезопаузы.

Степень разработанности научной темы. Работа достаточно полно описывает все наиболее важные черты изменчивости температурного поля среднеширотной области мезопаузы и мезосферно-облачных полей, подтвержденные измерениями и известные на момент написания основного содержания диссертации (2014 г.).

Цели и задачи работы. Для статистически достоверных выводов по этой теме было необходимо объединить измерения и наблюдения прошлых десятилетий с гораздо большим объемом информации последних десятилетий, связанным с техническим прогрессом в наземных измерениях и возникновением спутниковых измерений. Кроме того, нужно было вычлнить из всего многообразия динамических процессов в средней атмосфере отдельные составляющие, такие как акустико-гравитационные волны, или планетарные волны, или турбулентную диффузию и изучить поведение этих составляющих на моделях. В связи с этим, целью работы стало не чисто статистическое описание изменчивости области мезопаузы (например, через пространственно-временные спектры), а выделение и исследование отдельных составляющих изменчивости, связанных с конкретными причинами регулярных и нерегулярных возмущений и оценки соответствующих вкладов в дисперсию измеряемой величины. Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

- Провести по единой методике измерения инфракрасных эмиссий области мезопаузы и систематическую фотосъемку серебристых облаков на интервалах времени, превышающих 11-летний цикл солнечной активности. Изучить основные составляющие изменчивости температуры и других связанных с ней характеристик области мезопаузы в разных диапазонах периодов от 20 минут до десятков лет.
- Отобрать и проанализировать результаты измерений температуры и

инфракрасных эмиссий области мезопаузы во время внезапных стратосферных потеплений (ВСП) за много лет. Исследовать межсуточный ход ночной изменчивости температуры. Согласовать картины температурных возмущений в период ВСП по данным наземных и спутниковых измерений. Выяснить, являются ли универсальной реакция температуры области мезопаузы на ВСП на разных долготах.

- Изучить возможности распространения квазистационарных гравитационных волн от орографических источников в область мезопаузы.
- Создать международную сеть автоматических фотокамер для регистрации серебристых облаков, отладить и скоординировать методику автоматической фотосъемки, проанализировать ее результаты и применить их к изучению изменчивости среднеширотной летней верхней мезосферы. Сопоставить ее результаты со спутниковыми данными и сделать на этой основе выводы о чувствительности серебристых облаков как индикатора относительной влажности.
- Разработать алгоритм, создать и испытать численную модель для расчета распространения и диссипации атмосферных гравитационных волн (АГВ) с учетом реалистических фоновых вертикальных профилей температуры и скорости ветра, а также молекулярной диссипации. Изучить с ее помощью распространение отдельных монохроматических волн и стандартного ансамбля АГВ через среднюю атмосферу относительно различных температурно-ветровых условий, характерных для различных сезонов и различных уровней солнечной активности.
- Изучить связь между изменениями характеристик области мезопаузы и солнечной активности. Выявить сезонный ход и оценить статистическую достоверность этих зависимостей. То же - для характеристик области мезопаузы и лунных координат: лунного

времени, лунной фазы, склонения Луны и расстояния до Луны.

- Построить и исследовать многолетние ряды среднесезонных характеристик серебристых облаков по данным наземных измерений, очищенных от влияния погоды в тропосфере. Проверить гипотезу Гадсдена об увеличении количества появлений серебристых облаков.

Научная новизна работы состоит, прежде всего, в разработке новых подходов к анализу данных по области мезопаузы, заключающихся, с одной стороны, в разграничении регулярных и нерегулярных составляющих их изменчивости, с другой стороны, в построении алгоритмов получения физически обоснованных рядов среднесезонных характеристик серебристых облаков.

В ходе выполнения работы был получен ряд принципиально новых результатов, из которых наиболее яркими являются следующие:

- Наиболее вероятное поведение температуры в период внезапного стратосферного потепления характеризуется их уменьшением в период максимума ВСП и последующим (через 4 - 6 дней) увеличением, длящимся от 2 до 6 дней. При этом межсуточный ход ночной изменчивости температуры, то есть ее стандартного отклонения, обусловленного в основном приливами и внутренними гравитационными волнами, имеет только максимум, возникающий синхронно с максимумом температуры.
- Создана модель AGWWND для расчета распространения монохроматических атмосферных гравитационных волн в средней атмосфере с произвольными профилями температуры и ветра с учетом молекулярной диссипации. Проведена систематическая автоматическая наземная фотосъемка серебристых облаков с помощью межконтинентальной сети цифровых фотокамер и проанализированы ее результаты за несколько лет. Показано, что эта сеть позволяет изучать их движения серебристых облаков северного полушария на различных пространственных масштабах.
- Впервые обнаружены значимый регулярный лунный полумесячный

зональный прилив, в температуре гидроксильного слоя и яркости серебристых облаков. Показано, что воздействие полумесячного зонального прилива на температуру зимой и летом противоположно.

- Показано, что сезонная активность мезосферных облаков по московским данным – за последние полвека, а по европейским, канадским и спутниковым данным в интервале широт $50\text{--}64^\circ \text{N}$ – за последние четверть века характеризуется околонулевыми статистически не значимыми долговременными трендами

Научная и практическая ценность работы заключается в том, что результаты исследования изменчивости области мезопаузы могут быть использованы для планирования наблюдений и экспериментов и для интерпретации результатов наблюдений для изучения как области мезопаузы, так и других слоев атмосферы. Так, подход по выявлению лунных эффектов в серебристых облаках позже был распространен на исследование лунных эффектов в тропосферной облачности, причем у этих двух явлений обнаружили общие черты.

Методология исследования. Работа автора над темой проходила по линиям разработки методики наблюдений и измерений, включая отбор, приобретение, подготовку, калибровку аппаратуры; проведения наблюдений и измерений; анализа данных собственных измерений и измерений других коллективов, включая статистический анализ; синтеза результатов разнородных измерений; построения аналитических и численных моделей изучаемых процессов, проведения и анализа расчетов с их помощью; сбора и критической оценки научной информации из всех открытых источников.

На защиту выносятся следующие теоретические положения, сформулированные на основе проведенных автором исследований. Их совокупность, по мнению автора, может быть квалифицирована как научное достижение:

1. На основе многолетних спектрофотометрических измерений излучения гидроксила среднеширотной области мезопаузы с

привлечением результатов других методов построено самосогласованное количественное описание основных составляющих изменчивости температуры среднеширотной области мезопаузы на временных масштабах от десятков минут до десятков лет.

2. В области среднеширотной мезопаузы существует регулярный (сохраняющий фазу в одинаковые сезоны многолетнего периода наблюдений) лунный полумесячный зональный прилив со средним периодом 13.66 дней., имеющий измеримую амплитуду (в температуре ~ 2.5 К зимой, 1.2 К летом).
3. Предложена и отработана методика построения многолетних временных рядов характеристик серебристых облаков (частота появлений и яркость), позволяющих параметризовать интегральную за сезон наблюдения активность серебристых облаков по данным систематических наземных наблюдений. По этой методике на основе данных наблюдений серебристых облаков в московском регионе построены самые длительные в мире (с 1962 г. по настоящее время) временные ряды вероятности появления серебристых облаков в ясную ночь и накопленной за сезон суммарной яркости (с погодной корректировкой).
4. На основе построенных временных рядов сезонных характеристик активности серебристых облаков обоснована новая концепция об околонулевых временных трендах в характеристиках серебристых облаков в современную эпоху, на смену предыдущей концепции М.Гадсдена о постепенном росте активности серебристых облаков.
5. Получены оценки реакции мезопаузы на внезапные стратосферные потепления (ВСП), с учетом изменений среднезональной температуры и перестройкой ансамблей планетарных, приливных и гравитационных волн. Реакция температуры в конкретном долготном секторе области мезопаузы на стратосферное потепление определяется как поведением среднезональной температуры, так и, в

большой степени, наложением планетарных волн разного периода. Эта реакция сильно зависит от долготы. При всех возможных многообразиях откликов температуры области мезопаузы на ВСП у них сохраняются некоторые общие черты, подразумевающие, в частности, наличие стационарных планетарных волн вблизи мезопаузы с холодной ложбиной в районе Атлантики и Европы.

6. Показано, что в период ВСП вертикальный градиент температуры в области мезопаузы испытывает зависящие от долготы довольно резкие изменения, которые влияют на прохождение атмосферных гравитационных волн в область мезопаузы.

Рекомендации по использованию сформулированных теоретических положений. Положения (1) и (2) рекомендуется использовать при анализе данных (в частности, обязательном разделении данных по сезону), построении эмпирических моделей средней атмосферы с учетом лунных возмущений, а также математическом моделировании распространения приливных волн в атмосфере (для уточнения параметрических факторов). Положения (3) и (4) следует использовать при построении эмпирических и математических моделей области мезопаузы с учетом субвековых трендов. Положения (5) и (6) дают полезные методические указания для изучения и моделирования ВСП. В частности, из них следует, что ни зонально-осредненное, ни локальное по долготе описание происходящих изменений не позволяют провести адекватное изучение перестройки области мезопаузы во время ВСП.

Достоверность полученных в диссертации результатов определяется тем, что проведенный анализ данных измерений и наблюдений основан на общепринятых в современной геофизике статистических подходах, а моделирование, в том числе и численное, – на фундаментальных законах физики. Результаты диссертации самосогласованны и не противоречат никаким результатам других исследователей.

