
СРАВНЕНИЕ СЕЗОННЫХ ВАРИАЦИЙ АКТИВНОСТИ ПРИЛИВНЫХ И ВНУТРЕННИХ ГРАВИТАЦИОННЫХ ВОЛН ПО НАБЛЮДЕНИЯМ НА СТАНЦИЯХ МАЙМАГА И ТИКСИ

COMPARISON BETWEEN SEASONAL VARIATIONS IN TIDAL AND INTERNAL GRAVITY WAVE ACTIVITY AS DERIVED FROM OBSERVATIONS AT MAIMAGA AND TIKSI

В.И. Сивцева

*Институт космофизических исследований и аэронауки
им. Ю.Г. Шафера СО РАН,
Якутск, Россия, verasivtseva@gmail.com*

П.П. Аммосов

*Институт космофизических исследований и аэронауки
им. Ю.Г. Шафера СО РАН,
Якутск, Россия, ammosov@ikfia.ysn.ru*

Г.А. Гаврильева

*Институт космофизических исследований и аэронауки
им. Ю.Г. Шафера СО РАН,
Якутск, Россия, gagavrilyeva@mail.ru*

И.И. Колтовской

*Институт космофизических исследований и аэронауки
им. Ю.Г. Шафера СО РАН,
Якутск, Россия, koltigor@mail.ru*

А.М. Аммосова

*Институт космофизических исследований и аэронауки
им. Ю.Г. Шафера СО РАН,
Якутск, Россия, ammosovaam@mail.ru*

V.I. Sivtseva

*Yu.G. Shafer Institute of Cosmophysical Research
and Aeronomy SB RAS,
Yakutsk, Россия, verasivtseva@gmail.com*

P.P. Ammosov

*Yu.G. Shafer Institute of Cosmophysical Research
and Aeronomy SB RAS,
Yakutsk, Россия, ammosov@ikfia.ysn.ru*

G.A. Gavriilyeva

*Yu.G. Shafer Institute of Cosmophysical Research
and Aeronomy SB RAS,
Yakutsk, Россия, gagavrilyeva@mail.ru*

I.I. Koltovskoi

*Yu.G. Shafer Institute of Cosmophysical Research
and Aeronomy SB RAS,
Yakutsk, Россия, koltigor@mail.ru*

A.M. Ammosova

*Yu.G. Shafer Institute of Cosmophysical Research
and Aeronomy SB RAS,
Yakutsk, Россия, ammosovaam@mail.ru*

Аннотация. С 2015 г. ведутся одновременные наблюдения температуры высокоширотной мезопаузы (87 км) на станциях Маймага (63.04° N, 129.51° E) и Тикси (71.58° N, 128.77° E). Регистрация спектров на обеих станциях осуществляется с помощью светочувствительных инфракрасных спектрографов Shamrock (Andor), регистрирующих полосу OH (3, 1) в ближней инфракрасной области (около 1.5 мкм). Исследуются данные по температуре, полученные за сезоны с 2015 по 2017 г. на станциях Маймага и Тикси. В качестве характеристики ночной волновой активности приняты стандартные отклонения σ температуры от ее средненочного значения. Выделены стандартные отклонения σ_{gw} температуры, соответствующие внутренним гравитационным волнам (ВГВ), и σ_{id} , соответствующие приливным волнам. В Тикси и Маймаге в течение двух сезонов одновременных наблюдений средненочные вращательные температуры гидроксила почти совпадают, а сезонные вариации гравитационных и приливных компонент подобны.

Ключевые слова: высокоширотная мезопауза, излучение гидроксила, внутренние гравитационные волны, приливные волны.

Abstract. Since 2015, simultaneous observations of temperature of the high-latitude mesopause (87 km) have been made at Maimaga (63.04° N, 129.51° E) and Tiksi (71.58° N, 128.77° E) stations. These stations record spectra with Shamrock (Andor) photosensitive infrared spectrographs detecting the OH (3, 1) band in the near-infrared region (about 1.5 μm). We analyze temperature data obtained in observation seasons from 2015 to 2017. Standard deviations of temperature σ from its mean values are taken as characteristics of wave activity at night. We have obtained standard temperature deviations corresponding to internal gravity waves (IGW) (σ_{gw}) and tidal waves (σ_{id}). Mean night rotational temperatures of hydroxyl emission almost coincide, and seasonal variations of gravity and tidal waves have a similar form during two seasons of simultaneous observations at Tiksi and Maimaga.

Ключевые слова: high-latitude mesopause, hydroxyl emission, internal gravity waves, tidal waves.

ВВЕДЕНИЕ

В последнее время мезопауза, являясь пограничной областью (80–100 км) между мезосферой и термосферой, где находится температурный минимум

атмосферы, вызывает все больший интерес к ее исследованию. Это связано с тем, что область мезопаузы активно взаимодействует с солнечным радиационным излучением, приходящим сверху, и с широ-

ким спектром волн, распространяющихся вверх из нижних слоев атмосферы [Брасье, Соломон, 1987].

