

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

Санкт-Петербургский научно-исследовательский центр экологической безопасности
Российской академии наук – обособленное структурное подразделение
Федерального государственного бюджетного учреждения науки
«Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр
Российской академии наук»
(НИЦЭБ РАН – СПб ФИЦ РАН)

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Санкт-Петербургский научный центр Российской академии наук
(СПбНЦ РАН)

Научный Фонд «Международный центр по окружающей среде и дистанционному
зондированию имени Нансена»
(Фонд «Нансен-центр»)

**ВСЕРОССИЙСКАЯ НАУЧНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ
С МЕЖДУНАРОДНЫМ УЧАСТИЕМ «ЗЕМЛЯ И КОСМОС»
К СТОЛЕТИЮ АКАДЕМИКА РАН
К.Я. КОНДРАТЬЕВА**

СБОРНИК СТАТЕЙ

**Санкт-Петербург
2020**

Всероссийская научная конференция с международным участием «Земля и космос» к столетию академика РАН К.Я. Кондратьева. 20-21 октября 2020 года, Санкт-Петербург – Сборник статей – СПб.: 2020. – 334 с.

ISBN 978-5-6044977-3-9

В сборнике докладов конференции «Земля и космос» к столетию академика РАН К.Я. Кондратьева представлены результаты современных исследований системы «Солнце-атмосфера-Земля» на основе дистанционных методов зондирования со спутников, самолетов-лабораторий, беспилотных летательных аппаратов, а также наземных средств мониторинга парниковых газов, аэрозолей и облаков, ледяного покрова в Арктике. Выявлено, что климатические аномалии среднегодовой температуры в наибольшей степени проявляются в Арктике и особенно в Сибири. Представлены работы по численному моделированию взаимодействия физических и химических процессов в атмосфере, по идентификации фундаментального глобального климатического колебания, а также результаты экспериментальных исследований для решения народно-хозяйственных задач по освоению природных ресурсов и при строительстве соответствующей инфраструктуры и реализации Северного морского пути в Арктике. В докладах обсуждены вопросы применения методов дистанционного мониторинга изменений окружающей среды для нужд сельского хозяйства, проблемы, связанные с лесными пожарами, с источниками техногенных отходов и отвалов, с регистрацией и прогнозированием природных и техногенных катастроф. Рассмотрены результаты исследований трансграничного переноса загрязняющих веществ в атмосфере, источники и стоки парниковых газов, результаты Пан-Евразийских Экспериментов, вопросы автоматизации и обработки спутниковых данных, проблемы экологической безопасности территорий разного масштаба и др.

Все выше перечисленные направления исследований во многом являются продолжением тех работ, которые выполнялись ранее под руководством академика РАН К.Я. Кондратьева.

Мероприятие проведено при финансовой поддержке РФФИ, проект № 20-05-20027.

Тексты статей публикуются в авторской редакции.

ISBN 978-5-6044977-3-9



© Коллектив авторов, 2020

**Попов А.А.^{1*}, Гаврилов Н.М.¹, Аммосов П.П.², Гаврильева Г.А.²,
Колтовской И.И.²**

**Внутренние гравитационные волны в области мезопаузы
по измерениям ночной эмиссии гидроксила вблизи Якутска**

¹Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Санкт-Петербургский государственный университет», Кафедра физики атмосферы,
Россия, 199034, Санкт-Петербург, Университетская наб., д. 7–9
*E-mail: Andrew.popovix@gmail.com

²Институт космических исследований и аэронавтики им. Ю.Г.Шафера
Сибирского отделения Российской академии наук,
Россия, 677027, Якутск, пр. Ленина, 31

Метод цифровых разностных фильтров применен для анализа данных наземных наблюдений вращательной температуры ночного свечения гидроксила (ОН) на высотах 85–90 км спектрометром СП-50 вблизи Якутска (63° с. ш. 130° в. д.) в 1999–2015 гг. Исследованы сезонные и межгодовые изменения среднемесячных значений и дисперсий вариаций температуры с периодами 0.7–11 ч. Эти вариации могут быть связаны с внутренними гравитационными волнами в области мезопаузы. Среднемесячная температура вблизи мезопаузы имеет максимум зимой и минимум летом. Многолетние тренды соответствуют периодическим изменениям интенсивности мезомасштабных возмущений вблизи мезопаузы. Особенности сезонных и долговременных изменений в Якутске могут быть связаны со сложной системой фотохимических процессов, приводящих к ночному свечению ОН.