Апробация работы. Результаты, представленные в диссертации, докладывались на международных и всероссийских симпозиумах и конференциях, в том числе и за последние годы: 18th ESA Symposium on

European rocket and balloon programmes and related research (Visby, 2007), 9th Workshop on Layered Phenomena in the Mesopause Region (Stockholm, 2009), МСАРД-2011 (Санкт-Петербург, 2011), 10 Всероссийская открытая конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» (Москва, 2012), 2nd CAWSES-II Task 2 Workshop: Modeling Polar Mesospheric Cloud Trends, (Boulder, 2012), МСАРД-2013 (Санкт-Петербург, 2013), CAWSES-II Symposium (Nagoya, 2013), 40th COSPAR Scientific Assembly (Москва, 2014), на научных семинарах и публиковались в 43 статьях в рецензируемых журналах. Содержание диссертации в целом докладывалось в 2015 г. на семинарах в МГУ и Институте физики атмосферы.

Поддержка исследований. Часть исследований, лежащих в основе диссертации, были поддержаны российскими и международным грантами. Это 12 инициативных проектов РФФИ, из них в 4-х автор являлся или является руководителем, в остальных – исполнителем, грант МНТЦ № 2274 (исполнитель).

Соавторство и личный вклад. Большинство исследований, составивших основу диссертации, выполнены в соавторстве с П.А.Далиным, В.И.Перминовым, А.И.Погорельцевым, В.А.Ромейко, А.И.Семеновым, Н.Н.Шефовым и др. Автор благодарен перечисленным соавторам за многолетнее плодотворное сотрудничество, а Н.Н.Шефову и А.И.Семенову – и за общее руководство исследованиями области мезопаузы в Институте физики атмосферы. Автор признателен также сотрудникам Лаборатории физики верхней атмосферы за многолетние измерения спектров гидроксильного свечения и наблюдателям серебристых облаков многих стран за участие в программах наблюдений. Все основные результаты получены автором или при его активном участии. Теоретические положения, выносимые на защиту, сформулированы автором лично.

Общая структура и объем работы. Диссертация состоит из Введения, четырех глав, Заключение, Приложения и списка литературы. Содержит 273 страниц текста, включая 97 рисунков и фотоснимков и библиографический список из 435 ссылок.

Краткое содержание диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и приложения, в котором дается сводка основных составляющих температурной изменчивости области мезопаузы и соответствующие оценки. Во введении дается общая характеристика работы (приводится обоснование актуальности темы исследования, обсуждается степень ее разработанности и новизна результатов, научная значимость, формулируются цели и задачи работы, описывается методология исследований, перечисляются положения, выносимые на защиту, приводятся сведения о достоверности и апробации результатов, а также личном вкладе автора).

1. Область мезопаузы и методы ее изучения

В начале первой главы дается характеристика особенностей свойств области мезопаузы (ОМ). Мезопауза летнего полушария – самое холодное место в атмосфере Земли.

Как показал анализ климатических данных для второй половины XX века [Golitsyn et al. 1996], температурные тренды в приземной атмосфере оказались очень малы по сравнению с трендами в ОМ. В самом деле, в ОМ и ни в каком другом слое атмосферы изменения абсолютной температуры за несколько десятилетий XX века достигали 15% [Golitsyn et al. 1996], только здесь климатические изменения XIX века имели такое яркое свидетельство, как возникновение нового природного объекта – мезосферных облаков. Кроме того, тепловые изменения в нижней тропосфере могут запаздывать по сравнению с областью мезопаузы на десятилетия из-за большой постоянной времени системы атмосфера – океан [Thomas 1996]. Все сказанное выше позволяет говорить об ОМ, как возможном предвестнике происходящих климатических изменений, обусловленных антропогенными и естественными факторами, во всей толще средней атмосферы.

В разделе 1.2 автор перечисляет основные измеряемые характеристики области мезопаузы и излагает принципы используемых методов измерений. При этом большее внимание уделяется спектрофотометрическим измерениям тем-

пературы излучающего слоя гидроксила области мезопаузы и методам, основанным на изучении серебристых облаков, поскольку именно этими методами получены многочисленные результаты, приведенные в диссертации.

Гидроксильный метод позволяет по соотношению интенсивностей отдельных линий спектра полос молекул ОН рассчитать вращательную температуру гидроксильного излучения, совпадающего с температурой окружающего воздуха в излучающем слое. На Рис. 1 показан спектр свечения неба (780 – 1020 нм), измеренный на Звенигородской научной станции ИФА.

Кроме вращательной температуры, в диссертации широко используется отношение интенсивностей двух полос гидроксила, ОН(7-3) и ОН(9-4). Его можно применять в качестве индикатора вертикального смещения излучающего слоя гидроксила [17]. В отличие от интенсивности излучения, эта переменная и вращательная температура нечувствительны к полупрозрачной облачности, часто вносящей помехи при измерениях спектров свечения неба.

Значительная часть раздела 1.2 посвящена развитию методов изучения области мезопаузы, связанных с серебристыми облаками. Во-первых, благодаря хорошо организованному любительским наблюдениям серебристых облаков прошлых лет в Подмоскowie удалось получить и проанализировать научно обоснованные временные ряды, связанные с активностью серебристых облаков, с 1962 г. Во-вторых, с 2004 г. международная инициативная группа наблюдателей серебристых облаков при активном участии автора диссертации перевела наземные наблюдения на качественно новый уровень, создав сеть автоматической фотосъемки серебристых облаков северного полушария (САФСО). Пункты САФСО (Рис. 2) находятся практически на одной широте 53-56°. Фотосъемка и последующий анализ серебристых облаков ведутся по единой программе, обеспечивающей синхронность и одинаковый интервал.

2. Регулярная цикличность характеристик области мезопаузы

Вторая глава диссертации посвящена описанию вынужденных колебаний области мезопаузы, возникающих благодаря регулярным и хорошо известным причинам – годовому циклу обращения Земли, суточному вращению Земли, а

также тесно связанным с этим вращением солнечным и лунным приливом. Из перечисленных регулярных воздействий заведомо преобладающее влияние имеет годовой цикл. Годовое колебание описывается либо как последовательность среднемесячных значений исследуемой величины, либо в виде амплитуд и фаз трех первых гармоник (их количество определяется степенью сглаживания). Приводится результат оценки соответствующих амплитуд и фаз (см. Табл. 1) для Звенигородской Научной Станции (56° N, 37° E) и Обсерватории Торы (52° N, 103° E).

Для изучения суточного цикла кроме данных гидроксильных измерений используются также данные методов, основанных на круглосуточных радарных измерениях [Портнягин и др., 2011], которые позволяют находить амплитуды и фазы нескольких первых гармоник суточного прилива в зональном и меридиональном ветре для любого сезона. В разделе 2.2 диссертации предлагаются оценки амплитуд и фаз первых трех гармоник регулярных (осредненных за много дней измерений) суточных приливов, найденные тремя методами, - из температуры области мезопаузы, измеренной лидарным методом; из температуры гидроксильного слоя, измеренной спектрофотометрическим методом (для зимнего сезона); и из модели вертикального приливного ветра, пересчитанной в температуру. Каждый из этих трех методов имеет свои плюсы и минусы; в диссертации приводятся обобщенные оценки разброса амплитуд первых трех гармоник суточного прилива, найденных всеми перечисленными методами.

Кроме годового и суточного цикла, в области мезопаузы достоверно проявляется еще один из регулярных источников – лунные приливы. В диссертации проанализированы колебания, которые обнаруживаются в характеристиках области мезопаузы благодаря изменению трех наиболее физически значимых координат Луны при ее движении относительно Земли – экваториального склонения, геоцентрического расстояния и лунной фазы (более строго, лунная фаза описывает не взаимное движение Луны и Земли, а угол Солнце-Земля-Луна). В результате предпринятого поиска отклик на колебания всех трех аргументов был найден с разной степенью достоверности

в вероятности появления серебристых облаков и их интегральной за сезон яркости, в температуре гидроксильного слоя и в интенсивности гидроксильной эмиссии области мезопаузы. Эти результаты [27, 32, 50] стали обобщением более ранних работ, начиная с [Шефов, 1967] для гидроксильного слоя и [Кропоткина и др., 1975] для серебристых облаков, в которых аргументами были лишь лунная фаза и/или лунное время.

В [50] впервые предпринят одновременный поиск и получены согласованные результаты по лунным полумесячным зональным (управляемыми лунными склонениями) приливам, лунным полумесячным синодическим и лунным полусуточным приливам в данных по яркости серебристых облаков, летнему и зимнему гидроксильному излучению на основе многомерного регрессионного анализа.

Для зимнего гидроксильного слоя различные гармоники лунных приливов статистически значимы для гидроксильной температуры T_{OH} и отношения $I_{7,9}$ интенсивностей двух полос гидроксила. В первой из них обнаружено влияние полумесячного зонального и полумесячного синодического приливов. Временной ряд $I_{7,9}$ указывает на присутствие лунного полусуточного прилива (Таблица 2).

Для летнего гидроксильного слоя (Таблица 3) статистически значимы те же гармоники, что и зимой (зимой уровень значимости 0.1, летом 0.2) и, при этом полумесячный синодический и полусуточный прилив не различимы (являются взаимно-маскирующими гармониками).

Для летнего гидроксильного слоя наиболее правдоподобна такая интерпретация взаимно-маскирующих гармоник, которая совпадает с результатами для зимнего гидроксильного слоя. При этом температура гидроксильного слоя увеличивается зимой и уменьшается летом при приближении Луны к нулю склонения и к фазам $\sim -45^\circ$ и 135° (середина между сизигием и предшествующей ему квадратурой).

