

На правах рукописи



Сивцева Вера Исаевна

**ИССЛЕДОВАНИЕ АКТИВНОСТИ ВНУТРЕННИХ ГРАВИТАЦИОННЫХ И  
ПРИЛИВНЫХ ВОЛН В ОБЛАСТИ МЕЗОПАУЗЫ ПО ДАННЫМ  
ВЫСОКОШИРОТНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ В ВОСТОЧНОЙ СИБИРИ**

25.00.29 – физика атмосферы и гидросферы

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Якутск – 2021

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте космических исследований и астрономии им. Ю.Г. Шафера Сибирского отделения Российской академии наук - обособленном подразделении Федерального исследовательского центра "Якутский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук" (ИКФИА СО РАН)

**Научный руководитель:** кандидат физико-математических наук,  
**Аммосов Петр Петрович**

**Официальные оппоненты:** **Гаврилов Николай Михайлович**  
доктор физико-математических наук, профессор,  
Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего  
профессионального образования Санкт-  
Петербургский государственный университет,  
кафедра физики атмосферы, профессор

**Ратовский Константин Геннадьевич**  
кандидат физико-математических наук,  
Федеральное государственное бюджетное  
учреждение науки Ордена Трудового Красного  
Знамени Институт солнечно-земной физики  
Сибирского отделения Российской академии  
наук, лаборатория развития новых методов  
радиофизической диагностики атмосферы,  
заведующий лабораторией

**Ведущая организация:** Федеральное государственное бюджетное  
учреждение науки Институт физики атмосферы  
им. А. М. Обухова Российской академии наук

Защита состоится «\_\_» \_\_\_\_\_ 202\_ года в \_\_\_\_\_ часов на заседании диссертационного совета Д.003.034.01 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Ордена Трудового Красного Знамени Института солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук, расположенном по адресу: 664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 126А, ИСЗФ СО РАН

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Федерального государственного бюджетного учреждения науки Ордена Трудового Красного Знамени Института солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук, <http://iszf.irk.ru>

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2021 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д.003.034.01,  
к.ф.-м.н.

Поляков В.И.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### **Актуальность исследования**

Атмосфера Земли является сложной самоорганизованной и саморегулируемой системой и знание механизмов энергообмена между ее слоями является весьма актуальной задачей современной науки. В эпоху глобального изменения климата понимание роли этих механизмов в крупномасштабной динамике атмосферы, ответственной за данные изменения, выходит на первый план.

Важную роль в динамике атмосферы играют волновые процессы различного масштаба (планетарные, приливные и внутренние гравитационные волны), которые переносят энергию и импульс в вышележащие слои атмосферы. В частности, исследования влияния волновых процессов на термодинамическое состояние области мезопаузы, а также задачи, связанные с их влиянием на высокоширотную мезопаузу в зависимости от широты, являются частью фундаментальной проблемы физики атмосферы. В данной области атмосферы волны, подвергаясь спектральной фильтрации из-за ветрового сдвига и поглощаясь, вызывают ее разогрев. Также, волны вызывают ее охлаждение или разогрев вследствие адиабатического расширения или сжатия при их распространении [Hines, 1974]. Данные процессы оказывают существенное влияние на состав и динамику нейтральной и ионизированной атмосферы. Исследования волновой активности в области мезопаузы представляют особый интерес для понимания вертикальной взаимосвязи в атмосфере, поскольку мезопауза является пограничной зоной, на которую оказывают влияние как процессы в нижних слоях атмосферы, так и процессы, связанные с космической погодой, особенно в высокоширотных областях. Детальное изучение механизмов связи в этой области атмосферы имеет огромное значение для лучшего понимания климатической системы Земли и развития возможностей ее прогнозирования.

Следует подчеркнуть, что активность атмосферных волн имеют широтные и долготные особенности, связанные со свойствами глобальной атмосферной циркуляции, формируемыми свойствами подстилающей поверхности (орографии, границы суша-океан, сезона года). Область высокоширотной мезопаузы является одной из малоизученных зон атмосферы в связи с малым количеством постоянных наземных наблюдательных станций и малым количеством пролетов исследовательских спутников над этой областью. Поэтому исследование волновой активности в этой области атмосферы представляет собой актуальную задачу и их ценность должна возрастать.

В данной работе исследуется волновая активность и их влияние на температуру в области высокоширотной мезопаузы на двух разнесенных по широте станциях Тикси ( $71.58^\circ \text{ N}$ ,  $128.77^\circ \text{ E}$ ) и Маймага ( $63.04^\circ \text{ N}$ ,  $129.51^\circ \text{ E}$ ). Формирование слоя свечения гидроксила (ОН) на высоте  $\approx 87$  км используется в работе в качестве индикатора динамики области мезопаузы. Для анализа полученных результатов дополнительно привлечены данные измерений температуры атмосферы микроволновым радиометром MLS (Microwave Limb Sounder) со спутника Aura. Выбор обусловлен тем, что спутник Aura предоставляет почти ежедневные температурные данные для высоких широт.

**Основной целью** работы является экспериментальное исследование влияния приливных и внутренних гравитационных волн (ВГВ) на температуру и динамику в области высокоширотной мезопаузы по спектрографическим измерениям вращательной температуры излучения молекулы гидроксила (ОН) в свечении ночного неба на двух станциях: Маймага ( $63.04^\circ \text{ N}$ ,  $129.51^\circ \text{ E}$ ) и Тикси ( $71.58^\circ \text{ N}$ ,  $128.77^\circ \text{ E}$ ) с привлечением

данных измерений температуры атмосферы микроволновым радиометром MLS (Microwave Limb Sounder) со спутника Aura.

Достижение поставленной цели предполагает решение следующих **задач**:

1. На основе экспериментальных данных исследовать активность ВГВ и приливных волн.
2. Провести сравнение параметров волновой активности на станциях Тикси и Маймага.
3. Осуществить анализ данных температурных профилей, полученных при помощи спутниковых измерений Aura и сопоставить их с данными наземных наблюдений на станции Маймага.

### **Научная новизна работы**

1. Впервые в России исследована волновая активность в области мезопаузы на основе данных, полученных с помощью двух идентичных спектрографов, прошедших взаимную калибровочную привязку и находящихся на разнесенных по широте станциях.

2. Впервые исследована широтная особенность активности приливных и внутренних гравитационных волн в области мезопаузы на северо-востоке Сибири.

3. Впервые произведен анализ и сопоставление спутниковых измерений Aura с температурными данными наземных измерений и волновой активностью в области мезопаузы на северо-востоке Сибири.

4. Обнаружена пониженная активность ВГВ в наблюдательном сезоне 2014-2015, сопровождаемая особенностями поведения температуры мезопаузы и температуры нижних слоев атмосферы в районе стратопазузы согласно наземным наблюдениям и спутниковым измерениям Aura соответственно.

### **Методы исследования**

В качестве основных методов исследований в работе используются экспериментальные методы: измерение вращательных температур молекул гидроксидов OH (3-1); методы статистического анализа экспериментальных данных для выявления волновой активности ВГВ и приливных волн; сравнительный анализ данных полученных с двух разнесенных по широте станций и спутниковых измерений.

### **Достоверность и обоснованность полученных результатов**

Достоверность полученных результатов обусловлена использованием большого массива экспериментального материала, сопоставлением с результатами других исследователей, применением апробированных методов экспериментальных исследований, математических, статистических, и физически обоснованных подходов при обработке данных, а также одновременным наблюдением особенностей в результатах, полученных с помощью наземных и спутниковых наблюдений. Результаты диссертации были опубликованы в рецензируемых журналах и представлены на российских и международных конференциях.

### **Научная и практическая ценность работы**

1. Результаты исследования широтного характера температуры мезопаузы и волновой активности представляют интерес для исследования влияния солнечной активности на данные характеристики в зависимости от широты.

2. Работа имеет значимость в связи с особенностями глобальной атмосферной циркуляции, связанной с неравномерностью подстилающей поверхности (орография, граница океан-суша), а также определения возможных источников волн.

3. Полученные результаты вносят вклад в определение динамики распространения ВГВ и поиске возможных причин особенностей активности ВГВ.

4. Выявленные по данным наблюдений закономерности могут быть использованы для усовершенствования различных атмосферных моделей.

#### **Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Установлено, что значения среденочных вращательных температур гидроксила в области мезопаузы, а также значения гравитационных и приливных компонент стандартных отклонений по одновременным спектрографическим измерениям на двух разнесенных по широте станциях совпадают. Вклад ВГВ в сезонное изменение стандартных отклонений варьирует от 2 К до 6.5 К, а приливных волн – от 2.5 К до 5 К.

2. Наземные и спутниковые измерения среденочных значений температуры над станцией Маймага имеют схожий вид межсуточных вариаций ( $r = 0,948$ ) и синфазно отражают сезонное изменение температуры атмосферы на высоте излучения гидроксила ( $r = 0,981$ ). При этом средние сезонные значения температуры излучения гидроксила примерно на 10 К превышают значения температуры, измеренные на спутнике Aura (MLS).

3. Установлено, что в зимний сезон 2014-2015 гг. температура атмосферы на высоте излучения ОН (3-1) над станцией Маймага была выше, а активность ВГВ ниже в сравнении с другими сезонами. Это подтверждается спутниковыми измерениями Aura (MLS), при этом наблюдается пониженная температура в области стратосферы.