Волновая активность вносит существенный вклад в температурный режим мезопаузы. Приливы обуславливают адиабатическое сжатие и расширение области мезопаузы, соответственно вызывая разогрев или охлаждение окружающей среды [Чепмен, Линдзен, 1972; Брасье, Соломон, 1987]. ВГВ, распространяясь вверх из нижних слоев атмосферы, осуществляют перенос импульса и энергии в мезосферу и термосферу. На высоте мезопаузы из-за ветрового сдвига ВГВ подвергаются спектральной фильтрации и поглощаются, вызывая разогрев в данной области [Hines, 1974]. Амплитуды ВГВ и приливных волн возрастает с высотой из-за уменьшения плотности атмосферы, благодаря чему появляется возможность их обнаружения в верхних слоях атмосферы.

На высотах мезосферы и нижней термосферы волновую активность исследуют как методом спутниковых измерений, так и с помощью наземных наблюдений. Наиболее распространенными и доступными среди наземных методов являются спектральные наблюдения эмиссии гидроксидов OH (3, 1), которые возбуждаются в области мезопаузы. По многочисленным ракетным измерениям известно, что эмиссионный слой находится на высоте ~87 км и имеет полуширину ~9 км [Baker, Stair, 1988]. Однако высота излучающего слоя в зависимости от сезона и прохождения волн через него может меняться [Takano et al., 1990; Yee et al., 1997; Zhang, Shepherd, 1999]. Вращательная температура, определяемая по распределению интенсивности в полосе гидроксидов (OH), является близкой к кинетической температуре нейтрального газа на высоте излучения [Шефов и др., 2006; Noll et al., 2015]. В настоящее время этот метод широко применяется в наблюдениях международной сети станций мониторинга состояния мезопаузы NDMC (Network for the Detection of Mesopause Change).

Большое количество исследований волновой активности на высоте мезопаузы по наблюдениям излучения гидроксидов проводилось на средних широтах [Offermann et al., 2011; Перминов и др., 2013; Perminov et al., 2014]. В то же время имеется недостаток подобных исследований на высоких широтах. Поэтому большой интерес представляют поведение температуры и волновая активность высокоширотной мезопаузы. В данной работе представлены исследования температуры и ее стандартных отклонений σ от средненочных значений в области мезопаузы по измерениям на высокоширотных станциях Маймага (63.04° N, 129.51° E) и Тикси (71.58° N, 128.77° E).

ПРИБОРЫ И МЕТОД ОБРАБОТКИ ДАННЫХ

Для регистрации полосы гидроксидов OH (3, 1) использовался светочувствительный инфракрасный спектрограф Shamrock SR-303i с рабочим диапазоном длин волн 1490–1544 нм (производство фирмы

Andor Technology Ltd), оснащенный высокочувствительным инфракрасным iDus InGaAs фотодиодным детектором DU490A-1.7. Спектрограф построен по принципу Черни — Тернера (Czerny — Turner), его фокусное расстояние равно 303 мм, разрешение при рабочей ширине входной щели 0.2 мм равно 0.8 нм, угол зрения ~14°. Спектрограф Shamrock SR-303i является специализированной и надежной платформой, предназначенной для регистрации слабых световых сигналов в ближней инфракрасной области.

Два идентичных спектрографа такого типа установлены на ст. Маймага (150 км севернее Якутска) и Тикси. На ст. Маймага прибор на постоянную регистрацию был установлен 17 января 2013 г., а на высокоширотной ст. Тикси — 3 сентября 2015 г. Для взаимной калибровки этих приборов были проведены одновременные наблюдения на ст. Маймага с 5 по 15 августа 2015 г. Разработанное нами программное обеспечение позволяет приборам работать полностью в автономном режиме.

Спектрографы регистрируют полосу излучения гидроксидов OH (3, 1) в ближней инфракрасной области (около 1.5 мкм) при угле погружения Солнца >9°. Регистрация этой полосы выгодна тем, что в данной области спектра эмиссия полярных сияний много меньше, а вклад паразитного света от Луны и звезд существенно уменьшается пропорционально $1/\lambda^4$ [Шефов и др., 2006]. В данной области также наблюдается наибольшая интенсивность эмиссии гидроксидов. Рабочая температура охлаждения камеры спектрографов выставлена на -50 °C для устранения температурного дрейфа темного тока и его уменьшения. В данных условиях спектрографы дают возможность измерять температуру мезопаузы с точностью ~2 К (ошибка рассчитывалась для каждого измерения отдельно).

Время экспозиции для получения одного измерения спектра гидроксидов в полосе OH (3, 1) равно 60 с. Короткая экспозиция не только значительно расширяет диапазон периодов исследуемых ВГВ, но и включает в рассматриваемый спектр акустические волны (периоды 3–5 мин). Для исключения акустических волн из рассмотрения проведено усреднение данных с шагом 3 мин.