Ключевые слова: верхняя атмосфера, ночное свечение, гидроксил, вращательная температура, климатология, сезонные вариации, тренды, мезомасштабная изменчивость, внутренние гравитационные волны.

**Popov A.A.^{1*}, Gavrilov N.M.¹, Ammosov P.P.², Gavrilyeva G.A.²,
Koltovskoi I.I.²**

**Internal gravity waves near the mesopause according to measurements
of the night hydroxyl emission near Yakutsk**

¹Saint-Petersburg State University, Atmospheric Physics Department,
Russia, 199034, Saint-Petersburg, 7-9 Universitetskaya Embarkment
*E-mail: Andrew.popovix@gmail.com

²Yu.G.Shafer Institute of Cosmophysical Research and Aeronomy
of Syberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
Russia, 677027, Yakutsk, 31 Lenin Ave

A method of digital filtering is applied to analyze data of ground-based nightglow observations of hydroxyl (OH) rotational temperature at altitudes 85–90 km with the SP-50 spectrometer near Yakutsk (63° N, 130° E) in years 1999–2015. Seasonal and interannual variations in monthly-mean values and standard deviations of perturbations with periods 0.7–11 h are studied. These perturbations could be connected with internal gravity waves in the mesopause region. Monthly-mean temperature near the mesopause has a maximum in winter and a minimum in summer. Multi-year trends correspond to periodical changes in the mesoscale disturbance intensity near the mesopause. Peculiarities of seasonal and long-term variations at Yakutsk could be connected with a complex system of photochemical processes leading to the OH nightglow.

Keywords: upper atmosphere, nightglow, hydroxyl, rotational temperature, climatology, seasonal variations, trends, mesoscale variability, internal gravity waves.

Введение

В настоящее время большое внимание уделяется исследованию внутренних гравитационных волн (ВГВ) в средней и верхней атмосфере. Их источники находятся, в основном, в нижних слоях атмосферы. Распространяясь вверх, ВГВ способны переносить энергию и импульс в среднюю и верхнюю атмосферу, оказывая таким образом влияние на термодинамические процессы на всех высотах атмосферы. Измерение интенсивности и вращательной температуры свечений ночного неба является одним из способов мониторинга термодинамического режима и состава верхней атмосферы.

Распространяясь через слой ночной эмиссии верхней атмосферы, ВГВ модулируют температуру и яркость излучения [1]. Когерентные волнообразные структуры были обнаружены в слоях излучения ОН, Na, O и O₂ в интервале высот 80–100 км, начиная с [2]. В ряде работ исследовались долговременные изменения интенсивности ВГВ в верхней атмосфере. В исследовании [3] сделан статистический анализ средне- и крупномасштабных ВГВ с периодами 0.5–5 h и длинами волн 100–1700 км в слоях излучения ОН и O₂ в 1998–2001 гг. Исследовалась межгодовая и сезонная изменчивость температуры области мезопаузы по данным спектральных наблюдений гидроксильного излучения в Звенигороде и Иркутске в 2000–2010 гг. [4]. В работе [5] изучена изменчивость характеристик области мезопаузы во время внезапных стратосферных потеплений. Исследования последних лет выявили наличие многолетних изменений характеристик верхней атмосферы [6]. В [7] анализировались изменения интенсивности и вращательной температуры ночной эмиссии ОН под действием атмосферных приливов.

В [8] были применены простые разностные фильтры и проанализированы сезонные и межгодовые изменения интенсивности ВГВ на высотах 80–100 км по наблюдениям дрейфов метеорных следов и ионосферных неоднородностей. Авторы [9] использовали метод цифровой разностной фильтрации для анализа измерений прибором SATI интенсивности и вращательной температуры ОН в Алма-Ате (43° с.ш., 77° в.д.) в 2010–2017 гг. Они изучили сезонные и межгодовые изменения среднемесячных значений и дисперсий мезомасштабных возмущений с периодами 0.4–5.4 ч.