#### **Личный вклад автора**

Все результаты, представленные в диссертационной работе, получены автором самостоятельно. Содержание диссертации и основные положения, выносимые на защиту, отражают персональный вклад автора. Подготовка к публикации полученных результатов проводилась совместно с коллегами из ИКФИА СО РАН, причем вклад диссертанта был определяющим. В исследованиях автор выполнял обработку и анализ данных, а также был основным участником в обсуждении полученных результатов.

#### **Апробация работы**

Результаты исследований докладывались на 14 симпозиумах и конференциях: XXI Лаврентьевские чтения для молодых ученых (Якутск, 2017); конференция научной молодежи ИКФИА «Актуальные вопросы космофизики» (Якутск, 2017, 2018, 2019, 2021); Международный симпозиум «Атмосферная радиация и динамика» (С. Петербург, 2017, 2019); Международная конференция сети по обнаружению изменений мезопаузы (NDMC) (Garmisch, Germany, 2017); Международный симпозиум "Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы" (Томск, 2018; Новосибирск, 2019); Международная конференция по космической погоде и применению спутников (Shah Alam, Selangor, Malaysia, 2018); Международная Байкальская молодежная научная школа по фундаментальной физике "Физические процессы в космосе и околоземной среде" (БШФФ-2019) (Иркутск, 2019); X Юбилейная международная конференция «Солнечно-земные связи и физика предвестников землетрясений» (с. Паратунка, Камчатский край, 2019); Восемнадцатая Всероссийская Открытая конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса (Физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды,

потенциально опасных явлений и объектов)» (Москва, 2020); на научных семинарах отдела аэрономии ИКФИА СО РАН.

Отдельные аспекты работы, положенные в основу диссертации, прошли экспертизу и были поддержаны грантом «Главы Республики Саха (Якутия) для молодых ученых, специалистов и студентов - 2018» и грантами РФФИ: 18-45-140063-р\_а «Исследование внутренних гравитационных волн в верхней атмосфере во время внезапных зимних стратосферных потеплений в арктической зоне» (2018-2020 гг.); 17-05-00855\_а «Исследование термодинамического состояния мезопаузы от средних до высоких широт на северо-востоке Сибири» (2017-2019 гг.); 16-35-00121-мол\_а «Изучение отклика температуры области мезопаузы на солнечную активность» (2016-2017 гг.).

### **Публикации**

Основные результаты диссертации опубликованы в 11 печатных работах, из них 9 в периодических изданиях, рекомендованных ВАК РФ для публикации основных результатов диссертации.

### **Структура и объём диссертации**

Диссертация состоит из введения, 3 глав, заключения и списка литературы. Содержит 114 страниц, включая 40 рисунков, 7 таблиц и список библиографии из 252 наименований.

## **КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

Во **введении** раскрыта актуальность темы диссертации, сформирована цель исследования, проведена постановка решаемых задач, описаны научная новизна и практическая ценность полученных результатов, отмечены достоверность и личный вклад автора, сформулированы положения, выносимые на защиту и кратко изложено содержание работы.

В **первой главе** рассмотрены классификация атмосферных волн и их характеристики. Приведено теоретическое описание внутренних гравитационных и приливных волн. Кратко описаны особенности и методы наблюдения атмосферных волн в области мезопаузы. Проведен обзор исследований внутренних гравитационных и приливных волн в области мезопаузы.

Во **второй главе** описаны приборы, по данным которых выполнена диссертационная работа (инфракрасный спектрограф Shamrock и Aura (MLS)), и методики обработки данных.

В первом разделе приведены основные технические характеристики инфракрасных спектрографов для регистрации особенностей волновых процессов и температуры в области высокоширотной мезопаузы. Также изложены методы определения вращательной температуры гидроксила и обработки данных, оценены ошибки измерений.

Два идентичных спектрографа, данные измерений которых использованы в настоящей работе, установлены на станции Маймага ( $63.04^\circ$  N,  $129.51^\circ$  E) в 130 км севернее Якутска и на станции Тикси ( $71.58^\circ$  N,  $128.77^\circ$  E). Прибор на станции Маймага на постоянную регистрацию был установлен 17 января 2013 года, а на высокоширотной станции Тикси - 3 сентября 2015 года. Для взаимной калибровки обоих приборов были проведены одновременные наблюдения на станции Маймага с 5 по 15 августа 2015 г. Используя полученные спектрографами данные о температуре области мезопаузы,

возможно оценить волновую активность и ее вариабельность на широтах расположения полигонов.

Разработанное программное обеспечение позволяет приборам работать в автономном режиме. Спектрографы автоматически начинают регистрировать ночное небо, при угле погружения Солнца  $>9^\circ$ , а с началом рассвета останавливают свою работу. Также организовано удаленное управление компьютером приборов для их настройки и корректировки программ посредством интернета. Для удобства обработки и анализа, данные были упорядочены и укомплектованы в единую базу данных с ежедневным автоматическим пополнением данных на сервере, который находится в ИКФИА СО РАН

Оба применяемых для инфракрасных спектральных измерений спектрографа Shamrock серии SR-303i с фокусным расстоянием 303 мм оснащены камерой iDus DU490A-1.7 с термоэлектрически охлаждаемой линейкой InGaAs на 512 пикселей производства компании ANDOR™ Technology. Рабочий диапазон длин волн 16-ти разрядной цифровой камеры DU490A-1.7 лежит в пределах от 900 нм до 1650 нм. При максимальном охлаждении ( $-90^\circ\text{C}$ ), квантовая эффективность превышает 85%. Стандартный шум считывания  $580\text{e}^-$ . Уровень темнового шума при максимальном охлаждении составляет  $10.1\text{ke}^-/(\text{с}\cdot\text{пиксель})$ . Чувствительность -  $\approx 90\text{e}^-/\text{count}$ . Угол зрения  $\approx 14^\circ$ . Разрешение спектрографа при ширине входной щели 0.2 мм равно 0.8 нм.

Время экспозиции для получения одного измерения спектра ОН (3-1) установлено на 60 с (минимальное время экспозиции  $>1,4\text{ мс}$ ). Короткое время экспозиции заметно расширяет частотный диапазон измеряемых внутренних гравитационных волн. В данном исследовании, при температуре охлаждения камеры  $-50^\circ\text{C}$ , спектрограф предоставляет возможность измерять температуру ОН (3-1) с точностью  $\approx 2\text{ К}$ .

Выбранный рабочий диапазон в далекой инфракрасной области имеет ряд преимуществ, облегчающих ведение наблюдений излучения полос гидроксила, так как здесь интенсивность полос гидроксила существенно увеличивается и область свободна от эмиссий полярных сияний. Также, в этой области интенсивность паразитного солнечного излучения уменьшается  $1/\lambda^4$  раз, что удлиняет длину ряда ночных наблюдений.

Метод оценки вращательной температуры молекулярных эмиссий основан на подгонке модельных спектров, построенных с учетом аппаратной функции прибора для различных заранее заданных температур, к реально измеренному спектру [Ammosov, Gavriluyeva, 2000; Gavriluyeva, Ammosov, 2002]. Вращательная температура, определенная по распределению интенсивности в полосе гидроксила (ОН), соответствует кинетической температуре нейтрального газа на высоте излучения [Khomich, Semenov, Shefov, 2008; Noll et al., 2015]. Как показывают оценки, при применении методики определения вращательной температуры ОН (3-1) с выборкой спектров, где отношение сигнал/шум  $\geq 20$ , ошибка измерения температуры спектрографом Shamrock при данной конфигурации, не превышает 2 К.

Во втором разделе второй главы представлено техническое описание научно-исследовательского спутника Aura и установленного на нем микроволнового радиометра MLS (Microwave Limb Sounder). Определены анализируемые данные Aura (MLS), описан стандартный алгоритм их расчета и приведены спецификации данных.

Aura — научно-исследовательский спутник, предназначенный для изучения атмосферы Земли. Запущен 15 июля 2004 года. Основной задачей спутника является контроль за изменением климата на Земле, загрязнением воздуха, состоянием озонового слоя Земли. Запуск спутника входит в программу NASA EOS (Earth Observing System (Система наблюдения Земли)).

Aura была запущена на солнечно-синхронную околополярную орбиту (угол наклона 98,2°). Спутник вращается на высоте 705 км над Землей с шестнадцатидневным циклом повторения и 233 оборотами за цикл. Восходящий узел находится в дневном свете и пересекает экватор примерно в 13:45. Большим преимуществом спутника Aura в рамках диссертационной работы является наличие почти непрерывных в течение года (смены сезонов) температурных данных для высокоширотных зон, в том числе и для координат станции Маймага. Короткий пробел в данных в летний период не играет существенной роли для исследования, так как в этот период времени отсутствуют и данные наземных наблюдений в связи с наступлением полярного дня в высокоширотных зонах.