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 [Аммосов, Гаврильева, 2000; Гаврильева, Аммосов, 2002]. Полоса OH (3, 1) достаточно хорошо термализируется, а определяемая по ней вращательная температура является близкой к кинетической температуре окружающей нейтральной атмосферы на высоте ее излучения. При оценке вращательной температуры по полосе гидроксидов были использованы вероятности по переходу, рассчитанные Mies [1974]. Существующие современные данные о вероятностях [van der Loo, Groenenboom, 2007; Goldman et al., 1998] позволяют более точно определять абсолютную температуру. В настоящей же работе важны относительные вариации температуры, а не ее абсолютные зна-

чения. С учетом этого для единообразия полученных результатов и возможности сравнения с другими работами по определению волновой активности (например, Offermann et al., 2011) были применены вероятности перехода [Mies, 1974]. Кроме того, коэффициенты Эйнштейна для низколежащих переходов ОН (3, 1) в различных данных о вероятностях слабо отличаются [Offermann et al., 2010].

В целях исключения данных с высоким уровнем шумовых помех производилась выборка спектров, удовлетворяющих соотношению сигнал/шум >20 , затем проводилось усреднение температуры с шагом 3 мин. В качестве характеристики ночной волновой активности принято стандартное отклонение σ температуры T_i от ее средненочного значения \bar{T} :

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

где n — число измеренных значений в течение ночи.

Это стандартное отклонение является суперпозицией различных волн, активных в ночное время суток, и шума темного тока детектора. Согласно работе Offermann et al. [2009], суперпозиция волн может быть представлена в виде

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

где σ_{td} , σ_{gw} , σ_{noise} — стандартные отклонения температуры, обусловленные приливными волнами, ВГВ и шумом темного тока детектора соответственно; σ_{noise} была рассчитана как средняя арифметическая ошибок каждого отдельного измерения за ночь. Из рассмотрения исключались планетарные волны, так как их временной масштаб много больше, чем одна ночь.

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

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

где f_{td} — сумма гармоник суточного прилива (периоды указаны в минутах); A_1 , A_2 , A_3 — амплитуды гармоник суточного прилива; φ_1 , φ_2 , φ_3 — фазовые сдвиги гармоник; t — время в минутах.

Результат вычитания из ночного температурного ряда суммы гармоник суточного прилива соответствует вкладу в температуру шума темного тока и распространения ВГВ. Отсюда, зная значение σ_{noise} , можно вычислить стандартное отклонение σ_{gw} .

РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ И ИХ АНАЛИЗ

Одновременные наблюдения с помощью спектрографов Shamrock на ст. Тикси и Маймага велись два полных сезона с 2015 по 2017 г. На рис. 1 показаны средненочные вращательные температуры гидроксила по наблюдениям на этих станциях. Значения средненочных температур полученные в течение имеющихся двух сезонов 2015–2017 гг. одновременных наблюдений совпадают с большой точностью.

Приливные составляющие стандартных отклонений температуры показаны на рис. 2. Черная и красная линии являются скользящим средним с окном усреднения 30 дней и представляют собой сезонный ход приливной компоненты σ_{td} для ст. Маймага и Тикси соответственно. Значения и сезонный ход приливной компоненты примерно совпадают для обеих станций. Сезонный ход приливной компоненты стандартных отклонений температуры σ_{td} варьирует от 2.5 до 5 К на протяжении всех сезонов наблюдений.

Стандартные отклонения температуры, соответствующие ВГВ, показаны на рис. 3, где линиями обозначены скользящие средние с окном усреднения 30 дней, представляющие сезонный ход гравитационной компоненты σ_{gw} . Значения σ_{gw} примерно совпадают в течение имеющихся двух сезонов 2015–2017 гг. наблюдений на ст. Тикси и Маймага. Сезонное изменение ВГВ-составляющей варьирует от 2 до 6.5 К. При сравнении рис. 1 и 3 виден сезонный ход ВГВ-компоненты стандартных температурных отклонений (рис. 3), визуально соответствующий сезонному ходу средненочной температуры (рис. 1). Для дальнейшего анализа рассматриваются относительные значения стандартных отклонений, т. е. значения отношений гравитационной и приливной составляющих к средненочной температуре ($\sigma_{\text{gw}}/\bar{T}$ и $\sigma_{\text{td}}/\bar{T}$).

Это позволяет правильное сравнивать значения стандартных отклонений, когда изменения температуры значительны в течение года. Относительные значения стандартных температурных отклонений показаны на рис. 4 и 5, где также наблюдаются близкие значения приливных и ВГВ-компонент стандартных отклонений температуры, полученных на ст. Маймага и Тикси в течение двух сезонов одновременных наблюдений.

В среднеширотной области наблюдения эмиссии гидроксила проводились на ст. Вупперталь (51° N, 7° E), Звенигород (55.7° N, 36.8° E) и Торы (52° N, 103° E). При сравнении средних стандартных отклонений температуры (σ_N), полученных в Вуппертале ([Offermann et al., 2011], рис. 10), с данными ($\sigma_{\text{td}}/\bar{T}$), полученными на ст. Торы ([Perminov et al., 2014], рис. 5, a), заметно подобие сезонных вариаций (формы) в летние и осенние месяцы. В особенности совпадает пик стандартных отклонений температуры в сентябре (240–270 дни года).