В данной работе метод цифровых разностных фильтров применен для анализа данных спектральных измерений вращательной температуры ОН на высотах 85–90 км на станции Маймага (63° с.ш., 130° в.д.) в 1999–2015 гг. Анализируются сезонные и межгодовые изменения средней температуры и интенсивности мезомасштабных вариаций с периодами 0.8–11 ч, которые могут быть связаны с ВГВ в области мезопаузы.

Прибор и метод анализа данных

Данные о ночном свечении гидроксила на высотах 85–90 км в 1999–2015 гг. были получены в Лаборатории оптики атмосферы Института космических исследований и аэронавтики им. Ю.Г. Шафера СО РАН на станции Маймага (63° с.ш., 130° в.д.) в 120 км к северу от Якутска. Измерения проводились при помощи инфракрасного цифрового спектрографа (ИЦС) [10] на основе дифракционного спектрографа СП-50 [1] и регистратора в виде ПЗС камеры ST-6. ИЦС регистрирует Р-ветви полосы излучения ОН(6,2) на высоте ~87 км с разрешением ~0.8 нм. Прибор имеет угол зрения 9° и зенитный угол наклона центральной оси 49° в западном направлении [10]. Для получения достаточного отношения сигнал/шум время регистрации индивидуальных спектров составляла 10 мин. Это обеспечивало, в среднем, 70–80 измерений в течение безлунной безоблачной ночи. Метод определения вращательной температуры ОН по спектрам, регистрируемым ИЦС, описан в [10].

Для оценки интенсивности мезомасштабных возмущений в области мезопаузы применен метод, описанный в [8]. Использована численная фильтрация путем вычисления разностей между парами регистрируемых 10-минутных значений вращательной температуры ОН, T , разделенными интервалами Δt :

$$T'(t) = [T(t + \Delta t) - T(t)]/2, (1)$$

Полоса пропускания частотного фильтра (1) аналогична рассмотренной в [8, 9]. В настоящем исследовании использованы разностные фильтры (1) со значениями $\Delta t = 0.5$ ч, $\Delta t = 1$ ч и $\Delta t = 0.5$ ч. Согласно [9], максимумы пропускания этих фильтров соответствуют периодам возмущений $\tau_m \approx 1.3$ ч, $\tau_m \approx 2.7$ ч и $\tau_m \approx 5.4$ ч. Учитывая полуширины функций пропускания на уровне 0.5 от максимума (см. [9]), совокупность указанных фильтров покрывает спектральный интервал периодов 0.7 – 11 ч.

Для каждого календарного месяца наблюдений вычислялись среднее значение вращательной температуры ОН, T_0 , и дисперсии $\overline{T'^2}$ разностей (1) для указанных выше интервалов Δt . Одной из причин мезомасштабных вариаций ночных свечений могут быть ВГВ, распространяющиеся в светящемся слое верхней атмосферы. Поляризационные соотношения теории атмосферных ВГВ [11] позволяют получить

следующие формулы для связи дисперсии волновых вариаций горизонтальной скорости U и потенциальной волновой энергии E_p с мезомасштабной дисперсией и средним значением температуры:

$$U = \frac{g}{N} \sqrt{\frac{T'^2}{T_0^2}}; \quad E_p = \frac{g^2}{2N^2} \frac{\overline{T'^2}}{T_0^2}, \quad (2)$$

где g – ускорение свободного падения, N – частота Брента-Вейсяля, T_0 – среднемесячная температура.

Изменчивость вращательной температуры ОН

Методом, описанным в п. 2 были обработаны данные о ночном свечении полосы ОН(6-2) на высотах 85–90 км на станции Маймага в 1999–2015 гг. На рис. 1 показаны средние за 1999–2015 гг. сезонные вариации среднемесячных значений и относительных дисперсий вращательной температуры ОН вблизи мезопаузы, а также параметров ВГВ (2) на станции Маймага.