Микроволновый радиометр EOS MLS - один из четырех приборов на спутнике Aura, начавший оперировать 13 августа 2004 года. MLS проводит измерения состава атмосферы, температуры, влажности и облачного льда. MLS наблюдает тепловое микроволновое излучение по "лимбу" Земли (край атмосферы) в переднем направлении вдоль траектории полета космического корабля Aura, сканируя атмосферный профиль с уровня земли до  $\approx 90$  км каждые  $\approx 25$  секунд (или  $1,5^\circ (\approx 165 \text{ км})$ ). Система Aura MLS регистрирует примерно 3500 вертикальных профилей в сутки, охватывая широтный диапазон от  $82^\circ$  ю.ш. до  $82^\circ$  с.ш. Для анализа использовались данные измерений температуры атмосферы и геопотенциальной высоты 2-го уровня версии 4.2x(<http://daac.gsfc.nasa.gov>). Файлы исходных данных в формате HDF-EOS (иерархический формат данных) доступны по адресу [https://acdisc.gesdisc.eosdis.nasa.gov/opendap/HDF-EOS5/Aura\\_MLS\\_Level2/ML2T.004/contents.html](https://acdisc.gesdisc.eosdis.nasa.gov/opendap/HDF-EOS5/Aura_MLS_Level2/ML2T.004/contents.html)

Рабочей областью для научных исследований является интервал высот 261-0,001 гПа ( $\approx 10$ -92 км, 42 уровня/слоя). Вертикальное разрешение данных составляет около 10 км в районе мезосферы нижней термосферы. Точность измерения температуры составляет  $\approx \pm 3,6$  К в интервале высот 82-92 км. Сравнение температуры v4.2 с корреляционными наборами данных показывает, что данные MLS имеют устойчивые систематические смещения. В промежутке 0.01 - 0.001 гПа (77-92 км) MLS имеет смещение -9 К, в интервале 0.1 - 0.01 гПа (62-77 км) смещение от 0 до -2 К [Schwartz et al., 2008]. При сравнении с наземными наблюдениями эту поправку необходимо иметь в виду.

**В третьей главе в первой части** представлены результаты исследований среденочной температуры, активности приливных и внутренних гравитационных волн (ВГВ) в ночное время суток по данным температуры мезопаузы определенного посредством регистрации излучения гидроксила OH (3-1) на станциях Маймага и Тикси. Определяются стандартные отклонения температуры и относительные стандартные отклонения температуры обусловленные ВГВ и приливными волнами. Рассматривается зависимость состояния области мезопаузы от широты путем сравнения результатов наблюдений на станциях Маймага и Тикси.

Для исследования волновых процессов были использованы данные, полученные с августа по май на станции Маймага за период 2013-2018 гг. и с сентября по апрель на станции Тикси за период 2015-2018 гг.

В диссертации в качестве характеристики ночной волновой активности принято стандартное отклонение температуры  $T_i$  от ее среденочного значения  $T_0$  -  $\sigma$ .

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (T_i - T_0)^2},$$

где  $n$  – число измеренных значений в течение ночи.



В целях исключения данных с высоким уровнем шумовых помех производилась выборка спектров, удовлетворяющих соотношению сигнал/шум  $> 20$ , затем для исключения акустических волн из рассмотрения проводилось усреднение температуры с шагом 3 мин.

Стандартное отклонение является суперпозицией различных волн активных в ночное время суток и шума темнового тока детектора. Согласно работе [Offermann et al., 2009] и [Perminov et al., 2014] суперпозиция волн может быть представлена в виде:

$$\sigma = \sqrt{\sigma_{td}^2 + \sigma_{gw}^2 + \sigma_{noise}^2},$$

где  $\sigma_{td}$  – стандартное отклонение температуры, обусловленное приливными волнами,  $\sigma_{gw}$  – стандартное отклонение температуры, обусловленное внутренними гравитационными волнами,  $\sigma_{noise}$  – компонента стандартного отклонения температуры, вызванная шумом темнового тока детектора и погрешностью определения температуры (ошибки определения темнового тока и ошибки определения температуры).  $\sigma_{noise}$  была рассчитана как средняя арифметическая ошибка каждого отдельного измерения за ночь ( $\sigma_{noise} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta T_i$ ). В рассмотрение не были взяты планетарные волны, так как их временной масштаб много больше, чем одна ночь.

Величина  $\sigma_{td}$  определялась посредством выделения из ночного температурного ряда методом наименьших квадратов гармоник, соответствующих 24-, 12- и 8-часовой компонентам суточного прилива.

$$f_{td} = T_0 + A_1 \cos\left(\frac{2\pi}{1440}(t - \varphi_1)\right) + A_2 \cos\left(\frac{2\pi}{720}(t - \varphi_2)\right) + A_3 \cos\left(\frac{2\pi}{480}(t - \varphi_3)\right)$$

$f_{td}$  – сумма гармоник суточного прилива, периоды указаны в минутах.  $A_1, A_2, A_3$  – амплитуды гармоник суточного прилива,  $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$  – фазовые сдвиги гармоник,  $t$  – время в минутах.

Результат вычитания из ночного температурного ряда суммы гармоник суточного прилива соответствует вкладу распространения ВГВ в температуру и вкладу инструментального шума  $T_{gw+noise}$ . Отсюда, зная значение  $\sigma_{noise}$ , вычисляется стандартное отклонение  $\sigma_{gw}$ .

#### *Сравнение результатов наблюдений на станциях Маймага и Тикси*

Одновременные наблюдения с помощью спектрографов Shamrock на станциях Тикси и Маймага велись 3 полных сезона с 2015 по 2018 год. На рис. 1 представлены средненочные вращательные температуры гидроксила согласно наблюдениям на станциях Маймага и Тикси. Значения средненочных температур совпадают с большой точностью (в некоторые интервалы наблюдений в пределах погрешности) в течение имеющихся трех сезонов 2015-2018 гг. одновременных наблюдений.

Приливные составляющие стандартных отклонений температуры представлены на рис. 2.б. Черная и красная линии являются линиями скользящего среднего с окном усреднения 30 дней/точек и представляют собой сезонный ход приливной компоненты  $\sigma_{td}$  для станций Маймага и Тикси соответственно. Значения и сезонный ход приливной компоненты совпадают в пределах ошибок для обеих станций. Сезонный ход приливной компоненты стандартных отклонений температуры  $\sigma_{td}$  варьирует от 2.5 К до 5 К на протяжении всех сезонов наблюдений.

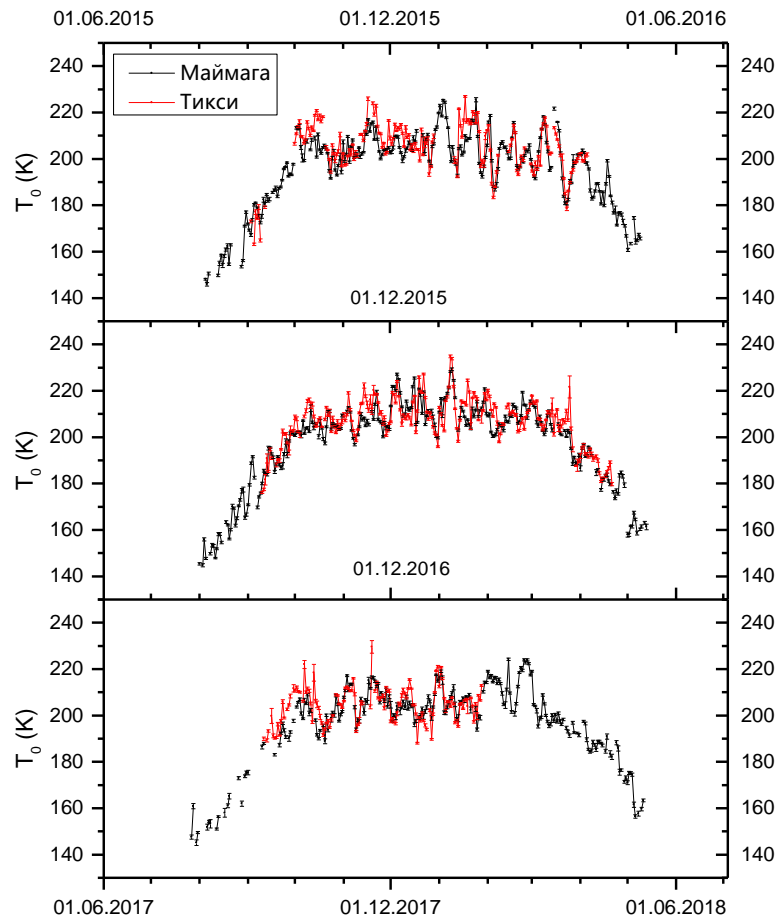


Рис. 1. Средненочные вращательные температуры гидроксила по наблюдениям на станциях Маймага и Тикси в течение 2015-2018 гг.

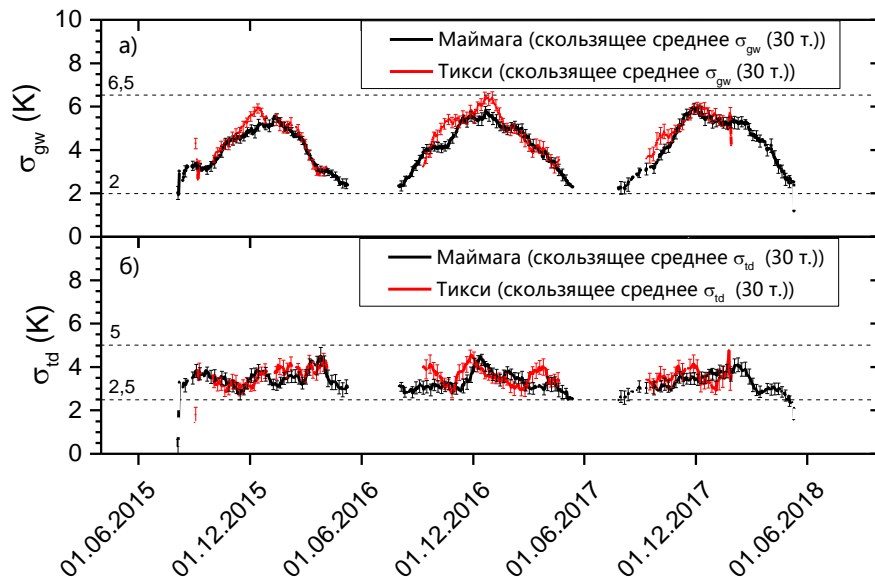


Рис. 2. Сезонные вариации а) ВГВ и б) приливной компоненты стандартных отклонений температуры, являющиеся линиями скользящего среднего с окном усреднения 30 дней. Измерения на станциях Маймага и Тикси отмечены красным и черным соответственно.