Более плавным сезонным ходом характеризуются относительные стандартные отклонения температуры $\sigma_{\text{gw}}/\bar{T}$, полученные в Звенигороде ([Perminov et al., 2014], рис. 5, c) и на ст. Маймага и Тикси (рис. 5). Значения $\sigma_{\text{gw}}/\bar{T}$ в Якутии примерно в два раза выше, чем в Звенигороде и, за исключением пика в сентябре, на ст. Торы. Это может быть связано с тем, что экспозиции, используемые для регистрации ОН-спектров в Звенигороде и на ст. Торы, являются продолжительными (10 мин) и, следовательно, регистрируются только волны с периодами более 30 мин. В настоящей работе анализируются температурные данные с

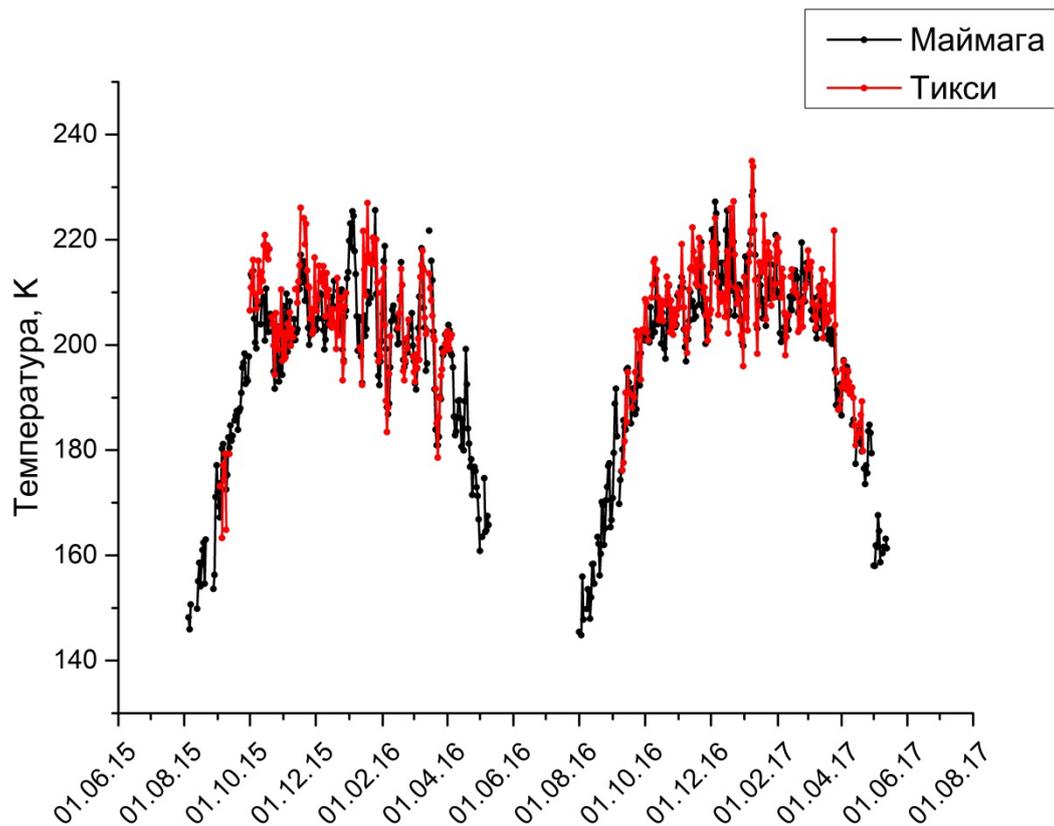


Рис. 1. Среднемесячные вращательные температуры гидроксила по наблюдениям на ст. Маймага и Тикси в течение 2015–2017 гг.