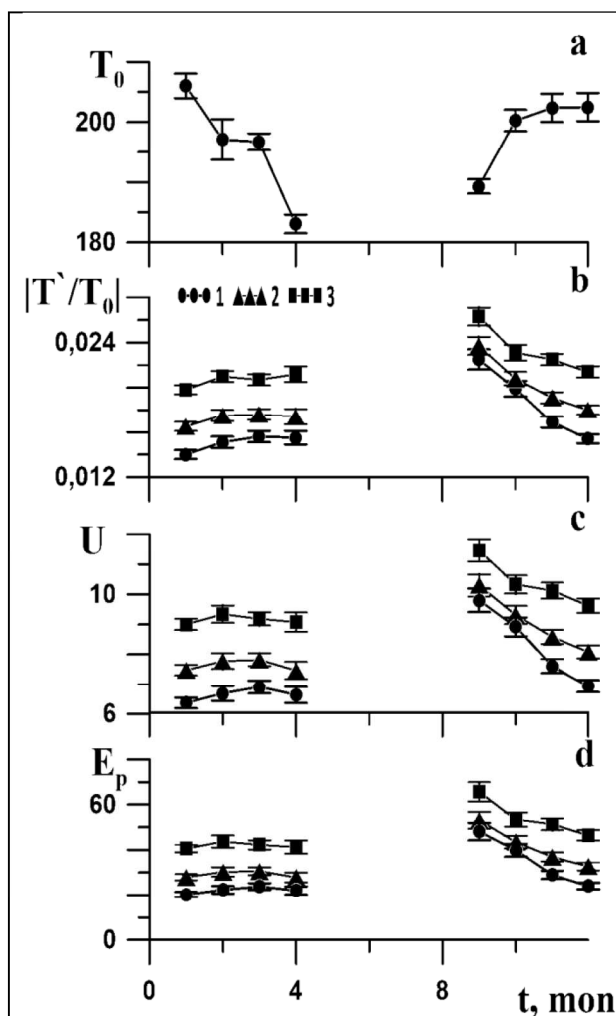


Рис. 1. Усредненные по интервалу наблюдений 1999–2015 гг. сезонные вариации среднемесячной температуры ОН в К (а), относительных дисперсий разностей температур (b), дисперсий горизонтальной скорости в м/с (с) и удельной потенциальной энергии в Дж/кг (d) для фильтров (1) с $\Delta t = 0.5$ ч (1), $\Delta t = 1$ ч (2), $\Delta t = 2$ ч (3)

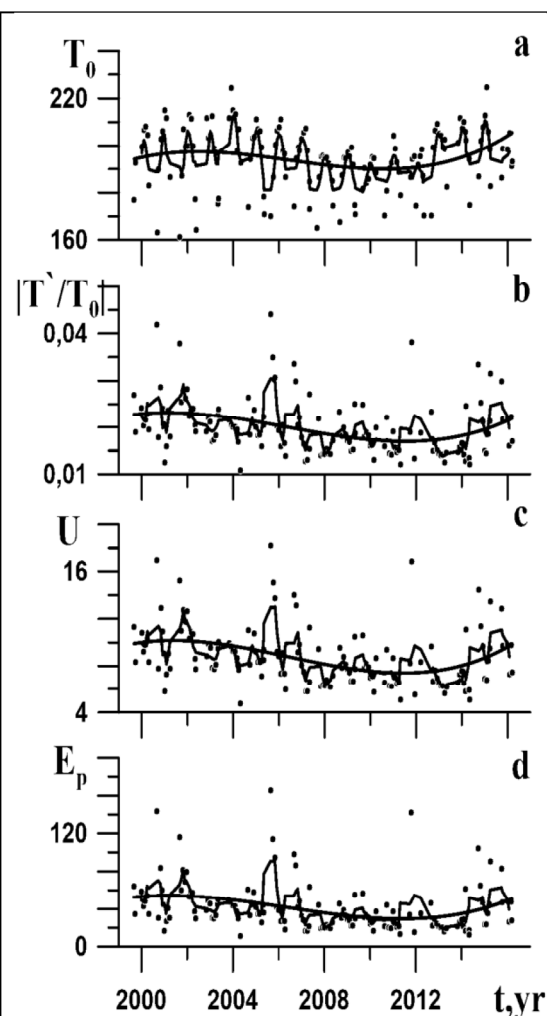


Рис. 2. Изменения среднемесячных температур ОН в К (а), относительных дисперсий температуры (b), дисперсий горизонтальной скорости в м/с (с) и удельной потенциальной энергии в Дж/кг (d) для $\Delta t = 1$ ч. Линии соответствуют 7-месячному бегущему среднему и кубичной полиномиальной аппроксимации

Измерения летом не производятся из-за светлых ночей в высоких широтах. Сезонные изменения средней температуры на рис. 1а имеют максимум зимой и минимум в летние месяцы. Полную картину сезонных вариаций дисперсий мезомасштабных возмущений температуры, ветра и потенциальной энергии на рис. 1 восстановить трудно из-за отсутствия летних измерений.