Яркость серебристых облаков показывает значимый полумесячный синодический либо полусуточный прилив. Этот сигнал оказывается приблизительно противофазным с температурой гидроксильного слоя -

уменьшению температуры соответствуют более яркие серебристые облака, что вполне естественно, поскольку меньшие температуры соответствуют большим относительным влажностям окружающего воздуха. Впервые рассмотрены [50] два возможных механизма возникновения лунного полумесячного синодического колебания – через полумесячную синодическую модуляцию расстояния от Земли до Луны и через демодуляцию полумесячной огибающей сигнала с полусуточной несущей частотой. На основе статистического анализа температуры гидроксильного слоя показано, что первый из этих механизмов не дает заметного вклада в результат. Указан вероятный путь осуществления демодуляции – квадратичная демодуляция (возведение в квадрат суперпозиции исходных синусоид).

3. Нарушения регулярной цикличности характеристик области мезопаузы

В начале третьей главы указываются причины, благодаря которым возникают нарушения регулярных циклов изменения параметров области мезопаузы: годового, суточного, лунно-приливных.

Далее в разделах 3.2 и 3.3 рассматриваются характеристики изменчивости ОМ в разных частотных диапазонах – внутри-суточном (длина рядов не превышает суток), внутри-сезонном (берется один и тот же сезон в течение одного или нескольких лет, внутри-суточные колебания сглаживаются, а межгодовые вычитаются) и межгодовом (берутся многолетние ряды, сравниваются среднемесячные значения одного месяца или параметры годового цикла за много лет). Колебания характеристик в области мезопаузы во внутри-суточном диапазоне связаны с атмосферными гравитационными волнами и приливами, во внутрисезонном – в основном с планетарными волнами. В разделе 3.2 и Приложении приведены дисперсии температуры гидроксильного слоя, найденные для этих диапазонов. По данным [45] внутри-суточная часть дисперсии составляет $10 \div 30 \text{ K}^2$ в зависимости от сезона, а внутри-сезонная - $20 \div 150 \text{ K}^2$. Полная дисперсия температуры ОН*- слоя оценивается как $400 \pm 70 \text{ K}^2$. В зимнее время большой разброс значений

внутри - сезонной изменчивости может давать присутствие или отсутствие стратосферного потепления в данную зиму, что оказывает большое влияние на область мезопаузы [41, 44, 45]. Примеры внутри - суточных и внутри – сезонных нерегулярных вариаций температуры гидроксильного слоя показаны на Рис. 3 и 4. Вклад межгодовых вариаций температуры составляет $6 \div 17 \text{ K}^2$. Они вызваны в основном изменениями солнечной активности, а также планетарными колебаниями, затрагивающими многие слои атмосферы, на периодах более года. Среди последних наиболее известно Квазидвухлетнее Колебание (КДК). Предлагаются оценки влияния КДК на сезонный ход среднеширотной гидроксильной температуры. Заметнее всего это влияние проявляется в амплитудах годовой ($\sim 8\%$) и полугодовой ($\sim 6\%$) гармоник и заключено в пределах $\sim \pm 2 \text{ K}$.

Для изучения влияния солнечной активности на сезонный ход среднеширотной температуры гидроксильного слоя были использованы несколько различных баз данных и подходов:

ЭМПИРИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТЕМПЕРАТУРЫ И ПЛОТНОСТИ СРЕДНШИРОТНОЙ СРЕДНЕЙ АТМОСФЕРЫ [25, 26, 28]. Эта модель создана на базе среднемесячных [Semenov et al., 2002] вертикальных профилей температуры основе измерений ракетным, спектрофотометрическим и ионосферным методами в интервале высот 25-110 км, широт 43-57° N (без учета меридиональных градиентов) и лет (1976-1991). Это позволило создать эмпирическую модель суммарной концентрации, учитывающей высоту, сезон, номер года и уровень солнечной активности. Запаздывание реакции средней атмосферы на изменение солнечной активности не учитывалось. С помощью этой модели было выяснено, что существенный рост влияния солнечной активности (выраженного с помощью коэффициентов регрессии) на температуру и плотность средней атмосферы начинается уже с 70 км. Именно эта находка составляет главное преимущество рассматриваемой эмпирической модели перед общепринятыми моделями в то время моделями [CIRA-1986, Nedín 1991], где солнечная активность учитывалась только начиная с 95 км. Проводится сопоставление с другими результатами для того же интервала лет

по температурным трендам в области мезопаузы, отмечается неплохое согласие.

РЕГРЕССИОННОЕ ОПИСАНИЕ [45] ВЛИЯНИЯ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ В ЭМПИРИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ТЕМПЕРАТУРЫ ГИДРОКСИЛЬНОГО СЛОЯ ПО ИЗМЕРЕНИЯМ НА ОДНОЙ ШИРОТЕ (57° N). Создано на базе спектрофотометрических измерений на Звенигородской научной станции ИФА с 2000 по 2011 гг. Для исключения влияния сезонной неравномерности количества измерений была использована модель сезонного хода гидроксильной температуры дня с начала года, (\bar{T} - среднегодовая температура, B_n, φ_n - искомые амплитуды и фазы):

$$T = \bar{T} + \sum_{n=1}^3 B_n \cdot \cos\left(\frac{2\pi n}{365.25d}(t_d - \varphi_n)\right)$$

По этой технологии за период 2000-2011 гг. были построены временные ряды значений \bar{T} , B_n, φ_n с шагом в полгода. Эти временные ряды, в свою очередь, проверялись на линейную регрессию со значениями индекса солнечной активности $F_{10.7}$, осредненными за год, с учетом медленного тренда по времени:

$$Y(F_{10.7}, t) = K_{sol} \frac{F_{10.7}}{100} + K_{trend}(t - 2000) + Y_o,$$

где $Y(F_{10.7}, t)$ – исследуемый параметр, t – номер года, Y_o – константа, K_{sol} и K_{trend} – коэффициенты регрессии для зависимости от солнечной активности и линейного тренда по времени. Соответствующие регрессионные зависимости оказались значимыми для \bar{T} , $B_1, \varphi_1, B_2, \varphi_2$; коэффициенты регрессии K_{sol} даны в Таблице 4, в расчете на 100 sfu¹.

РЕГРЕССИОННОЕ ОПИСАНИЕ ВЛИЯНИЯ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ С УЧЕТОМ ВОЗМОЖНОГО ЗАПАЗДЫВАНИЯ. Указанное выше запаздывание

¹ Перепад между среднегодовыми значениями $F_{10.7}$ в годы минимума (2009) и максимума (2002) солнечной активности составляет ~ 120 sfu. Единица индекса $F_{10.7}$ 1 sfu = 10^{-22} Вт м⁻² Гц⁻¹

оказывается действительно невелико, если данные всех сезонов объединять вместе. Несколько другой результат получается для данных, разделенных по сезонам, с учетом запаздывания. Как хорошо видно на Рис. 5, наилучшая ковариация для среднесезонных зимних и летних гидроксильных температур (предварительно исключены среднемноголетний сезонный ход, а для зимних данных и среднемноголетний суточный ход) получается, если кривую солнечной активности для зимы сдвигать вперед (на 1.5 года), а для лета - назад (на 2 года). Сдвиг фаз найден не только между ~11-летним солнечным циклом и соответствующим циклом в температуре, но и между солнечной активностью и характеристиками мезосферных облаков. Существование этого сдвига означает преобладание непрямого воздействия солнечной активности на характеристики области мезопаузы. В диссертации сделано предположение, что воздействие солнечной активности проводится в основном через механизмы, регулирующие циркуляцию средней атмосферы. Основываясь на московской базе данных по серебристым облакам с 1962 г., авторам [22, 24] удалось найти более тонкие эффекты, связанные с запаздыванием среднеатмосферных процессов по отношению к солнечному циклу. А именно, было показано, что автоспектр рядов 40-летней длины, описывающих среднесезонную частоту появления серебристых облаков и интегральную за сезон яркость, имеет статистически- достоверную разницу в периоде декадного колебания с периодом солнечного цикла, $9 \div 9.5$ лет для характеристик серебристых облаков вместо 10.5 лет для индекса $F_{10.7}$. Недавняя проверка на продленном на один солнечный цикл ряде подтвердила прежний вывод и показала его независимость от замены индексов солнечной активности $F_{10.7}$ на $Ly-\alpha$. Наиболее вероятная интерпретация результата заключается в постепенном изменении сдвига фаз между солнечным циклом и откликом серебристых облаков (уменьшение его на $1 \div 1.5$ года за 10 лет), что должно быть связано с постепенным изменением свойств средней атмосферы. В качестве другого возможного объяснения авторами предлагалось существование другого колебательного процесса в средней атмосфере, напрямую не связанного с солнечным циклом и маскирующего последний.

Таблица 1. Характеристики сезонных вариаций температуры мезопаузы по наблюдениям на ЗНС и в Горах 2000-2011 гг (по [34, 45]).