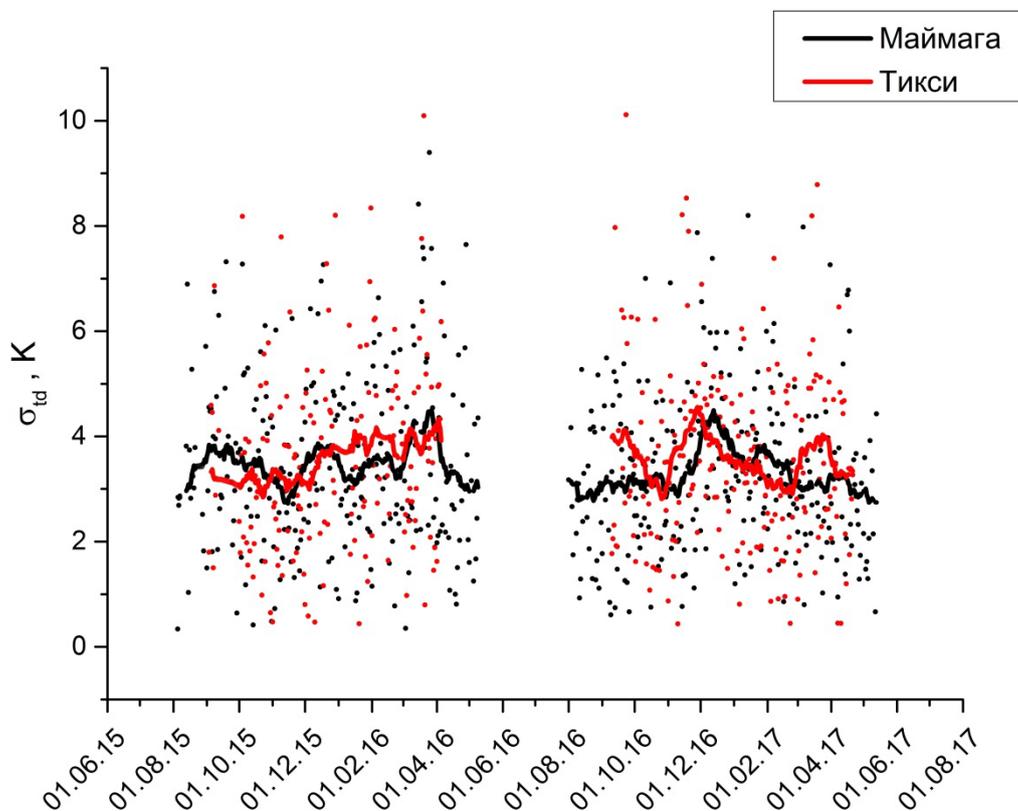


Рис. 2. Сезонные вариации приливной компоненты стандартных отклонений температуры, являющиеся скользящим средним с окном усреднения 30 дней. Измерения на ст. Маймага и Тикси показаны красным и черным цветом соответственно.

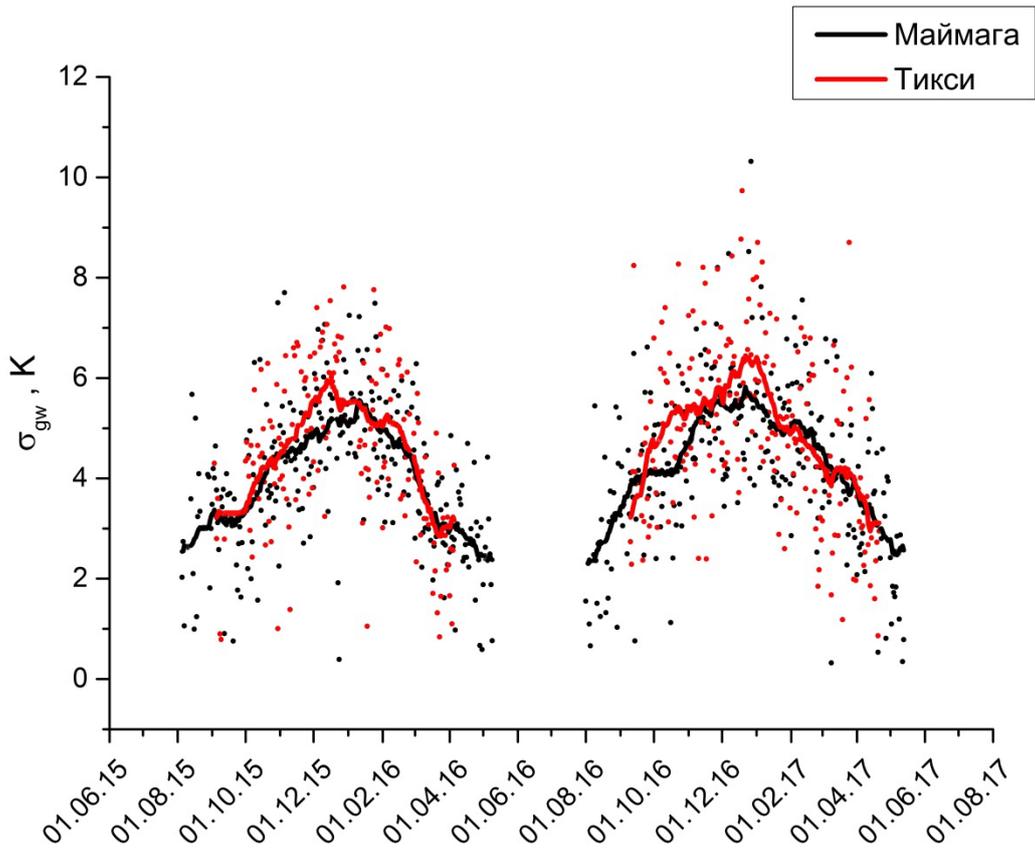


Рис. 3. Сезонные вариации ВГВ-компоненты стандартных отклонений температуры, являющиеся скользящим средним с окном усреднения 30 дней. Измерения на ст. Маймага и Тикси показаны красным и черным цветом соответственно