На рис. 2а представлены долгосрочные изменения среднемесячных вращательных температур ОН на станции Маймага. Тонкие линии на рис. 2 соответствуют кубическим полиномиальным аппроксимациям. Средняя температура в области мезопаузы на рис. 2а испытывает сезонные вариации, соответствующие рис. 1а. Линии регрессии на рис. 2а показывают долгосрочные межгодовые изменения. Они содержат климатические тренды температуры на высотах 85–90 километров, изучавшиеся по многолетним наземным и спутниковым наблюдениям (например, [6]), на которые накладываются возмущения из-за изменений солнечной активности и других местных атмосферных процессов, которые могут по-разному изменять температуру в разные годы. Представляется, что продолжительность анализируемых измерений в Маймаге в настоящее время недостаточна для надежных оценок климатических трендов температуры в области мезопаузы.

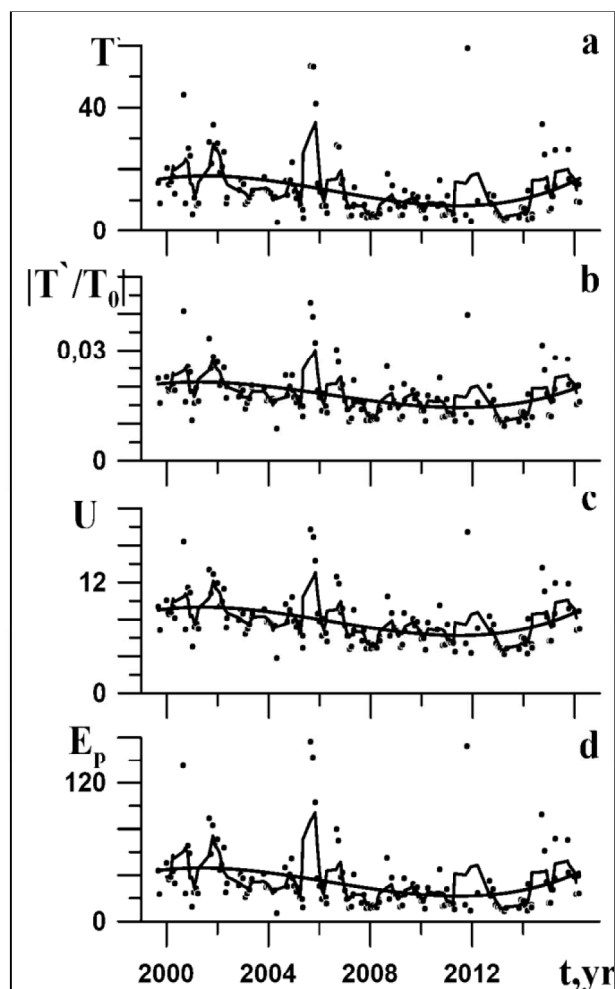


Рис. 3. То же, что на рис. 2, но для фильтра с $\Delta t = 0.5$ ч. На рис. (а) приведена абсолютная дисперсия возмущений вращательной температуры ОН в К