Место наблюдения, годы	Средняя температура, К	Годовая гармоника		Полугодовая гармоника		Треть-годовая гармоника	
		Амплитуда, К	Фаза максимума, день года	Амплитуда, К	Фаза первого максимума, день года	Амплитуда, К	Фаза первого максимума, день года
ЗНС (2000-2011)	192.7±0.2	23.9±0.3	352.6±0.7	7.2±0.3	78.4±1.2	1.6±0.3	105.1±3.4
ЗНС (2000-2007)	193.7±0.5	24.5±0.5	353±1	6.7±0.4	84±2	1.8±0.4	98±5
ЗНС (2008-2011)	190.7±0.7	22.7±0.7	352.2±1.3	8.2±0.6	69±3	1.2±0.6	4±7
Горы (2008-2011)	191.1±0.6	23.0±0.8	351.9±2.0	4.7±0.7	82.2±5.1	5.9±0.8	4.5±2.5

Таблица 2 [50]. Коэффициенты линейной регрессии (КР) для оценки лунного вклада в возмущения измеряемых характеристик зимнего гидроксильного слоя области мезопаузы. Ошибки КР даны для уровня значимости 0.1. Значимые с соответствующей вероятностью (95%) КР выделены. Кроме исключения точек с $R_L < 58$ земных радиусов для каждой из исследуемых функций дополнительно исключены точки, отклонение которых от среднего превышает 3 стандартных отклонения (СтО). Число точек меняется в зависимости от столбца и заключено в пределах 1724-1731. Индексы А и В означают определенный тип фильтрации посторонних процессов для уменьшения шума.

Функции → Аргументы↓	(T_{OH}) _А СтО=9.44	(T_{OH}) _В СтО=9.44	($I_{7/9}$) _А СтО=0.30
Полумес. Зональная $\sin^2(\delta_L)$	КР= -20±8	КР= -24±8	КР=-0.1±0.2
Полумес. Синодич. $\cos(2v - 2 \cdot F1)$	КР=2.2±0.7 F1=-46°	КР=2.5±0.8 F1=-46°	КР=-0.17±0.24
$\sin(2v - 2 \cdot F1)$	КР=0.0±0.7	КР=0.0±0.7	КР=-0.00±0.18
Полусуточная $\cos(4\pi L T_1 / 24h - 2 \cdot F2)$	КР=0.2±0.6	КР=0.3±0.6	КР=0.022±0.018 F2=13°
$\sin(4\pi L T_1 / 24h - 2 \cdot F2)$	КР=0.0±0.6	КР=0.0±0.6	КР=0.00±0.02

Таблица 3. [50]. Коэффициенты линейной регрессии для оценки лунного вклада в возмущения измеряемых характеристик летнего гидроксильного слоя области мезопаузы. Ошибки КР даны для уровня значимости 0.2. Значимые с соответствующей вероятностью (90%) КР выделены. Исключены точки с $R_L < 58$ з.р. и для каждой из исследуемых функций дополнительно исключены точки, отклонение которых от среднего превышает 2 СтО. Число точек меняется в зависимости от столбца и заключено в пределах 324-330.

Функции → Аргументы↓	(T_{OH}) _А СтО=5.7	(T_{OH}) _В СтО=5.7	($I_{7/9}$) _А СтО=0.26
Полумесячная Зональ. $\sin^2(\delta_L)$	КР=11±9	КР=11±9	КР=-0.2±0.3
Полумес. Синодич. $\cos(2v - 2 \cdot F)$	КР=0.78±0.80 F=56°	КР=0.78±0.77 F=50°	КР=0.034±0.030 F=10°
$\sin(2v - 2 \cdot F)$	КР=0.0±0.8	КР=0.0±0.8	КР=0.00±0.03

Таблица 4. Регрессионные коэффициенты, представляющие собой чувствительность среднегодовой гидроксильной температуры и амплитуд и фаз первых двух гармоник годовой кривой к увеличению среднегодового значения $F_{10.7}$ на 100 sfu по данным за 2000-2011 гг. (по [45]).

Функция	\bar{T} , К	B_1 , К	φ_1 , d	B_2 , К	φ_2 , d	B_3 , φ_3
Значение K_{sol}	3,0	4,2	5,5	-0,3	-5,4	не значимы

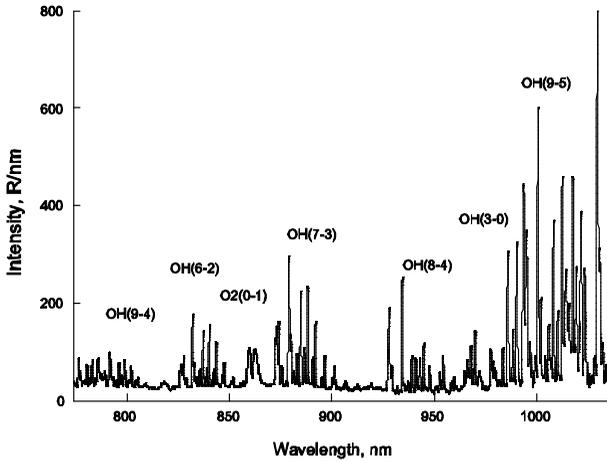


Рис. 1 [30]. Участок спектра ночного неба, содержащий полосу O_2 и несколько полос OH. Измерено 19 мая 2001. Интенсивность дана в рэлей/нм.

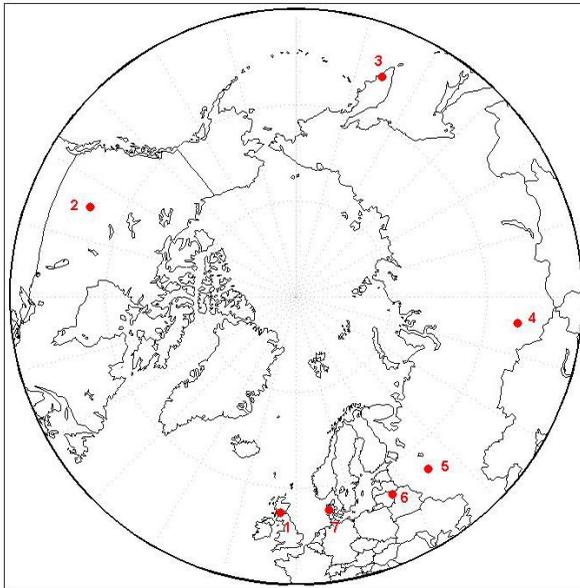


Рис. 2 [39]. Карта размещения пунктов сети САФСО в 2011-2014 гг., работающей по единой программе. Для стереосъемки и охвата разных масштабов в показанных пунктах размещается от 1 до 4 фотокамер.

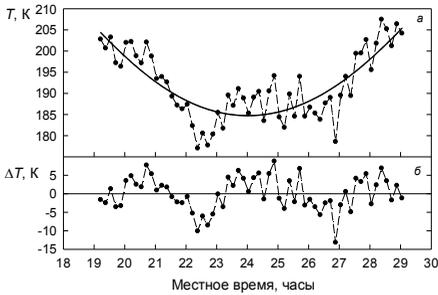


Рис. 3 [45]. *а* - вариации гидроксильной температуры (точки - 10-минутные измерения) по наблюдениям на Звенигородской научной станции (ЗНС) в течение ночи 9-10.03.2011г.; *б* - температурный ряд остаточных вариаций после вычитания приливных гармоник с периодами 24, 12 и 8 часов. Отсчет времени с 00 ч 9.03.2011 г.

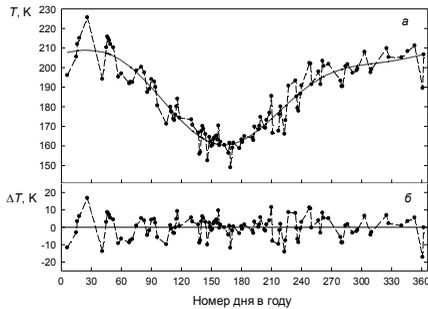


Рис. 4 [45]. *а* - среднесуточные значения околополуденных гидроксильных температур (точки), полученных на ЗНС в 2011 г. Сплошная линия - сезонный ход, описываемый суммой первых трех гармоник сезонных вариаций. *б* - остаточные отклонения температуры (ΔT) после вычитания гармоник сезонных вариаций.

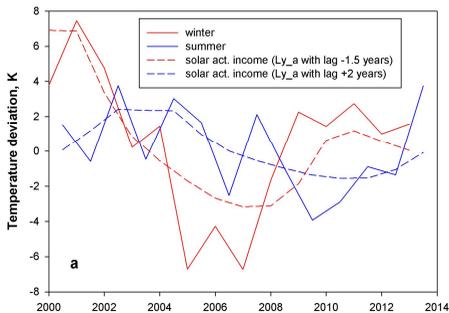


Рис. 5. Межгодовые вариации среднесезонных зимних (сплошные красные) и летних (синие линии) гидроксильных температур по данным спектрофотометрических измерений в Звенигороде. Штриховыми линиями показаны линейно-регрессионные вклады солнечной активности, заданной потоком Ly_a и сдвинутыми соответственно на 1.5 года вперед (зима) и 2 года назад (лето).

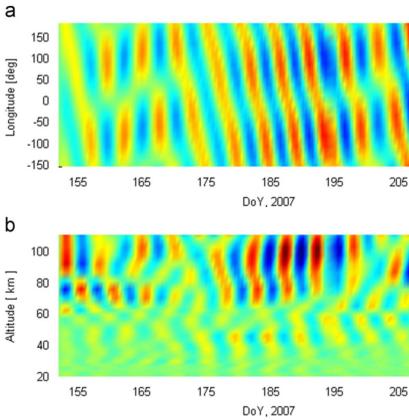


Рис. 6 [38]. Пятидневные вариации температуры области мезопаузы по данным MLS/Aura для летнего сезона 2007: а) долготно-временной разрез на барической высоте 0.46 Па (~85 км); б) высотно-временной разрез на долготе 12°E. Местное время составляет 02:30 and 12:00, широта 60°N.