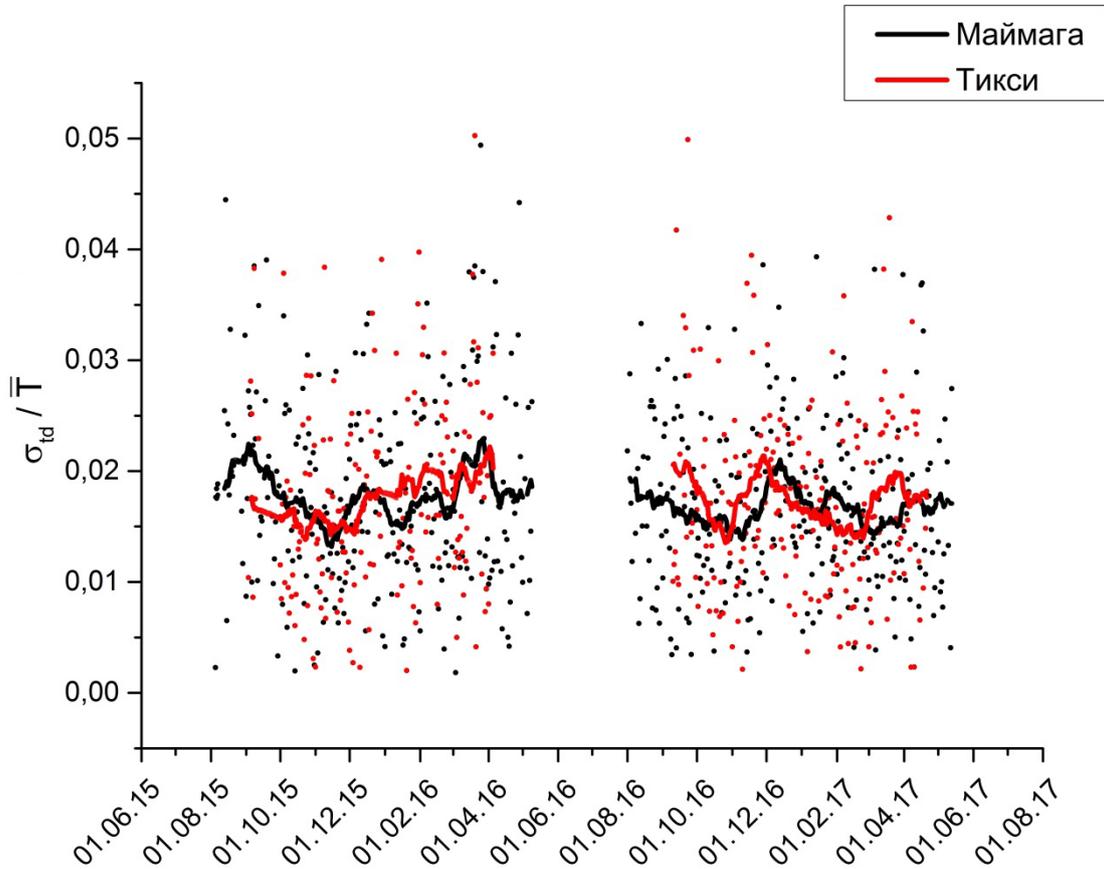


Рис. 4. Относительные стандартные температурные отклонения, вызванные приливами. Измерения на ст. Маймага и Тикси показаны красным и черным цветом соответственно