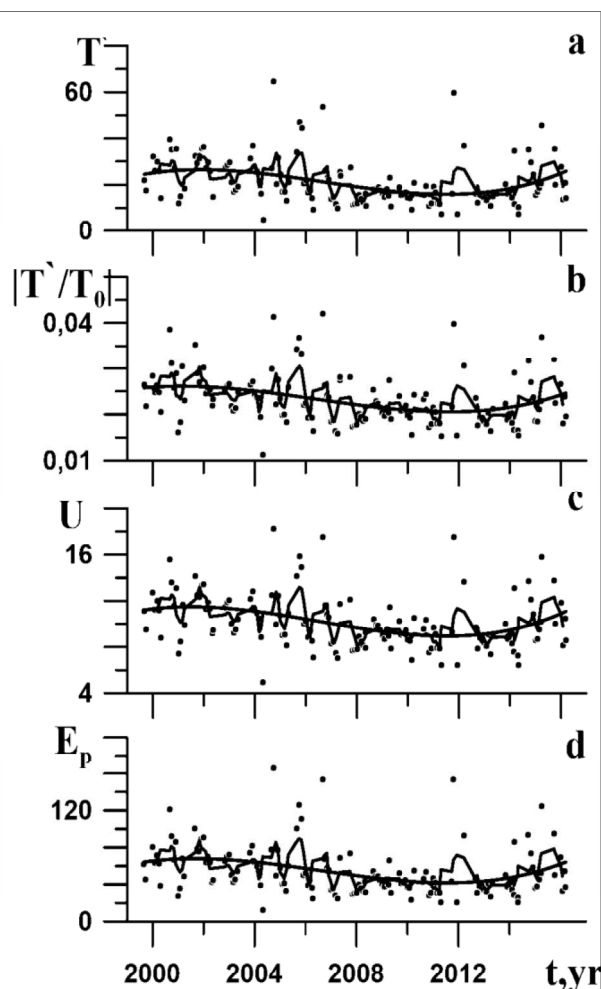


Рис. 4. То же, что на рис. 2, но для фильтра с $\Delta t = 2$ ч. На рис. (а) приведена абсолютная дисперсия возмущений вращательной температуры ОН в К

Дисперсия мезомасштабных возмущений температуры с периодами 1.7–5.6 h и характеристики ВГВ на рис. 2 уменьшаются до минимума в 2010–2012 гг., а затем возрастают. Это поведение соответствует росту таких же величин в Алма-Ате после 2011 г, зарегистрированному в [10].

Рис. 3 и 4 показывают межгодовые изменения мезомасштабных дисперсий вращательной температуры ОН и характеристик ВГВ, аналогичные рис. 2, но для разностных фильтров (1) с $\Delta t = 0.5$ ч и $\Delta t = 2$ ч, соответственно. Сравнения соответствующих панелей рис. 2–4 показывают подобные изменения анализируемых характеристик во всех частях спектра ВГВ с большим размахом межгодовых изменений для более короткопериодных составляющих с $\Delta t = 0.5$ ч на рис. 3. Эти различия могут быть связаны с различиями в источниках и условиях распространения атмосферных волн различных периодов. Кроме того, составляющие с большими периодами (фильтр (1) с $\Delta t = 2$ ч) могут содержать вклад от полусуточного прилива и его высокочастотных гармоник.

Сезонные изменения интенсивности мезомасштабных возмущений на станции Маймага, показанные на рис. 1 не противоречат сезонным вариациям тех же величин в Алма-Ате, которые имеют максимумы весной и летом [10]. Авторы [11] разработали численную модель спектра гармоник ВГВ, распространяющихся в верхнюю атмосферу от случайных источников, распределенных в атмосфере. Они применили эту модель для того, чтобы объяснить сезонные изменения амплитуд ВГВ на разных высотах. Было показано, что различия сезонных вариаций могут быть вызваны изменениями вертикальных профилей средних температуры и ветра, которые влияют на диссипацию и распространение ВГВ, а также могут влиять на интенсивность атмосферных источников волн. В частности, может изменяться генерация ВГВ гидродинамическими источниками внутри верхне-тропосферного и страто-мезосферного струйных течений.

Тропосферный средний ветер направлен на восток во все сезоны. Ветры в стратосфере и мезосфере изменяют направление на противоположное летом. Следовательно, возбуждение в тропосфере волн восточного направления изменяет пропорцию слабо затухающих ВГВ, распространяющихся навстречу среднему ветру в летней стратосфере и мезосфере в разные сезоны. Кроме того, изменяющиеся ветры, существующие в стратосфере и мезосфере, летом могут изменять интенсивность источников ВГВ в средней атмосфере [11], которая может способствовать образованию максимумов интенсивности ВГВ в нижней термосфере в различные сезоны.