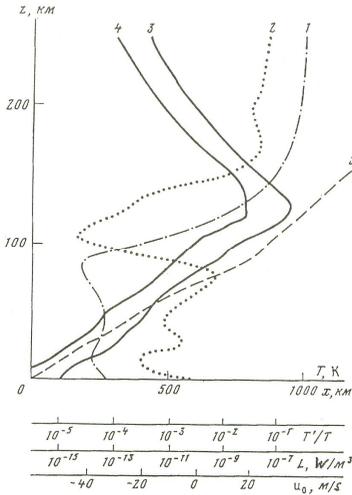


Рис. 7. [14]. Расчет распространения АГВ с круговой частотой $\omega = 2.4 \cdot 10^{-3}$ рад/с и горизонтальным волновым числом $k = 2.4 \cdot 10^{-3} \text{ м}^{-1}$ в условиях фоновых профилей температуры (1) и проекции скорости ветра на азимут волны (2): относительная амплитуда температуры (3), вязко-теплопроводные потери энергии L (4) и траектория волны $x(z)$.

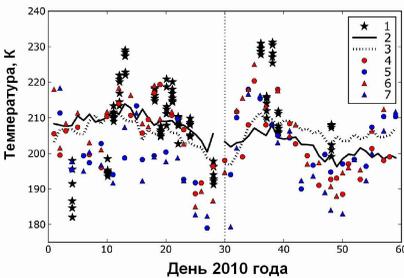


Рис. 8. [41]. Температура в области мезопаузы в районе Москвы в январе-феврале 2010 г. 1 – по измерениям гидроксильного излучения; 2 - зонально-осредненная дневная кривая полусуммы температур на барических высотах 0.2 Па (88 км) и 0.5 Па (83.5 км) по данным MLS/Aura; 3 - то же для ночи; 4 - дневные значения температуры на барической высоте 0.2 Па согласно MLS/Aura вблизи Москвы; 5- то же, но для ночи; 6- то же, день, 0.5 Па; 7- то же, что (6), но ночные значения.

Раздел 3.5 посвящен медленным (субвековым) трендам характеристик области мезопаузы. Исследование по этой теме в диссертации сосредоточивается в основном на двух задачах: 1) создании и последующем анализе эмпирической модели температуры и плотности среднеширотной средней атмосферы в диапазоне лет 1976-1991 [25, 26, 28, 31]; 2) трендам в характеристиках серебристых облаков и связанных с ними других характеристиках области мезопаузы в диапазоне лет 1990-2013 [29, 48]. В результате решения первой задачи был получен важный вывод: в течение указанного диапазона лет имело место сжатие средней атмосферы. Давление и плотность на заданной высоте постепенно уменьшались; изолинии суммарной концентрации понижались со средней скоростью 1- 4 км за 10 лет. Во второй задаче были исследованы медленные тренды в сезонных характеристиках активности серебристых облаков, с корректировкой на погодный фактор (сезонное количество ясных ночей). Показано, что на рассмотренном интервале времени (1990-2013 гг.) по данным в Москве, двух других пунктах Европы и Канаде нет значимого тренда числа «серебристых ночей» за сезон и интегральной яркости серебристых облаков. Это подразумевает отсутствие тренда в числе ночей с насыщенным водяным паром на высотах существования серебристых облаков, если принять, что появление или отсутствие серебристых облаков определяется в основном температурой и влажностью соответствующего слоя мезосферы.

В разделе 3.6. обращается внимание на то, что в области мезопаузы возможны не только медленные тренды, но и качественные климатические изменения, и как пример таких качественных изменений рассматривается возникновение серебристых облаков летом 1885 г. В диссертации рассматриваются гипотезы, объясняющие возникновение нового явления, в частности, продержавшуюся до сих пор вулканическую гипотезу, связавшую повсеместное появление С.О. с происшедшим на два года раньше извержением вулкана Кракатау. Серьезная критика этой гипотезы выдвигалась уже много десятилетий назад, но теперь в работах автора диссертации [40, 43] (совместно с П.А.Далиным и В.А.Ромейко) показано, что, с одной стороны, эффект

извержения Кракатау значительно усиливался еще одним мощным извержением, - вулкана Августин, - в том же году, с другой стороны, одного разового заброса вулканического вещества в ОМ не достаточно для объяснения сохранения благоприятных для образования С.О. условий в течение 130 лет. Диссертация в общем поддерживает гипотезу [Thomas et al. 1989], связавшую долговременное сохранение серебристых облаков как атмосферного явления с медленным увеличением абсолютной влажности области мезопаузы (которое могло быть вызвано поступлением метана из нижней атмосферы), но отмечаются некоторые проблемы и для этой гипотезы.

4. Возмущение области мезопаузы гидродинамическими волнами

В четвертой главе рассматривается круг вопросов, связанных с проникновением и распространением гидродинамических волн в области мезопаузы, а также их взаимозависимости. Описывается проблемы частотного разграничения волн на планетарные, атмосферные гравитационные и акустические.

В разделе 4.1, кроме того, дается краткий обзор атмосферных гидродинамических волн, пространственные и временные масштабы, характерные амплитуды в области мезопаузы, источники волн, возможности их проникновения в область мезопаузы из нижних и верхних слоев атмосферы, благоприятные и неблагоприятные условия распространения, механизмы диссипации, взаимодействие со средним течением и другими типами волн. При распространении меньших по длине и периоду волн через атмосферу с волнами бóльшего масштаба последние создают для меньших волн пространственно-временную модуляцию фоновых профилей температуры и ветра. Это может приводить к чередованию благоприятных и неблагоприятных областей распространения меньших по масштабу волн. Перечисляются также и механизмы обратного влияния более мелких по масштабу волн на генерацию и дальнейшую судьбу более крупных волн. В результате получается довольно сложная картина взаимодействующих между собой и со средним течением волн, возмущающих область мезопаузы, построенная на основе анализа

данных измерений и моделирования.

Дальше излагаются основные, в том числе и новые, результаты для основного возбудителя внутрисезонной (и в какой-то степени межгодовой) изменчивости области мезопаузы – планетарным волнам. Существование стационарных планетарных волн (СПВ) в области среднеширотной мезопаузы впервые продемонстрировано в [Barnett et al., 1985] по данным спутниковых глобальных измерений температуры и Глазковым и др. [1986] по данным сети ракетных измерений, затем их выделили Shepherd et al., [1993] по данным прибора WINDII (спутник UARS) в концентрации атомов кислорода, Smith [1997] в ветровых измерениях (прибор HRDI, UARS). Затем соискателем и соавторами [19] были найдены квазистационарные структуры планетарного масштаба в интенсивности и высоте максимума излучения гидроксильного слоя. Вслед за этими публикациями начался целый каскад исследований, посвященных выявлению СПВ по спутниковым данным в области мезопаузы.

Межгодовая и сезонная изменчивость² СПВ приводит к тому, что эта пространственная структура становится одним из важнейших факторов изменчивости области мезопаузы во времени.

Спутниковые измерения эффективны и для выявления бегущих (относительно земной поверхности) планетарных волн. Обнаруживаются они и по наземным наблюдениям в одной точке (при этом информация о длине волны остается недоступной), и по данным сети фотокамер для съемки серебристых облаков, расположенных вдоль параллели ~ 56 °с.ш. Так, в [33] выявлено повышенное число двухдневных интервалов между появлениями серебристых облаков в каждом из пунктов сети за 2006 и 2007 г., что было объяснено воздействием квазидвухдневной волны. Более того, анализ пространственных и временных интервалов между появлениями серебристых облаков подтвердил существование квазидвухдневных волн с волновым числом 3 и/или 4. Далее, в [38] удалось проследить 2-дневные и 5-дневные

² В межгодовых вариациях амплитуда СПВ с зональным числом $m=1$ может меняться в 2.5 раза; фаза весьма стабильна – положение гребня меняется по долготе в пределах $\pm 10^\circ$.

планетарные волны одновременно в температуре по данным прибора MLS спутника Aura (см. Рис. 6) и в появлении серебристых облаков по данным сети фотокамер. Тем самым показано, что вариации температуры в планетарной волне достаточны для заметного влияния на поле серебристых облаков. Полученные с помощью сетевой регистрации серебристых облаков результаты по планетарным волнам хорошо согласуются с результатами других коллективов исследователей, в частности, по спутниковым наблюдениям полярных мезосферных облаков.

Бегущие планетарные волны обеспечивают напрямую основную часть внутрисезонной межсуточной изменчивости. Кроме того, они косвенно (но заметно) влияют на внутрисуточную изменчивость, создавая благоприятные или неблагоприятные условия для распространения гравитационных волн в область мезопаузы и на межгодовую изменчивость посредством передачи среднему течению энергии и импульса гравитационных волн. В свою очередь, среднее течение, управляемое, в частности, фазой КДК и ансамблем гравитационных волн, регулирует возбуждение и распространение планетарных волн [46].