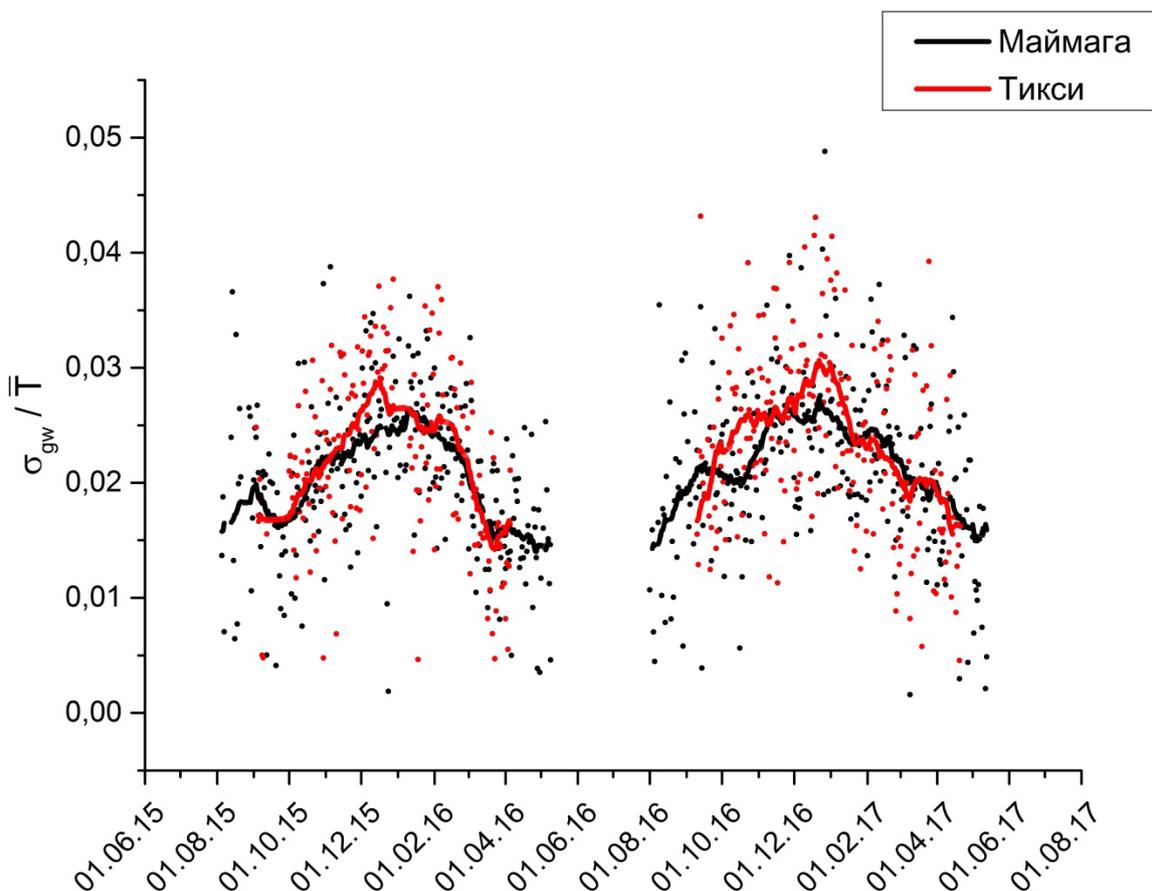


Рис. 5. Относительные стандартные температурные отклонения, вызванные ВГВ. Измерения на ст. Маймага и Тикси показаны красным и черным цветом соответственно

3-минутным усреднением, что позволяет регистрировать спектр волн с периодами 6 мин и более в ночное время. Относительные приливные компоненты стандартных отклонений температуры σ_{id} / \bar{T} , полученные в Звенигороде, на ст. Торы, Маймага и Тикси, очень близки по значению.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследованы стандартные отклонения σ среденочных температур в области мезопаузы (87 км) по измерениям на ст. Маймага и Тикси. Регистрация спектров на обеих станциях осуществляется с помощью одинаковых светочувствительных инфракрасных спектрографов Shamrock (производитель Andor Technology Ltd), регистрирующих полосу ОН (3, 1) в ближней инфракрасной области (~1.5 мкм). Были изучены данные за сезоны с 2015 по 2017 г., полученные со ст. Маймага и Тикси.

Выделены стандартные отклонения температуры, соответствующие внутренним гравитационным волнам (σ_{gw}) и приливным волнам (σ_{id}). Величины среденочных температур, приливных и ВГВ-компонент практически совпадают для имеющихся двух сезонов одновременных наблюдений на ст. Тикси и Маймага. Сезонные вариации стандартных отклонений, вызванных ВГВ и приливными волнами, полученные

в Маймаге и Тикси, сравнивались с результатами, полученными в Вуппертале, Звенигороде и на ст. Торы.

Работа выполнена при поддержке грантов НОФМУ №20170220219 и РФФИ №17-05-00855 А.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Брасье Г., Соломон С. Аэрномия средней атмосферы. Л.: Гидрометеиздат, 1987. 413 с. ISBN BBN 0342-БН2-190518-04
- Перминов В.И., Медведева И.В., Семенов А.И. Изменчивость температуры в области мезопаузы по среднеширотным измерениям гидроксильного излучения // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2013. Т. 10, № 1. С. 134–141.
- Чепмен С., Линдзен Р. Атмосферные приливы. М.: Мир, 1972. 295 с.
- Шефов Н.Н., Семенов А.И., Хомич В.Ю. Изучение верхней атмосферы — индикатор ее структуры и динамики. М.: ГЕОС, 2006. 741 с. ISBN 5-89118-330-7
- Ammosov P.P., Gavrilyeva G.A. Infrared digital spectrograph for measuring hydroxyl rotational temperature // Prib. Tekh. Eksp. 2000. V. 43, N 6. P. 73–78.
- Ammosov P.P., Gavrilyeva G.A. Infrared digital spectrograph for hydroxyl rotational temperature measurements // Instruments and Experimental Techniques. 2000. V. 43. P. 792–797.
- Baker D.J., Stair A.T., Jr. Rocket measurements of the altitude distributions of the hydroxyl airglow // Physica Scripta. 1988. V. 37. P. 611–622. DOI: [10.1088/0031-8949/37/4/021](https://doi.org/10.1088/0031-8949/37/4/021).

Gavrilyeva G.A., Ammosov P.P. Seasonal variation in the mesopause temperature over Yakutsk (63° N, 129.5° E) // *Geomagnetism and Aeronomy*. 2002. V. 42, N 2. P. 267–271.

Goldman A., Schoenfeld W.G., Goorvitch D., et al. Updated line parameters for OH X²Π-X²Π (v'', v') transitions // *J. of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*. 1998. V. 59. P. 453–469. DOI: [10.1016/S0022-4073\(97\)00112-X](https://doi.org/10.1016/S0022-4073(97)00112-X).