Стандартные отклонения температуры, соответствующие ВГВ, показаны на рис. 2.а, где линиями обозначены скользящие средние с окном усреднения 30 дней/точек, представляющие сезонную изменчивость гравитационной компоненты  $\sigma_{gw}$ . Значения гравитационных компонент стандартных отклонений температуры имеют хорошее совпадение в течение имеющихся трех сезонов 2015-2018 гг. наблюдений на станциях Тикси и Маймага. На протяжении большей части периода одновременных наблюдений сезонный ход  $\sigma_{gw}$  совпадает в пределах ошибок. Сезонное изменение ВГВ составляющей варьирует от 2 К до 6.5 К.

При сравнении рис. 1 и 2.а, наблюдаемый сезонный ход ВГВ компоненты стандартных температурных отклонений (рис. 2.а) визуальнo соответствует сезонному ходу среденочной температуры (рис. 1). Для дальнейшего анализа рассматриваются относительные значения стандартных отклонений.

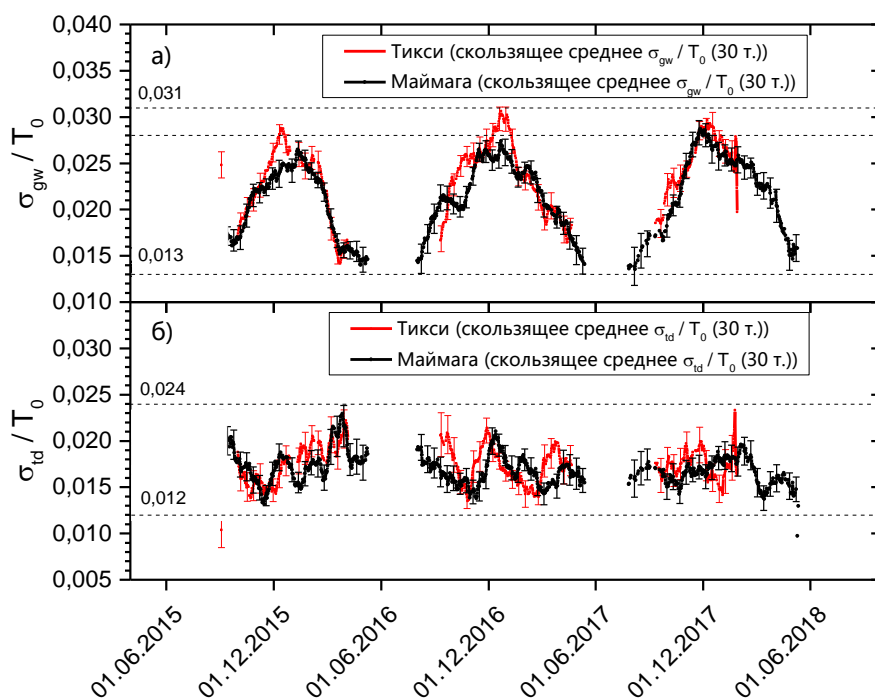


Рис. 3. Относительные стандартные отклонения температуры, обусловленные а) гравитационными и б) приливными волнами. Измерения на станциях Маймага и Тикси отмечены красными и черными точками соответственно.

Относительные значения стандартных температурных отклонений приведены на рис. 3, где так же наблюдаются близкие значения относительных приливных и ВГВ компонент, полученных на станциях Маймага и Тикси в течение трех сезонов одновременных наблюдений. Сезонное изменение относительной ВГВ составляющей варьирует в пределах 0,013 - 0,031, приливной – 0,012 - 0,024. На 0,003 единицы максимумы относительных стандартных отклонений температуры ВГВ компоненты на станции Тикси выше, чем на станции Маймага в сезоны 2015-2016 и 2016-2017.

На рис. 4 представлены сезонные вариации  $\sigma_{td}/T_0$  и  $\sigma_{gw}/T_0$  (где DOY – номер дня в году), черными и красными точками отмечены средние значения за все имеющиеся сезоны наблюдений на станциях Маймага и Тикси соответственно. Сезонные вариации  $\sigma_{gw}/T_0$  имеют максимальные значения зимой и минимальные летом с промежуточными значениями в периоды равноденствий. Сезонные вариации  $\sigma_{td}/T_0$  более сложные с локальными максимумами (в конце января – начале мая (DOY  $\approx$  32), в конце марта – начале

апреля (DOY  $\approx 90$ ), в конце августа – начале сентября (DOY  $\approx 240$ ), в декабре (DOY  $\approx 340$ )) и минимумами (в начале января (DOY  $\approx 2$ ), конце февраля – начале марта (DOY  $\approx 60$ ), в середине ноября (DOY  $\approx 315$ )).

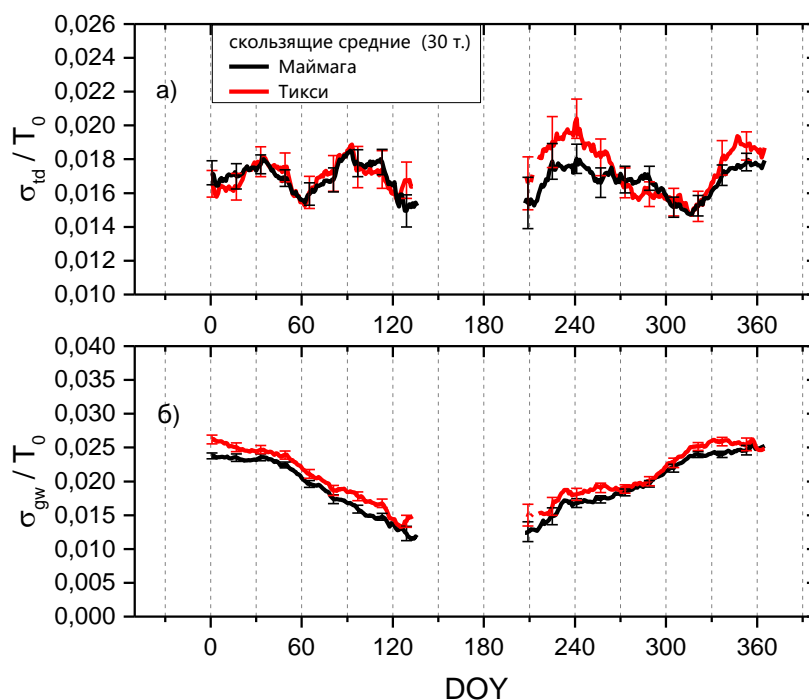


Рис. 4. Сезонные вариации относительных стандартных отклонений температуры, обусловленные а) приливными и б) гравитационными волнами. Измерения на станциях Маймага и Тикси отмечены черными и красными точками соответственно.

Работы по наблюдению эмиссии гидроксила для определения волновой активности проводились на станциях Вупперталь ( $51^\circ \text{ N}$ ,  $7^\circ \text{ E}$ ) [Offermann et al., 2011], Звенигород ( $55.7^\circ \text{ N}$ ,  $36.8^\circ \text{ E}$ ) и Торы ( $52^\circ \text{ N}$ ,  $103^\circ \text{ E}$ ) [Perminov et al., 2014], Алма-Ата ( $43^\circ 03' \text{ N}$ ,  $76^\circ 58' \text{ E}$ ) [Попов и др., 2018] и Шигараки ( $35^\circ \text{ N}$ ,  $136^\circ \text{ E}$ ) [Gavrilov, Shiokawa, Ogawa, 2002]. В силу схожести используемых методов исследования, полученные результаты сравнивались с данными станций Звенигород ( $55.7^\circ \text{ N}$ ,  $36.8^\circ \text{ E}$ ) и Торы ( $52^\circ \text{ N}$ ,  $103^\circ \text{ E}$ ).

Относительные приливные компоненты стандартных отклонений температуры  $\sigma_{td}/T_0$  полученные в Звенигороде, ст. Торы, Маймаге и Тикси близки по значению. Значения  $\sigma_{gw}/T_0$  (рис. 4.б) в Якутии примерно в два раза выше, чем в Звенигороде и, за исключением пика в сентябре, на ст. Торы ([Perminov et al., 2014, рис. 5] или рис. 3.1.13 в диссертации). Это может быть связано с тем, что экспозиции, используемые для регистрации ОН-спектров в Звенигороде и ст. Торы, являются продолжительными (10 мин) и, следовательно, регистрируются только волны с периодами более 30 мин. В настоящей работе анализируются температурные данные с 3-минутным усреднением, что позволяет регистрировать спектр волн с периодами 6 мин. и более в ночное время.