Далее в диссертации рассматриваются вопросы распространения атмосферных гравитационных волн (АГВ). Существует несколько механизмов диссипации, благодаря которым амплитуды АГВ не растут катастрофически при распространении волн вверх, а ограничиваются на некотором уровне (уровне насыщения). Из-за этого мощные и слабые нижнеатмосферные источники АГВ с одинаковыми пространственно-временными характеристиками дают примерно одинаковое возмущение области мезопаузы. При анализе измерений это значительно затрудняет поиск источников – часто заметно выделяется на общем фоне не волна от наиболее мощного источника, а волна, которая благодаря хаотично меняющемуся температурно-ветровому фону получила на какое-то время благоприятный режим распространения. Большинство наблюдаемых в области мезопаузы АГВ имеют характер очень коротких волновых пакетов. Об этом свидетельствуют фотоснимки волновых движений в серебристых облаках и результаты вейвлет – анализа волновых

пакетов [51], наблюдаемых в расположенных по соседству излучающих слоях гидроксила (~87 км) и атомарного кислорода (~ 94 км). Поэтому на первом этапе более оправданно изучать АГВ от хорошо установленных и постоянно работающих источников, таких как горные хребты, обтекаемые ветром. В диссертации дается обзор[16] результатов по наблюдениям и моделированию орографических возмущений области мезопаузы и показывается, что даже для таких хорошо определенных источников волновое возмущение на этих высотах представляет собой совокупность коротких цугов гравитационных волн, проникающих при благоприятных условиях из нижних слоев. Кроме того, обращается внимание на то, что в условиях реальной температурно-ветровой стратификации классические стационарные (подветренные волны) от гор далеко не всегда проходят в область мезопаузы.

Значительная часть главы посвящена численному моделированию распространения АГВ. Подробно описывается численная модель AGWWND [13], созданная для расчета распространения и молекулярной диссипации монохроматических акустико-гравитационных волн через нижнюю и среднюю атмосферу с реалистическими фоновыми профилями температуры и ветра. Она пришла на смену менее совершенной модели Бидлингмайера и др. [1992], написанной для безветренной атмосферы. Новая модель сразу же позволила расширить класс моделируемых волн на волны с малыми фазовыми скоростями и учесть не только сам фоновый ветер, но и его вертикальный сдвиг.

Модель AGWWND неоднократно применялась для решения разнообразных задач, связанных с распространением АГВ. Так, в [14] был показан правдоподобный сценарий, согласно которому АГВ с частотой сейсмогравитационных колебаний Земли $2 \cdot 10^{-3}$ рад/с и длиной волны 200 км действительно могла пройти из области подготовки одного из землетрясений через среднюю атмосферу в термосферу, где могла генерировать наблюдавшиеся в 1990 г. мощные возмущения (Рис. 7). Впоследствии в модель AGWWND была добавлена новая часть, позволяющая рассчитывать ускорение среднего течения за счет диссипирующих АГВ [51]. Таким образом,

взаимодействие между фоновым течением и АГВ получается с обратной связью: фоновое течение управляет распространением АГВ, а АГВ, в свою очередь, искажают исходное фоновое течение. Далее монохроматические волны были заменены на дискретный спектр волн, в которых рассчитывалось изменение этого спектра с высотой и ускорение фонового потока³. Результаты подробно рассмотрены в диссертации, в частности в этом эксперименте наблюдались заметно отличающиеся картины для лет активного и спокойного Солнца.

Для малых примесей области мезопаузы гравитационные волны также играют большую роль. Разработан алгоритм решения уравнения диффузии-адвекции и численного расчета возмущения концентрации атомарного кислорода в поле короткого пакета АГВ [18]. Показано, что при реалистичных вариациях скорости в волновом пакете относительная амплитуда [O] достигает 20%.

Особый интерес представляют случаи, когда гравитационные волны создают поверхности с большими градиентами температуры и других характеристик среды. Ярким примером таких явлений в ОМ являются так называемые мезосферные фронты⁴, разделяющие воздушные массы с существенно разными характеристиками. Их исследованию по данным фотосъемки полей серебристых облаков посвящен раздел 4.4.

Впервые в мире детально проанализирован случай наблюдения мезосферного фронта 29/30 июня 2012 г. сетью фотокамер и одновременных спутниковых измерений инструмента SABER со спутника TIMED. Обнаружено, что на высоте около 85 км фронт разделял две воздушные массы с разностью температур 20-25 К, и, соответственно, присутствием и отсутствием серебристых облаков. Соответствующий меридиональный градиент температуры оценивается не менее 0,07 К/ км, протяженность фронта

³ В реальной атмосфере коротко-цуговой характер АГВ не мешает им иметь преимущественные направления распространения и таким образом передавать импульс определенного направления среднему течению.

⁴ Случаи мезосферной боры и стеновидных волн (mesospheric wall waves) относятся к мезосферным фронтам

не менее 320 км, выявлен подъем серебристых облаков в окрестности фронта до высоты 96 км, при невозмущенной высоте слоя 84 -86 км [47].

Кроме детальных исследований отдельных случаев мезосферных фронтов, выполнен анализ (совместно с А.Дубитисом и др.) статистики скоростей, ширин и времен жизни фронтов в одном из пунктов сети фотосъемки серебристых облаков (Литва) [39]. Впервые приводятся статистические данные о мезосферных фронтах, наблюдаемых в С.О. В течение 3-х сезонов (2008-2010) фотомониторинга С.О. в этом пункте было выявлено 18 случаев уединенных волн или мезосферных фронтов из 86 ночей с зарегистрированными С.О.

Последний раздел четвертой главы посвящен роли планетарных и гравитационных волн во время ВСП в области мезопаузы. Для изучения этой роли во время ВСП в начале 2008 и 2010 годов проводился комбинированный анализ наземных (звенигородская гидроксильная температура) и спутниковых (MLS/ Aura) измерений температуры [41]. Спутниковые данные хорошо показывают на долготно-временных разрезах постоянно меняющуюся картину планетарных волн, тогда как наземные данные позволяют оценить изменения активности АГВ по межсуточной изменчивости температуры. Оказалось, что роль планетарных волн настолько велика, что благодаря суперпозиции стационарных и бегущих волн локальный температурный отклик области мезопаузы на ВСП на разных долготах может быть различен. Так, сильное отрицательное возмущение температуры в области мезопаузы во время ВСП 2010 года, зафиксированное наземным спектрофотометрическим методом в Звенигороде (Рис. 8), существовало лишь в довольно узкой полосе долгот и смещалось к западу.

В период ВСП меняется также приливная и гравитационно-волновая активность. Через 4-6 дней после (стратосферного) максимума ВСП, как правило, наблюдаются максимумы гравитационно-волновой активности в течение ночи (повышение в среднем в 1.5 раза) и одновременно в температуре (на ~ 15 К относительно средней) [44].

Результаты численного моделирования [46] в модели, допускающей

самопроизвольную генерацию ВСП, позволяют сделать выводы о роли НАМ, СПВ, КДК в возникновении ВСП. При восточной фазе КДК ситуация для возникновения событий ВСП более благоприятная, а сами события ВСП - более интенсивные.

Заключение

Изложенные в предыдущих главах результаты представляют собой цикл взаимосвязанных работ по решению важной проблемы создания самосогласованного описания основных черт и основных факторов изменчивости температуры и других характеристик среднеширотной области мезопаузы. В ходе выполнения работ были решены многие частные методические задачи по организации и методике измерений и выполнен анализ данных многочисленных однородных и комбинированных измерений для количественных оценок различных составляющих изменчивости области мезопаузы. Отдельные части диссертации представляют собой эмпирические модели (например, эмпирическая модель среднеширотных вертикальных профилей температуры и суммарной концентрации молекул для периода 1976-1991 гг. с учетом сезона, многолетнего тренда и уровня солнечной активности, раздел 3.5); в целом результаты по основным составляющим изменчивости температуры (сведенные вместе в Приложении), могут, в части, касающейся температуры среднеширотной области мезопаузы, служить основой для создания глобальной модели средней атмосферы, нацеленной на воспроизведение большого ряда пространственно-временных спектральных составляющих характеристик атмосферы, проявляющихся в природе.

Поскольку изменчивость измеряемых характеристик области мезопаузы в большой степени определяется атмосферными гравитационными и планетарными волнами, в ходе диссертации некоторые полезные результаты были получены с помощью численных гидродинамических моделей, воспроизводящих распространение этих волн (см. разделы 4.2, 4.3, 4.5).

При выполнении настоящей диссертационной работы получены

следующие основные результаты:

1. На основе многолетних спектрофотометрических измерений излучения гидроксила среднеширотной области мезопаузы с привлечением результатов других методов построено самосогласованное количественное описание основных составляющих изменчивости температуры среднеширотной области мезопаузы на временных масштабах от десятков минут до десятков лет. Значимость полученных результатов основана на высокой точности измерений температуры и ее большой статистической базе, что позволило получить количественные оценки для отдельных гармоник лунных приливов впервые в мировой практике.
2. В области среднеширотной мезопаузы существует регулярный (сохраняющий фазу в одинаковые сезоны многолетнего периода) полумесячный зональный прилив со средним периодом 13.66 дней, синхронный с изменением абсолютной величины экваториального склонения Луны и имеющий измеримую амплитуду (в температуре ~ 2.5 К зимой, 1.2 К летом). Знак температурного отклика области мезопаузы на полумесячный зональный прилив противоположен зимой и летом (температура увеличивается зимой и уменьшается летом при приближении Луны к экваториальной плоскости Земли). То же самое справедливо для отклика на полумесячный синодический прилив (температура увеличивается зимой и уменьшается летом при приближении Луны к фазам $\sim -45^\circ$ и 135° (середины между сизигием и предшествующей ему квадратурой)).
3. Предложена и отработана методика построения многолетних временных рядов характеристик серебристых облаков (частота появлений и яркость), позволяющих параметризовать интегральную за сезон наблюдения активность серебристых облаков по данным систематических наземных наблюдений с корректировкой на погодный фактор. По этой методике на основе данных наблюдений серебристых облаков в московском регионе

построены самые длительные в мире (с 1962 г. по настоящее время) временные ряды вероятности появления серебристых облаков в ясную ночь и накопленной за сезон суммарной яркости (с погодной корректировкой).