Полученные выше результаты показывают, что долговременные изменения интенсивности ВГВ могут различаться в разные годы. Эти изменения могут отражать изменения средних ветров и температуры в средней атмосфере. Поэтому, многолетние оптические и радарные наблюдения необходимы для непрерывного мониторинга изменений в мезосфере и нижней термосфере.

Заключение

В настоящем исследовании метод цифровых разностных фильтров (1) применен для анализа данных наблюдений вращательной температуры гидроксильного излучения на высотах 85–90 км на станции Маймага вблизи Якутска с применением ИЦС на основе спектрографа СП-50. Исследованы сезонные и межгодовые изменения среднемесячной температуры и дисперсии вариаций с периодами 0.7–11 ч., которые могут быть связаны с ВГВ в области мезопаузы. Для выделения вариаций с часовыми периодами использована численная фильтрация путем вычисления разностей (1) между значениями измеренных вращательных температур ОН, разделенными интервалом времени Δt . С использованием поляризационных соотношений теории ВГВ получены оценки дисперсии колебаний горизонтальной скорости и удельной потенциальной энергии мезомасштабных вариаций для каждого календарного месяца наблюдений ночного свечения ОН. Средние сезонные вариации мезомасштабных дисперсий температуры и характеристик ВГВ имеют максимумы зимой и летом.

Анализ данных наблюдений ночного свечения ОН поддержан Российским фондом фундаментальных исследований по гранту № 19-35-90130. Используются данные ресурсного центра СПбГУ «Геомодель».

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Шефов Н.Н., Семенов А.И., Хомич В.Ю. Излучение верхней атмосферы — индикатор ее структуры и динамики. / М.: ГЕОС, 2006. 741 с.
- [2] Krassovski V.I. Infrasonic variations of OH emission in the upper atmosphere // *Annales de Géophysique*. 1972. V. 28. P. 739–746.
- [3] Gavrilov N.M., Shiokawa K., Ogawa T. Seasonal variations of medium-scale gravity wave parameters in the lower thermosphere obtained from SATE observations at Shigaraki, Japan // *J. Geophys. Res.* 2002b. V. 107. N D24. P. 4755.
- [4] Перминов В.И., Семенов А.И., Медведева И.В. и др. Изменчивость температуры в области мезопаузы по наблюдениям гидроксильного излучения на средних широтах // *Геоматизм и аэрономия*. 2014. Т. 54, № 2. С. 246–256. DOI: 10.1134/S0016793214020157.
- [5] Перцев Н.Н., Андреев А.Б., Мерзляков Е.Г. и др. Мезо-сферно-термосферные проявления стратосферных потеплений: совместное использование спутниковых и наземных измерений // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2013. Т. 10. № 1. С. 93–100.
- [6] Lastovichka J. A review of recent progress in trends in the upper atmosphere // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. 2017. V. 163. P. 2–13.

- [7] Гаврильева Г.А., Аммосов П.П., Колтовской И.И. По-лусуточный термический прилив в области мезопаузы над Якутией // Геомагнетизм и аэрономия. 2009. Т. 49. №. 1. С. 117–122. DOI: 10.1134/S0016793209010150.
- [8] Gavrilov N.M., Jacobi Ch., Kurschner D. Climatology of ionospheric drift perturbations at Collm, Germany // Adv. Space Res. 2001. V. 27. N 10. P. 1779–1784.
- [9] Попов А.А., Гаврилов Н.М., Андреев А.Б., Погорельцев А.И. Междугодовые изменения интенсивности мезомасштабных вариаций ночного свечения гидроксила в Алма-Ате // Солнечно-земная физика. 2018. Т. 4. №. 2. С. 102–108. DOI: 10.12737/szf-42201810.
- [10] Колтовской И.И. Исследование волновых процессов в области высокоширотной мезопаузы по излучению молекул гидроксила и кислорода. /Автореферат кандидатской диссертации. Якутск. 2017. 16с.
- [11] Госсард Э.Э., Хук У.Х. Волны в атмосфере. / М.: Мир, 1978. 532 с.
- [12] Gavrilov N.M., Fukao S., Nakamura T., et al. Comparative study of interannual changes of the mean winds and gravity wave activity in the middle atmosphere over Japan, Central Europe and Canada // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. 2002a. V. 64 P. 1003–1010.