Стандартные отклонения температуры ( $\sigma_N$ ) ([Offermann et al., 2011, рис. 10] или рис. 3.1.15 в дисс.), полученные в Вуппертале, включают в себя помимо гравитационных волн различных периодов колебаний инструментальный шум и приливы. В связи с этим значения  $\sigma_N$  много больше (порядка 20 К) чем значения  $\sigma_{gw}$  полученные на станциях Маймага и Тикси. Дополнительно, в работе [Offermann et al., 2011, рис. 7] приведены значения  $\sigma_a$  для 1997 года, соответствующие вкладу короткопериодных возмущений. Значения  $\sigma_a$  (Вупперталь) превышают значения  $\sigma_{gw}$  (Маймага и Тикси) на  $\approx 1,5$  К. Эта

разница в некоторой степени должна быть обусловлена тем, что сравниваются данные, полученные разными методами и в разные годы.

При сравнении средних стандартных отклонений температуры ( $\sigma_N$ ), ([Offermann et al., 2011, рис. 10] или рис. 3.1.15 в диссертации), с данными  $(\sigma_{gw}/T_0 + \sigma_{td}/T_0)$  полученными на ст. Торы ([Perminov et al., 2014, рис. 5] или рис. 3.1.13 в диссертации), заметна схожесть хода сезонных вариаций (формы) в летние и осенние месяцы. В особенности совпадает пик стандартных отклонений температуры в сентябре (240-270 дни года). При сопоставлении значений  $\sigma_a$  (Вупперталь, [Offermann et al., 2011, рис. 7] или рис. 3.1.14 в дисс.),  $\sigma_{gw}/T_0$  (Торы, [Perminov et al., 2014, рис. 5] или рис. 3.1.13 в дисс.) и относительной дисперсии мезомасштабных (ВГВ) вариаций температуры ( $T'/T_0$ ) (Алма-Ата, [Попов и др. 2018, рис. 2 (б)] или рис. 3.1.16 в дисс.), заметна схожесть хода сезонных вариаций (формы) практически на протяжении всего года. В частности, пик стандартных отклонений температуры в сентябре (240-270 дни года) тоже совпадает.

Относительные стандартные отклонения температуры  $\sigma_{gw}/T_0$ , полученные в Звенигороде ([Perminov et al., 2014, рис. 5] или рис. 3.1.13 в дисс.) и на станциях Маймага и Тикси (рис. 4.б) характеризуются более плавным сезонным ходом чем на станциях Торы, Вупперталь и Алма-Ата. Характер сезонных вариаций волновой активности может различаться в зависимости от высоты нахождения слоя эмиссии ОН и от направления преобладающего ветра на этой высоте, следовательно, и от географии расположения станций наблюдения, что и наблюдается в работе [Gavrilov, Shiokawa, Ogawa, 2002].

Во второй части третьей главы приводятся результаты сравнения средненочной температуры области мезопаузы с температурными данными Aura (MLS) на близкой высоте. Представлены исследования особенности активности ВГВ в области мезопаузы по измерениям на высокоширотной станции Маймага в зимний период 2014-2015 гг. Проведено сопоставление результатов исследования особенности в зимний период 2014-2015 гг. на станции Маймага с температурными данными Aura (MLS).

*Сравнение средненочной температуры ОН (3-1) с температурными данными Aura (MLS) на близкой высоте.* В различных работах [French, Mulligan, 2010; Medvedeva et al., 2014; Schwartz et al., 2008] для сравнения вращательных температур гидроксидов с данными MLS (Aura) используются измерения на 3-х геопотенциальных уровнях: 0,005 гПа (47 слой), 0,002 гПа (48 слой), 0,001 гПа (46 слой). Для ст. Маймага геопотенциальные уровни соответствуют высотам: 0,005 гПа  $\approx$  82 км, 0,002 гПа  $\approx$  86 км, 0,001 гПа  $\approx$  91 км. 48-й высотный уровень/слой (0,002 гПа ( $\approx$  86 км)) измерений MLS (Aura) является ближайшим уровнем к высоте эмиссии ОН (3-1) ( $\approx$  87 км).

Для корректного сравнения необходимо учесть то, что Aura (MLS) проводит одно измерение над станцией Маймага за ночь. В диссертационной работе сравниваются средненочная температура ОН (3-1) и температура  $T_{bg}$  вычисленная из данных Aura (MLS). При вычислении средненочной температуры ОН (3-1) сглаживаются ее колебания с периодом меньше длительности ночи наблюдения. Поэтому при определении  $T_{bg}$ , выделялись и вычитались из измерений Aura (MLS) пертурбации температуры вследствие распространения относительно короткопериодических атмосферных волн. В этих целях исследовались ночные измерения Aura (MLS) соответствующие всему широтному кольцу, на котором находится станция Маймага (63.04° N).

Короткопериодические атмосферные волны (ВГВ) анализируются методом аналогичным, представленному в работах [Preusse et al., 2009, 2002] и [Fetzer, Gille, 1994]. Используемый метод резюмируется следующим образом: компоненты температуры

соответствующие зональным волновым числам 1–6 (соответствующие волнам Россби) оцениваются путем подгонки методом наименьших квадратов (рис. 5.а), а сумма зональных средних температур ( $\bar{T}$ ) (волновое число 0) и компонент зональных волновых чисел 1–6 ( $T_{pw}$ ) рассматриваются как «фоновые температуры ( $T_{bg}$ )».

$$T_{bg} = \bar{T} + T_{pw} = \bar{T} + A_1 \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda_1}(x - \varphi_1)\right) + \dots + A_6 \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda_6}(x - \varphi_6)\right),$$

где  $A_1, \dots, A_6$  – амплитуды волн Россби соответствующие волновым числам 1-6;  $\lambda_1, \dots, \lambda_6$  – длины соответствующих волн Россби;  $\varphi_1, \dots, \varphi_6$  – фазы волн Россби;  $x$  – координата (долгота).

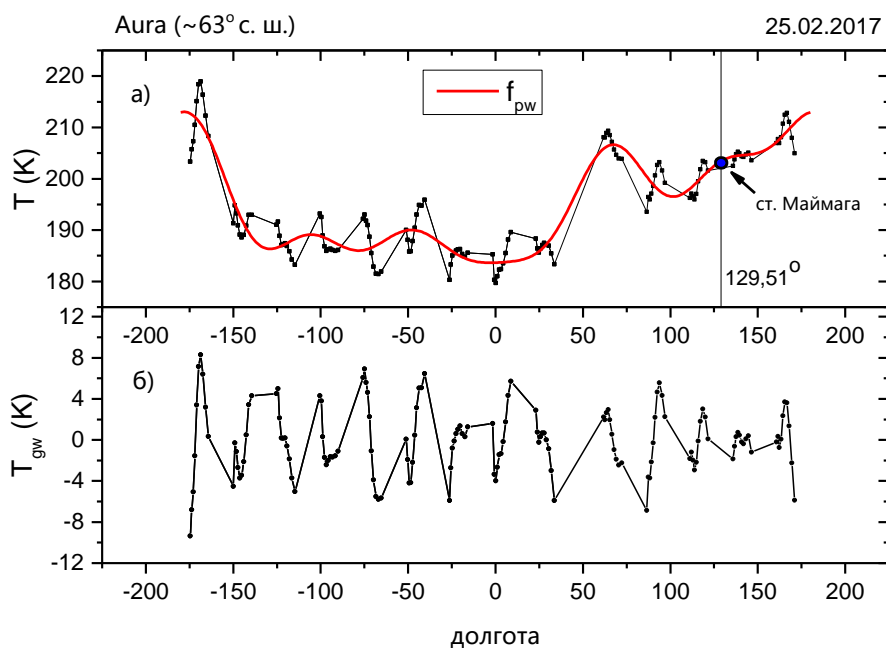


Рис. 5. а) Зональные колебания температуры на одном высотном уровне (слое) по наблюдениям Aura (MLS). Черные точки измерения спутника, красная линия сумма волн Россби  $T_{pw}$  и средnezональной температуры  $\bar{T}$ , б) вариации температуры  $T_{gw}$  обусловленные ВГВ

При измерениях в фиксированное местное солнечное время вклад всех приливных компонент включается во вклад компонент, соответствующих волновым числам 0–6 и поэтому может быть вычтено вместе с планетарными волнами ( $T_{pw}$ ) (даже если нельзя вычленить отдельно вклад приливных компонент в температуру). Следовательно, «фоновые температуры ( $T_{bg}$ )», оцениваемые вышеуказанным методом, должны содержать среднюю зональную температуру ( $\bar{T}$ ), планетарные волны ( $T_{pw}$ ) и приливные волны. Остаточные температурные возмущения ( $T_{gw}$ ) рассчитываются путем вычитания фоновой температуры из наблюдаемой температуры (то есть  $T_{gw} = T - T_{bg}$ ), а  $T_{gw}$  рассматриваются как температурные возмущения, вызванные ВГВ (рис. 5.б).