4. На основе построенных временных рядов сезонных характеристик активности серебристых облаков обоснована новая концепция об околонулевых временных трендах в характеристиках серебристых облаков в современную эпоху, на смену предыдущей концепции М. Гадседена о постепенном росте активности серебристых облаков. Новая концепция включает в себя и пересмотренные результаты о частоте появления полярных мезосферных облаков по спутниковым данным на средних и субполярных широтах.
5. Реакция области мезопаузы на внезапные стратосферные потепления (ВСП) включает в себя как изменение среднезональной температуры, так и перестройку ансамблей планетарных, приливных и гравитационных волн. Реакция температурного режима в конкретном долготном секторе области мезопаузы на стратосферное потепление определяется как поведением среднезональной температуры, так и, в большой степени, наложением планетарных волн разного периода. Эта реакция сильно зависит от долготы. При всех возможных многообразиях откликов температуры области мезопаузы на ВСП у них сохраняются некоторые общие черты, подразумевающие, в частности, наличие стационарных планетарных волн вблизи мезопаузы с холодной ложбиной в районе Атлантики и Европы. Последнее обеспечивается приблизительным постоянством фазы первой гармоники стационарных планетарных волн в зимнее время.
6. В период ВСП вертикальный градиент температуры в области мезопаузы испытывает зависящие от долготы довольно резкие изменения, которые влияют на прохождение атмосферных гравитационных волн в область мезопаузы. В результате происходит значительный рост внутрисуточной (гравитационно- волновой) дисперсии температуры. В среднем в

Восточно-европейском секторе среднеширотной области мезопаузы эта дисперсия кратковременно усиливается в 4 раза через 3-5 суток после стратосферного максимума ВСП.

Кроме этих выводов, по итогам диссертационной работы можно сформулировать два важных практических результата.

7. Создана международная сеть автоматических фотокамер для регистрации серебристых облаков (САФСО). Она позволила исследовать динамические процессы в серебристых облаках, обусловленных изменчивостью среднеширотной летней верхней мезосферы (мониторинг полей серебристых облаков в различных долготных секторах субполярного пояса северного полушария, изучение структуры полей серебристых облаков различных пространственных масштабов, включая мезосферные фронты и волны Кельвина-Гельмгольца и др.).
8. Создана численная модель AGWWND для расчета распространения и диссипации атмосферных гравитационных волн (АГВ), которая позволила проводить расчет распространения, вертикальной структуры и диссипации монохроматических АГВ в атмосфере с учетом реалистических фоновых вертикальных профилей температуры и скорости ветра, характерных для различных сезонов и уровней солнечной активности. Модель многократно применялась для расчета различных ситуаций распространения АГВ в атмосфере и анализе данных наблюдений.

Эти практические результаты успешно использованы в самой диссертации, а также реализованы при решении задач, связанных с распространением АГВ в верхнюю атмосферу от различных наземных источников. Они также могут быть применены при исследованиях в смежных направлениях.

Список основных публикаций автора по теме диссертации.

Публикации в рецензируемых журналах, рецензируемых сборниках статей, а также трудах конференций

1. Перцев Н.Н. Возмущение верхней атмосферы, вызванное обтеканием изолированной горы. //Изв. АН СССР. ФАО, 1983, т. 19, N 6, 570-575.
2. Шефов Н.Н., Перцев Н.Н.и др. Орографически обусловленные вариации эмиссий верхней атмосферы.//Изв. АН СССР. ФАО, 1983, т. 19, N 9, 920-926.
3. Shefov N.N., Pertsev N.N. Orographic disturbances of the upper atmosphere emissions. //Handbook for MAP, 1984, v. 10, 171-175.
4. Перцев Н.Н. Сопоставление наблюдений орографических возмущений в тропосфере и верхней атмосфере. //Изв. АН СССР. ФАО, 1984, т. 20, N 10, 901-906.
5. Перцев Н.Н. Возмущение верхней атмосферы, вызванное обтеканием неоднородного горного хребта. //Изв. АН СССР. ФАО, 1987, т. 23, N 7, 686-693.
6. Суходоев В.А., Яров В.Н., Перцев Н.Н., Шефов Н.Н. Исследование орографического эффекта в мезопаузе в районе Кавказа. //Исследование динамических процессов в верхней атмосфере (Труды пятого всесоюзного совещания по исследованию динамических процессов в верхней атмосфере). М.: Гидрометеоиздат, 1988, 181-183.
7. Суходоев В.А., Перцев Н.Н., Решетов Л.М. Вариации характеристик гидроксильного излучения, обусловленные орографическими возмущениями. //Полярные сияния и свечение ночного неба, М.: ВИНТИ, 1989, N 33, 61-66.
8. Перцев Н.Н. Азимутальная анизотропия горных подветренных волн в верхней атмосфере. //Изв. АН СССР. ФАО, 1989, т. 25, N 6, 585-591.
9. Перцев Н.Н. К оценке нагревания высоких слоев атмосферы, вызванного диссипацией горных подветренных волн. //Изв. АН СССР. ФАО, 1989, т. 25, N 7, 764-766.
10. Перцев Н.Н. Распознавание типов гидродинамических колебаний, модулирующих наблюдаемое излучение верхней атмосферы. Известия РАН. ФАО. 1993. Т.29. N 5. С. 608-612.
11. Pogoreltsev A.I., Pertsev N.N. A model for a simulation of the solar cycle

variation in the thermospheric gravity wave activity// SCOSTEP. Proceedings of Eighth international symposium on Solar Terrestrial Physics. Part -1. 1994. P. 214 (1-4).

12. Pertsev N.N. A weak sensitivity of gravity waves near mesopause to solar and magnetic activity//SCOSTEP. Proceedings of Eighth international symposium on Solar Terrestrial Physics. Part -1. 1994. P. 213 (1-4).

13. Погорельцев А.И., Перцев Н.Н. Влияние фонового ветра на формирование структуры акустико-гравитационных волн в термосфере// Изв. РАН ФАО. 1995. Т. 31 N.6 С.755-760.

14. Перцев Н.Н., Шалимов С.Л. Генерация атмосферных гравитационных волн в сейсмически активном регионе и их влияние на ионосферу//Геом. и Аэр-я 1996. Т.36 N.2 С. 111-118.

15. Акмамедов Х., Перцев Н.Н и др. Возможный механизм увеличения температуры F2- области ионосферы в период Иранского землетрясения 20 июня 1990 г.//Геом. и Аэр-я 1996. Т.36 N.2 С. 119-123.

16. Перцев Н.Н. Сезонный и высотный ход мезомасштабных флуктуаций орографического происхождения в средней атмосфере.// Известия РАН. ФАО. 1997. Т.33. N 6. С. 779-786.

17. Pertsev, N.N., V.I. Perminov, et al. Effect of Vertical Motion of the hydroxyl Nightglow Layer on the observed variation of rotational temperature. Intern. J.Geomag. Aeron. 1999. V.1. N.3, P. 259-265

18. Перцев Н.Н., Павлова Н.К. Отклик атомарного кислорода вблизи мезопаузы на прохождение пакета атмосферных гравитационных волн //Геом. и Аэр-я 2001. Т.41, № 4, с. 547-551.

19. Perminov, V.I., R.P.Lowe, N.N.Pertsev. Longitudinal variations in the hydroxyl nightglow. Adv. Space Res. 1999. V. 24. N.11. P. 1609-1612.

20. Shefov N.N., Semenov A.I., Pertsev N.N. Dependencies of the amplitude of the temperature enhancement maximum and atomic oxygen concentrations in the mesopause region in seasons and solar activity level //Phys. Chem. Earth (B), 2000. V. 25, No. 5-6, P. 537-539.

21. Перминов В.И., Перцев Н.Н., Шефов Н.Н. Стационарные

планетарные вариации гидроксильного излучения//Геом. и Аэр-я. 2002. Т. 42 № 5 С. 642-645.

22. Ромейко В.А., Н.Н. Перцев, П.А. Далин. Многолетние наблюдения серебристых облаков в Москве: база данных и статистический анализ//Геом. и Аэр-я 2002. Т. 42 № 5 С. 702-707.

23. В.И. Перминов, Е.П. Кропоткина, В.В. Баканас, Н.Н. Перцев и др. Определение концентраций основных и малых газовых компонентов атмосферы на высотах мезопаузы//Геом. и Аэр-я. 2002. Т. 42 № 6 С. 814-820.

24. V.A. Romejko, P.A. Dalin, N.N. Pertsev. 40 years of Noctilucent Cloud Observations near Moscow : database and simple statistics//JGR. 2003. V.108, No D8, 8443, doi:10.1029/ 2002JD002364,7p.

25. Семенов А.И., Перцев Н.Н. и др. Расчет высотных профилей температуры и концентрации атмосферы на высотах 30-110 км //Геом. и Аэр-я. 2004, Т. 44, № 6, С. 835-840.

26. N.N. Pertsev, A.I. Semenov, N.N. Shefov. Empirical Model of Vertical Structure of the Middle Atmosphere: Seasonal Variations and Long-Term Changes of Temperature and Number Density//Adv. Space Res., 2006, V. 38, N 11, P.2465-2469, doi:10.1016/j.asr.2006.02.079

27. Dalin P.A., Pertsev N.N., Romejko V.A. Significance of lunar impact on Noctilucent Clouds//JASTP, 2006, V. 68, N. 14, P. 1653-1663.