Рис. 6.а представляет сравнение данных вращательной температуры ОН (3-1) и температуры  $T_{bg}$  выделенной из измерений температуры Aura (MLS) на уровне 0,002 гПа над ст. Маймага. Черным цветом изображены усредненные за ночь температуры ОН (3-1). Красным обозначены температуры  $T_{bg}$  (Aura (MLS)). На рис. 6.а в зимний период наблюдений в большинстве своем совпадают фазы вариаций температуры с периодами длительностью от нескольких дней, которые соответствуют распространению планетарных волн (схожий вид межсуточных вариаций) ( $r = 0,948$ ).

На рис. 6.б черной линией представлен сезонный ход температуры ОН (3-1), красной - температуры  $T_{bg}$  (Aura (MLS)), - в течение 2013-2018 гг. Ошибки приведены через каждые 10 точек. Графики на рис. 6.б синфазно отражают характер сезонных вариаций температуры атмосферы на высоте излучения гидроксила за период 2013-2018 гг. ( $r = 0,981$ ). В зимние периоды 2013-2015 гг. средние сезонные значения температуры ОН (3-1) на  $\approx 10$  К превышают средние сезонные значения температуры  $T_{bg}$ . Подобный сдвиг на  $\approx 10$  К относительно значений температуры ОН (6-2) упоминается в работах [French, Mulligan, 2010; Medvedeva et al., 2014; Schwartz et al., 2008]. В зимние периоды 2015-2018 гг. хоть вариации температур близки по значению, средние сезонные значения температуры ОН (3-1) продолжают превышать средние сезонные значения температуры  $T_{bg}$ .

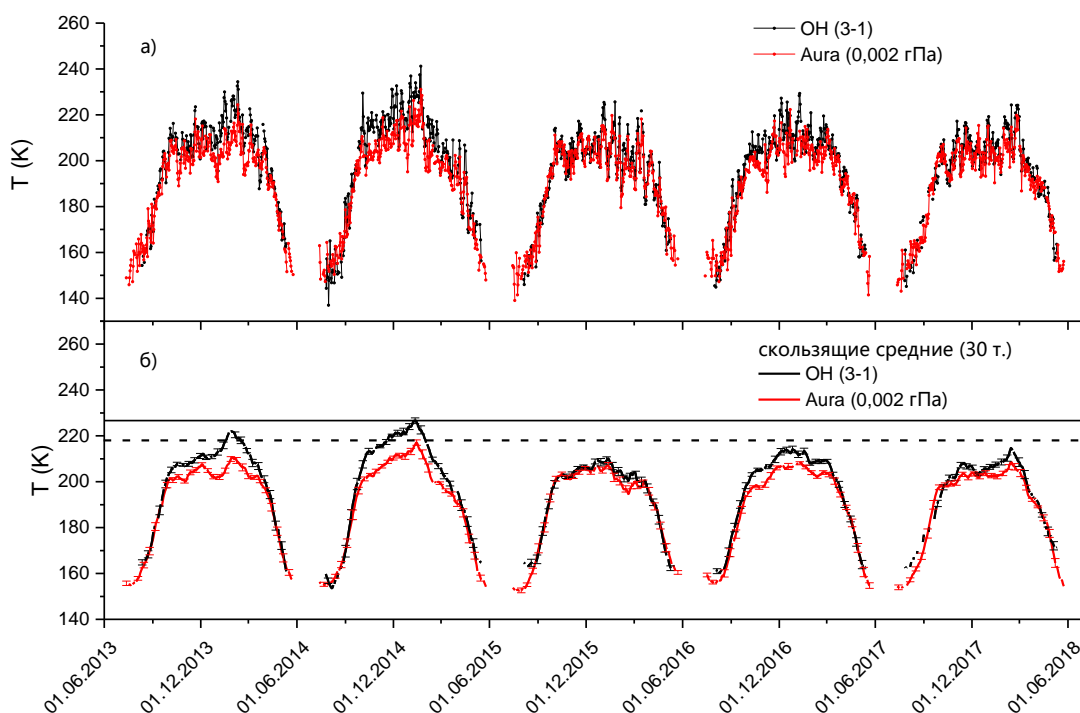


Рис. 6. а) Средненочные вращательные температуры ОН (3-1) и температуры  $T_{bg}$  выделенные из измерений температуры Aura (MLS) на уровне 0,002 гПа над ст. Маймага, б) сезонные вариации температуры ОН (3-1) и температуры  $T_{bg}$  (Aura (MLS)) на уровне 0,002 гПа над ст. Маймага в течение 2013-2018 гг.

Сравнение данных взаимно подтверждает наблюдение повышенной температуры в области мезопаузы в зимний период 2014-2015 гг. Оставшиеся расхождения температур могут быть объяснены многими факторами, такими как различия в высоте и методах измерений. В целом вариации температуры, измеренные двумя различными методами, качественно совпадают и отражают характер сезонных изменений.

*Наземные наблюдения на станции Маймага.* На рис. 7.а показаны средненочные вращательные температуры гидроксила ( $T_0$ ) с 2013 по 2018 гг. Красная линия является линией скользящего среднего (30 дней) и представляет собой сезонные вариации средненочной температуры. Стандартные отклонения температуры, соответствующие ВГВ показаны на рис. 7.б, где красной линией обозначено скользящее среднее с окном пропускания 30 дней, представляющее сезонный ход гравитационной компоненты  $\sigma_{gw}$ . Относительные стандартные отклонения температуры, соответствующие ВГВ показаны на рис. 7.в, где красной линией обозначено скользящее среднее с окном пропускания 30 дней.

В сезоне наблюдений 2014-2015 гг. гравитационная компонента стандартных отклонений температуры  $\sigma_{gw}$  имеет более низкие значения в зимний период, чем в остальные сезоны наблюдений. Сезонное изменение гравитационной составляющей варьирует от 2 до 6 К, а в сезоне 2014-2015 гг. от 1,5 до 5 К. Разница составляет 0,6 - 1 К в зимние месяцы, средняя погрешность  $\overline{\Delta \sigma_{gw}}$  равна 0,23 К. На графике относительных стандартных отклонений температуры  $\sigma_{gw}/T_0$  низкие значения в 2014-2015 более выражены. Сезонное изменение относительной гравитационной составляющей варьирует от 0,010 до 0,029, а в сезоне 2014-2015 от 0,010 до 0,022. Разница в зимние месяцы составляет 0,005 - 0,007 ( $\pm 0.0024$ ). Кроме того, в этот сезон средненочные температуры зимней мезопаузы, наоборот, превышают значения в другие сезоны на 9 - 15 ( $\pm 2,6$ ) К в зависимости от года. Для дальнейшего изучения были привлечены спутниковые данные EOS MLS (Aura).

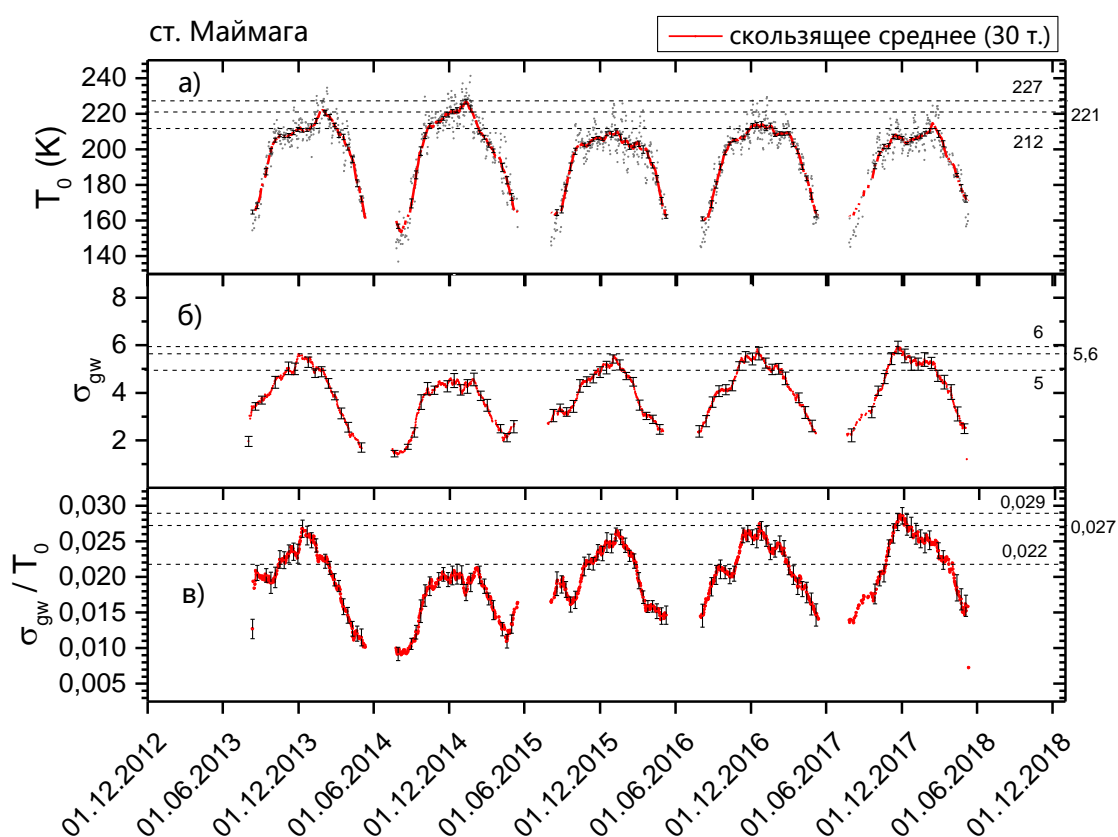


Рис. 7. а) Средненочные вращательные температуры  $T_0$  гидроксила по наблюдениям на ст. Маймага и сезонные вариации средненочной температуры (скользящее среднее 30 т.), б) сезонные вариации ВГВ-компоненты стандартных отклонений температуры, являющиеся скользящим средним с окном усреднения 30 дней, в) относительные стандартные отклонения температуры, вызванные ВГВ, являющиеся скользящим средним с окном усреднения 30 дней.

*Сопоставление результатов исследования особенности в зимний период 2014-2015 гг. на станции Маймага с температурными данными Aura (MLS).*

Данные Aura для одного широтного кольца (широта станции Маймага  $63.04^\circ$  N) состоят из рядов температур по долготам для 55 различных уровней высоты. Чтобы построить вертикальный профиль температуры, расчет  $T_{bg}$  должен повторяться для каждого слоя (55 раз). После выделения и вычитания вклада пертурбаций температуры вследствие распространения относительно короткопериодических атмосферных волн из температурных профилей Aura над станцией Маймага, заметны особенности профиля  $T_{bg}$  в



зимний период 2014-2015 гг. (рис. 8). В этом сезоне зимняя стратопауза имеет более низкие температуры, а область мезопаузы более высокие, чем в другие сезоны наблюдений (рис. 8). Согласно данным измерений на ст. Маймага спектрографом Shamrock (Andor) средненочная температура  $T_0$  на высоте эмиссии ОН (3-1) ( $\approx 87$  км) в зимний период сезона 2014-2015 так же превышает значения в другие сезоны наблюдений (рис. 7. а).

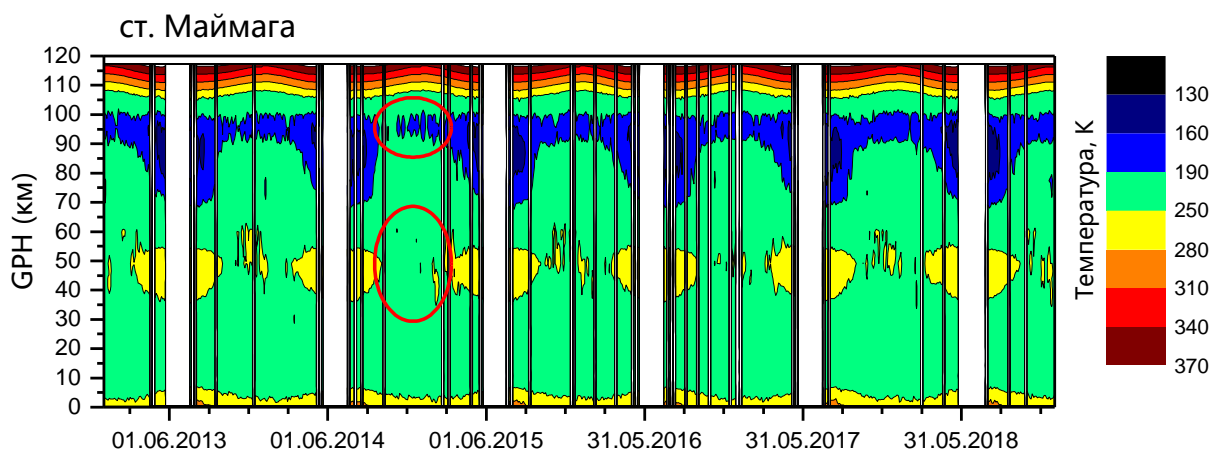


Рис. 8. Вертикальные профили температуры атмосферы  $T_{bg}$ , определенные с помощью данных Aura (MLS) над ст. Маймага в течение 2013–2018 гг. (Вертикальные линии соответствуют пробелам в данных Aura (MLS))

Более низкие показатели активности ВГВ в области мезопаузы в зимний период сезона 2014-2015 (рис. 7. б) могут быть объяснены тем, что возможно в этот сезон физические условия стратопаузы с пониженной температурой (рис. 8) позволили ВГВ пройти вверх из нижних слоев атмосферы (возможно из-за отсутствия фильтрации ветром), затем значительная часть энергии ВГВ была поглощена на высоте близкой к высоте эмиссионного слоя гидроксила ( $\approx 87$  км), нагревая область мезопаузы (рис. 7. а).

В работе [Wilhelm, Stober, Brown, 2019] на рис. 11 заметны похожие особенности зимой 2014-2015 гг. в наблюдениях метеорологического радара на станции Юлиусрух ( $54.6^\circ$  N,  $13.4^\circ$  E) с 2002 по 2019 гг. На рис. 11 наблюдается повышение зональной составляющей полусуточной приливной компоненты скорости ветра на высоте 90-100 км и повышение энергии планетарных волн на высоте 80-100 км на рис. 15 [Wilhelm, Stober, Brown, 2019].

**В заключении** сформулированы **основные результаты** работы (проведенных исследований):

1. Получены активности приливных и внутренних гравитационных волн по наблюдениям на станции Маймага за период 2013-2018 гг. и на станции Тикси за период 2015-2018 гг.
2. Определены широтные особенности волновой активности над станциями Маймага и Тикси.
  - а) Активность ВГВ и приливных волн, наблюдаемая на станции Маймага отличается незначительно от наблюдаемой на станции Тикси
  - б) Наблюдается сезонный ход активности ВГВ схожий с сезонным ходом средненочной температуры гидроксила ОН (3-1).
3. Сопоставлены данные наблюдений на станции Маймага с результатами спутниковых измерений Aura. Сравнение средненочной вращательной температуры ОН (3-1) с выделенными из данных Aura (MLS) фоновыми температурами ( $T_{bg}$ ) показало, что вариации температуры, измеренные двумя различными методами, имеют схожий вид межсуточных вариаций ( $r = 0,948$ ) и синфазно отражают характер сезонных изменений за период 2015-2018 гг. на станции Маймага ( $r = 0,981$ ).

4. Средние сезонные значения температуры ОН (3-1) превышают средние сезонные значения температуры  $T_{bg}$  измеренные спутником Aura (MLS). Значительные расхождения температуры наблюдаются в зимнее время года. Максимальное расхождение составляет  $\approx 10$  К в зимние периоды 2013-2015 гг.
5. Обнаружено, что в зимний период сезона наблюдений 2014-2015 гг. характеристика активности ВГВ  $\sigma_{gw}$  имеет более низкие, а средненочная температура области мезопаузы более высокие значения чем в другие сезоны наблюдений ОН (3-1) за период 2013-2018 гг. Это качественно подтверждается наблюдением повышенной температуры вблизи упомянутой области и пониженной температурой в районе стратосферы относительно других сезонов наблюдений за период 2013-2018 гг. согласно спутниковым измерениям Aura (MLS).

#### **Основные публикации по теме диссертации**

1. Сивцева В. И., Аммосов П. П., Гаврильева Г. А., Колтовской И. И., Аммосова А. М. Сравнение сезонных вариаций активности приливных и внутренних гравитационных волн по наблюдениям на станциях Маймага и Тикси // Солнечно-земная физика. – 2018. – Т. 4. – № 2. – С. 109–115. doi: 10.12737
2. Yasyukevich A. S., Medvedeva I. V., Sivtseva V. I., Chernigovskaya M. A., Ammosov P. P., Gavrilyeva G. A. Strong Interrelation between the Short-Term Variability in the Ionosphere, Upper Mesosphere, and Winter Polar Stratosphere // Remote Sensing. – 2020. – Vol. 12. – № 10. – P. 1588. doi:10.3390/rs12101588
3. Сивцева В. И., Аммосов П. П., Гаврильева Г. А., Колтовской И. И. Температура области мезопаузы по измерениям спутника AURA MLS и ОН (3-1) в Маймаге // Оптика атмосферы и океана. – 2021. – Т. 34. – № 05. – С. 364–368. doi: 10.15372/AOO20210508
4. Колтовской И. И., Аммосов П. П., Гаврильева Г. А., Аммосова А. М., Сивцева В. И. Результаты сравнения температуры мезопаузы на разнесенных по широте станциях // Химическая физика. – 2018. – Т. 37. – № 5. – С. 50–55. doi: 10.7868/S0207401X18050060
5. Sivtseva V. I., Ammosov P. P., Gavrilyeva G. A., Koltovskoi I. I., Ammosova A. M. Internal gravity waves in the mesopause region according to the measurements at the Maimaga station // Proc. SPIE 10833, 24th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics. – 2018. – 10833A1. doi: 10.1117/12.2504445
6. Sivtseva V. I., Ammosov P. P., Gavrilyeva G. A., Koltovskoi I. I., Ammosova A. M. Internal gravity and tidal waves in the mesopause region in Yakutia // J. Phys.: Conf. Ser. – 2019. – Vol. 1152. – P. 012012. doi:10.1088/1742-6596/1152/1/012012
7. Sivtseva V. I., Ammosov P. P., Gavrilyeva G. A., Koltovskoi I. I., Ammosova A. M. Comparison of internal gravity waves variations in the mesopause region according to observations at Maimaga station with EOS MLS (Aura) temperature data // Proc. SPIE 11208, 25th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics. – 2018. – 112089B. doi: 10.1117/12.2540797
8. Сивцева В. И. Сезонные колебания активности ВГВ в области мезопаузы по измерениям на станции Маймага // Вестник СВФУ. – 2018. – Т. 66. – № 4. – С. 61–67. doi: 10.25587/SVFU.2018.66.16121
9. Сивцева В. И., Аммосов П. П., Гаврильева Г. А., Колтовской И. И., Аммосова А. М. Сопоставление волновой активности в области мезопаузы на станции Маймага с температурными данными EOS MLS (Aura) и активностью планетарных волн на станции Тикси // Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки. – 2019. – Т. 29. – № 4. – С. 182–189. doi: 10.26117/2079-6641-2019-29-4-182-189