28. N. N. Pertsev, A. I. Semenov, N. N. Shefov. Long-term variations of temperature and neutral density of the mid-latitude atmosphere by rocket and optical data. Proceedings of the 17th ESA Symposium on European Rocket and Balloon Programmes and Related Research, Sandefjord, Norway, 30 May - 2 June (ESA SP-590 edited by B. Warmbein, ESA Publications Division), August 2005, P. 245 – 250.

29. Dalin P., Kirkwood S., Andersen H., Hansen O., Pertsev N., Romejko V. Comparison of long-term Moscow and Danish NLC observations: statistical results//Ann. Geophys., 2006, V. 24, N. 11. P.2841-2849.

30. Pertsev N., Perminov V. Response of the mesopause airglow to solar activity inferred from measurements at Zvenigorod, Russia//Ann. Geophys., 2008,

V. 26, № 5, 1049-1056.

31. Pertsev N. Solar activity influence and long-term trends in zonal wind of the mid-latitude middle atmosphere by radiosounding and rocket data, Proc. 18th ESA Symposium on 'European Rocket and Balloon Programmes and Related Research', Visby, Sweden, 3–7 June 2007 (ESA SP-647, November 2007), p. 581 - 584.

32. Pertsev N., Dalin P., Romejko V. A lunar signal in summer nighttime tropospheric cloudiness and in Noctilucent clouds, Proc. 18th ESA Symposium on 'European Rocket and Balloon Programmes and Related Research', Visby, Sweden, 3–7 June 2007 (ESA SP-647, November 2007), p. 589-592.

33. P. Dalin, N. Pertsev, et al. Ground-based observations of noctilucent clouds with a northern hemisphere network of automatic digital cameras//JASTP, 2008, V. 70, 1460-1472.

34. Перминов В.И., Перцев Н.Н. Сезонные особенности отклика температуры и интенсивностей эмиссий мезопаузы на вариации солнечной активности//Геом. и Аэр-я, 2009, Т. 49, № 1, с. 91-99.

35. Перминов В.И., Перцев Н.Н. Отклик излучения и температуры мезопаузы на изменение солнечной активности// Солн.-земная физика, 2008, Вып. 12, Т.2., С. 294-295.

36. Перминов В.И., Перцев Н.Н. Сезонный и ночной ход эмиссий гидроксила и Атмосферной системы молекулярного кислорода среднеширотной мезопаузы//Геом. и Аэр-я, 2010, Т. 50, № 4, с. 544–550.

37. Dalin, P., N. Pertsev, et al. A case study of the evolution of a Kelvin-Helmholtz wave and turbulence in noctilucent clouds//JASTP, 2010, V. 72(14-15), 1129-1138, doi:10.1016/j.jastp.2010.06.011.

38. P. Dalin, N. Pertsev, et al. A comparison between ground-based observations of noctilucent clouds and Aura satellite data//JASTP, (2011), 73, 2097–2109.

39. Dubietis, A., P.Dalin, R.Balčiūnas, K.Černis, N. Pertsev, et al. Noctilucent clouds: modern ground-based photographic observations by a digital camera network. Applied Optics, 2011, V. 50. № 28, P. F72-F79.

40. P. Dalin, N. Pertsev, V. Romejko. Notes on historical aspects on the earliest known observations of noctilucent clouds.// *Hist. Geo Space. Sci.*, 3, 87-97, 2012

41. Перцев Н.Н., Андреев А.Б. и др. Мезосферно-термосферные проявления стратосферных потеплений: совместное использование спутниковых и наземных измерений // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2013. Т. 10. № 1. С. 93–100.

42. Dalin, P., V. Perminov, N. Pertsev, et al. Optical studies of rocket exhaust trails and artificial noctilucent clouds produced by Soyuz rocket launches, *JGR-Atmosphere*, 2013, V.118, I.14, P. 7850-7863, doi:10.1002/jgrd.50549

43. Далин П.А., Перцев Н.Н., Ромейко В.А.. Открытие серебристых облаков: факты и домыслы. *Пространство и время*, 2013, № 2 (12), с. 183-195.

44. Перминов В.И., Перцев Н.Н. Поведение эмиссий и температуры мезопаузы во время стратосферных потеплений по наблюдениям на средних широтах//*Геом. и Аэр-я*, 2013. Т.53. № 6. С. 827-831.

45. Перминов В.И., Семенов А.И., Медведева И.В., Перцев Н.Н. Изменчивость температуры в области мезопаузы по наблюдениям гидроксильного излучения на средних широтах//*Геом. и Аэр-я*, 2014. Т. 54. № 2. С. 246-256.

46. Погорельцев, А.И., Е.Н. Савенкова, Н.Н. Перцев. Внезапные стратосферные потепления: роль нормальных атмосферных мод//*Геом. и Аэр-я*, 2014, V. 54, No. 3, P. 387-403.

47. Dalin, P., M. Connors, I. Schofield, A. Dubietis, N. Pertsev, et al. First common volume ground-based and space measurements of the mesospheric front in noctilucent clouds//*Geophys. Res. Let.* V.40, doi:10.1002/2013GL058553, 2013.

48. Pertsev N., P. Dalin et al. Noctilucent clouds observed from the ground: sensitivity to mesospheric parameters and long-term time series. *Earth, Planets and Space*. 2014, V. 66:98 <http://www.earth-planets-space.com/content/66/1/98>

49. P. Dalin, A. Pogoreltsev, N. Pertsev, et al. Evidence of the formation of noctilucent clouds due to propagation of an isolated gravity wave caused by a

tropospheric occluded front. //Geophys. Res. Let. 42, 2037–2046, 2015, doi:10.1002/2014GL062776

50. Перцев Н.Н., П.А. Далин, В.И. Перминов. Влияние полусуточных и полумесячных лунных приливов на область мезопаузы по наблюдениям характеристик гидроксильного слоя и серебристых облаков//Геом. и Аэр-я, 2015, в печати; доступна по :
http://ifaran.ru/files/download/11414/Pertsev_et_al_2015.pdf

Другие публикации⁵

51. Перцев Н.Н., Погорельцев А.И., Зарубин А. С. Гравитационные волны области мезопаузы по данным спектрофотометрических измерений и численного моделирования. Международный симпозиум стран СНГ «Атмосферная радиация и динамика» (МСАРД-2009). Сборник тезисов. Санкт-Петербург. 2009. с. 149-150.

Список использованных источников других авторов

Бидлингмайер Е.Р. и др. Численное моделирование трансформации акустико-гравитационных волн в температурные и вязкие волны в термосфере. Изв. РАН. ФАО. 1992. Т. 28. №.1. С. 64-74.

Глазков В. Н. и др. Аналитические методы описания полей метеорологических параметров и результаты их применения при моделировании структуры и циркуляции средней атмосферы. - Ионосферные исслед-я, 1986. № 39, с. 52-60.

Кропоткина Е.П. и др. Влияние лунных приливов на вероятность появления серебристых облаков. Известия АН СССР. ФАО. 1975. Т. 11. № 11. С. 1179-1181.

Погорельцев А.И. Взаимодействие волн глобального масштаба в средней атмосфере и их влияние на среднезональную циркуляцию. Докт. Диссер. С-Пб, 2003.

⁵ Здесь дана одна из них, на которую есть ссылки в тексте автореферата

- Портнягин Ю.И. и др.** Высотно-широтная структура вертикальной компоненты ветра мигрирующего полусуточного прилива в области верхней мезосферы и нижней термосферы (80-100 км). Известия РАН. ФАО. 2011. Т. 47. № 1. с. 1-11.
- Шефов Н.Н.** Некоторые свойства гидроксильного излучения// Полярные сияния и свечение ночного неба. № 13. М., Наука, 1967, С. 37-43.
- Barnett J.J. et al.** Planetary waves// Middle Atmosphere Program. Handbook for MAP. 1985. V. 16, P. 86-137.
- Espy P.G. et al.** The role of the QBO in the inter-hemispheric coupling of summer mesospheric temperatures. Atmos. Chem. Phys. Discuss., 10, 23403–23422, 2010.
- Holton J. et al.** 1980: The Influence of the Equatorial Quasi-Biennial Oscillation on the Global Circulation at 50 mb. J. Atmos. Sci., V. 37, 2200–2208. 1980.
- Golitsyn G.S. et al.**, Long-term temperature trends in the middle and upper atmosphere // Geophys.Res.Lett. V.23, N 14, P. 1741-1744.
- Kopp M. et al.**, Tidal signatures in temperatures derived from daylight lidar soundings above Kühlungsborn (54°N, 12°E). J. Atmos. Solar-Terr. Phys., 2015. doi:10.1016/j.jastp.2014.09.002
- Roble, R. G. et al.** How will changes in carbon dioxide and methane modify the mean structure of the mesosphere and thermosphere? Geophys. Res. Lett., 16, 1441–1444. 1989.
- Semenov A. et al.** The seasonal peculiarities of behavior of the long-term temperature trends in the middle atmosphere at the mid-latitudes. Phys. Chem. Earth. 2002. V. 27. N. 6-8. P. 529-534.
- Shepherd G. et al.** Longitudinal structure in atomic oxygen concentrations observed with WINDII on UARS. Geoph. Res. Lett. 1993. V. 20. P. 1303-1306.
- Smith A. K.**, 1997: Stationary planetary waves in upper-mesospheric winds. J. Atmos. Sci., V. 54, 2129–2145.
- Thomas G. et al.** Relation between increasing methane and the presence of ice clouds at the mesopause// Nature 1989.V. 338. P. 490–492
- Thomas G.E.** 1996. Global change in the mesosphere – lower thermosphere region: has it already arrived? // J. Atmos. Sol. Terr. Phys. V. 58. No. 14. P. 1629 – 1656.