10. Koltovskoi I. I., Ammosov P. P., Gavrilyeva G. A., Ammosova A. M., Sivtseva V. I. New infrared spectrograph for the investigation of the mesopause region // Proc. SPIE 10466. – 2017. – 1046645. doi: 10.1117/12.2288195
11. Gavrilyeva G. A., Ammosov P. P., Koltovskoi I. I., Sivtseva V. I., Iumshanov N. N. The optic meridional network in Yakutia: The method of mesopause temperature measurement // AIP Conference Proceedings. – 2021. – Vol. 2328.– № 1. – P. 050010. <https://doi.org/10.1063/5.0042255>

#### **Статьи в журналах, рекомендованных ВАК:**

1. Сивцева В. И., Аммосов П. П., Гаврильева Г. А., Колтовской И. И., Аммосова А. М. Сравнение сезонных вариаций активности приливных и внутренних гравитационных волн по наблюдениям на станциях Маймага и Тикси // Солнечно-земная физика. – 2018. – Т. 4. – № 2. – С. 109–115. doi: 10.12737
2. Yasyukevich A. S., Medvedeva I. V., Sivtseva V. I., Chernigovskaya M. A., Ammosov P. P., Gavrilyeva G. A. Strong Interrelation between the Short-Term Variability in the Ionosphere, Upper Mesosphere, and Winter Polar Stratosphere // Remote Sensing. – 2020. – Vol. 12. – № 10. – P. 1588. doi:10.3390/rs12101588
3. Сивцева В. И., Аммосов П. П., Гаврильева Г. А., Колтовской И. И. Температура области мезопаузы по измерениям спутника AURA MLS и OH (3-1) в Маймаге // Оптика атмосферы и океана. – 2021. – Т. 34. – № 05. – С. 364–368. doi: 10.15372/AOO20210508
4. Колтовской И. И., Аммосов П. П., Гаврильева Г. А., Аммосова А. М., Сивцева В. И. Результаты сравнения температуры мезопаузы на разнесенных по широте станциях // Химическая физика. – 2018. – Т. 37. – № 5. – С. 50–55. doi: 10.7868/S0207401X18050060
5. Sivtseva V. I., Ammosov P. P., Gavrilyeva G. A., Koltovskoi I. I., Ammosova A. M. Internal gravity waves in the mesopause region according to the measurements at the Maimaga station // Proc. SPIE 10833, 24th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics. – 2018. – 10833A1. doi: 10.1117/12.2504445
6. Sivtseva V. I., Ammosov P. P., Gavrilyeva G. A., Koltovskoi I. I., Ammosova A. M. Internal gravity and tidal waves in the mesopause region in Yakutia // J. Phys.: Conf. Ser. – 2019. – Vol. 1152. – P. 012012. doi:10.1088/1742-6596/1152/1/012012
7. Sivtseva V. I., Ammosov P. P., Gavrilyeva G. A., Koltovskoi I. I., Ammosova A. M. Comparison of internal gravity waves variations in the mesopause region according to observations at Maimaga station with EOS MLS (Aura) temperature data // Proc. SPIE 11208, 25th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics. – 2018. – 112089B. doi: 10.1117/12.2540797
8. Koltovskoi I. I., Ammosov P. P., Gavrilyeva G. A., Ammosova A. M., Sivtseva V. I. New infrared spectrograph for the investigation of the mesopause region // Proc. SPIE 10466. – 2017. – 1046645. doi: 10.1117/12.2288195
9. Gavrilyeva G. A., Ammosov P. P., Koltovskoi I. I., Sivtseva V. I., Iumshanov N. N. The optic meridional network in Yakutia: The method of mesopause temperature measurement // AIP Conference Proceedings. – 2021. – Vol. 2328.– № 1. – P. 050010. <https://doi.org/10.1063/5.0042255>

#### **Список цитируемой литературы**

1. Hines C.O. The upper atmosphere in motion / C.O. Hines // Washington, D.C., American Geophysical Union (Geophysical Monograph Series, No. 18), 1974. 1037 p. – 1974

2. Попов А. Межгодовые изменения интенсивности мезомасштабных вариаций ночного свечения гидроксила в Алма-Ате / А. Попов, Н. Гаврилов, А. Андреев, А. Погорельцев // Солнечно-земная физика. – 2018. – Т. 4. – № 2. – С. 102-108.
3. Ammosov P.P. Infrared Digital Spectrograph for Hydroxyl Rotational Temperature Measurements / P.P. Ammosov, G.A. Gavrilyeva // Instruments and Experimental Techniques. – 2000. – Vol. 43. – № 6. – P. 792-797.
4. Fetzer E.J. Gravity Wave Variance in LIMS Temperatures. Part I: Variability and Comparison with Background Winds / E.J. Fetzer, J.C. Gille // Journal of the Atmospheric Sciences. – 1994. – Vol. 51. – Gravity Wave Variance in LIMS Temperatures. Part I. – № 17. – P. 2461-2483.
5. French W.J.R. Stability of temperatures from TIMED/SABER v1.07 (2002–2009) and Aura/MLS v2.2 (2004–2009) compared with OH (6-2) temperatures observed at Davis Station, Antarctica / W.J.R. French, F.J. Mulligan // Atmospheric Chemistry and Physics. – 2010. – Vol. 10. – № 23. – P. 11439-11446.
6. Gavrilov N.M. Seasonal variations of medium-scale gravity wave parameters in the lower thermosphere obtained from spectral airglow temperature imager observations at Shigaraki, Japan / N.M. Gavrilov, K. Shiokawa, T. Ogawa // Journal of Geophysical Research: Atmospheres. – 2002. – Vol. 107. – № D24. – P. ACL 7-1-ACL 7-10.
7. Gavrilyeva G.A. Seasonal variations in the mesopause temperature over Yakutsk (63° N, 129.5° E) / G.A. Gavrilyeva, P.P. Ammosov // Geomagnetism and Aeronomy. – 2002. – Vol. 42. – № 2. – P. 267-271.
8. Khomich V.Yu. Airglow as an Indicator of Upper Atmospheric Structure and Dynamics / V.Yu. Khomich, A.I. Semenov, N.N. Shefov. – Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2008.
9. Medvedeva I.V. Comparison of ground-based OH temperature data measured at Irkutsk (52°N, 103°E) and Zvenigorod (56°N, 37°E) stations with Aura MLS v3.3 / I.V. Medvedeva, A.I. Semenov, V.I. Perminov, A.B. Beletsky, A.V. Tatarnikov // Acta Geophysica. – 2014. – Vol. 62. – № 2. – P. 340-349.
10. Noll S. OH populations and temperatures from simultaneous spectroscopic observations of 25 bands / S. Noll, W. Kausch, S. Kimeswenger, S. Unterguggenberger, A.M. Jones // Atmospheric Chemistry and Physics. – 2015. – Vol. 15. – № 7. – P. 3647-3669.
11. Offermann D. Long-term development of short-period gravity waves in middle Europe / D. Offermann, J. Wintel, C. Kalicinsky et al. // Journal of Geophysical Research. – 2011. – Vol. 116. – P. D00P07.
12. Offermann D. Relative intensities of middle atmosphere waves / D. Offermann, O. Gusev, M. Donner, J.M. Forbes et al. // Journal of Geophysical Research. – 2009. – Vol. 114. – № D6. – P. D06110.
13. Perminov V.I. Temperature variations in the mesopause region according to the hydroxyl-emission observations at midlatitudes / V.I. Perminov, A.I. Semenov, I.V. Medvedeva, N.N. Pertsev // Geomagnetism and Aeronomy. – 2014. – Vol. 54. – № 2. – P. 230-239.
14. Preusse P. New perspectives on gravity wave remote sensing by spaceborne infrared limb imaging / P. Preusse, S. Schroeder, L. Hoffmann, M. Ern, F. Friedl-Vallon et al. // Atmos. Meas. Tech. – 2009. – Vol. 2. – P. 299-311.
15. Preusse P. Space-based measurements of stratospheric mountain waves by CRISTA 1. Sensitivity, analysis method, and a case study / P. Preusse, A. Dörnbrack, S.D. Eckermann et al. // Journal of Geophysical Research: Atmospheres. – 2002. – Vol. 107. – № D23. – P. CRI 6-1-CRI 6-23.
16. Schwartz M.J. Validation of the Aura Microwave Limb Sounder temperature and geopotential height measurements / M.J. Schwartz, A. Lambert, G.L. Manney et al. // Journal of Geophysical Research. – 2008. – Vol. 113. – № D15. – P. D15S11.
17. Wilhelm S. Climatologies and long-term changes in mesospheric wind and wave measurements based on radar observations at high and mid latitudes / S. Wilhelm, G. Stober, P. Brown // Annales Geophysicae. – 2019. – Vol. 37. – № 5. – P. 851-875.