Hines C.O. The upper atmosphere in motion. AGU. Washington D.C., 1974. 1027 p. ISBN 0875900186.

Mies F.H. Calculated vibrational transition probabilities of OH(X²Π) // *J. Molecular Spectroscopy*. 1974. V. 53, N 2. P. 150–180. DOI: [10.1016/0022-2852\(74\)90125-8](https://doi.org/10.1016/0022-2852(74)90125-8).

Noll S., Kausch W., Kimeswenger S., et al. OH populations and temperatures from simultaneous spectroscopic observations of 25 bands // *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2015. V. 15. P. 3647–3669. DOI: [10.5194/acp-15-3647-2015](https://doi.org/10.5194/acp-15-3647-2015)

Offermann D., Gusev O., Donner M., et al. Relative intensities of middle atmosphere waves // *J. Geophys. Res.* 2009. V. 114. P. D06110. DOI: [10.1029/2008JD010662](https://doi.org/10.1029/2008JD010662).

Offermann D., Hoffmann P., Knieling P., et al. Long-term trends and solar cycle variations of mesospheric temperature and dynamics // *J. Geophys. Res.* 2010. V. 115. Iss. D18. CiteID D18127. DOI: [10.1029/2009JD013363](https://doi.org/10.1029/2009JD013363).

Offermann D., Wintel J., Kalicinsky C., et al. Long-term development of short-period gravity waves in middle Europe // *J. Geophys. Res.* 2011. V. 116. Iss. D4. P. D00P07. DOI: [10.1029/2010JD015544](https://doi.org/10.1029/2010JD015544).

Perminov V.I., Semenov A.I., Medvedeva I.V., Pertsev N.N. Temperature variations in the mesopause region according to the hydroxyl-emission observations at midlatitudes // *Geomagnetism and Aeronomy*. 2014. V. 54, N 2. P. 230–239. DOI: [10.1134/S0016793214020157](https://doi.org/10.1134/S0016793214020157).

Takano M., Watanabe T., Nakamura M. Rocket measurements of O₂ atmospheric (0-0) and OH Meinel bands in the night airglow // *J. Geomagn. Geoelectr.* 1990, V. 42. P. 1193–1208. DOI: [10.5636/jgg.42.1193](https://doi.org/10.5636/jgg.42.1193).

van der Loo M.P.J., Groenenboom G.C. Theoretical transition probabilities for the OH Meinel system // *J. Chem. Phys.* 2007. V. 126. P. 114314. DOI: [10.1063/1.2646859](https://doi.org/10.1063/1.2646859).

Yee J.H., Growley G., Roble R.G., et al. Global simulations and observations of O(¹S), O₂(¹Σ), and OH mesospheric nightglow emissions // *J. Geophys. Res.* 1997. V. 102. Iss. A9. P. 19949–19968. DOI: [10.1029/96JA01833](https://doi.org/10.1029/96JA01833).

Zhang S.P., Shepherd G.G. The influence of the diurnal tide on the O(¹S) and OH emission rates observed by WINDII on UARS // *Geophys. Res. Lett.* 1999. V. 26. Iss. 4. P. 529–532. DOI: [10.1029/1999GL900033](https://doi.org/10.1029/1999GL900033).

REFERENCES

Ammosov P.P., Gavrilyeva G.A. Infrared digital spectrograph for measuring hydroxyl rotational temperature. *Prib. Tekh. Eksp.* 2000, vol. 43, no. 6, pp. 73–78.

Ammosov P.P., Gavrilyeva G.A. Infrared digital spectrograph for hydroxyl rotational temperature measurements // *Instruments and Experimental Techniques*. 2000. V. 43. P. 792–797.

Baker D.J., Stair A.T. Rocket measurements of the altitude distributions of the hydroxyl airglow. *Physica Scripta*. 1988, vol. 37, pp. 611–622. DOI: [10.1088/0031-8949/37/4/021](https://doi.org/10.1088/0031-8949/37/4/021).

Brasseur G., Solomon S. *Aeronomy of the middle atmosphere*. Dordrecht–Boston–Lancaster, D. Reidel Pub. Co., 1984, 441 p. DOI: [10.1002/qj.49711146917](https://doi.org/10.1002/qj.49711146917).

Chapman S., Lindzen R. *Atmospheric tides*. D. Reidel Pub. Co. Dordrecht, 1970, 200 p.

Gavrilyeva G.A., Ammosov P.P. Seasonal variation in the mesopause temperature over Yakutsk (63°N, 129.5°E). *Geomagnetism and Aeronomy*. 2002, vol. 42, no. 2, pp. 267–271.

Goldman A., Schoenfeld W. G., Goorvitch D., Chackerian Jr.C., Dothe H., Mélen F., Abrams M.C., Selby J.E. A. Updated line parameters for OH X²Π-X²Π (v'', v') transitions. *J. of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*. 1998, vol. 59, pp. 453–469. DOI: [10.1016/S0022-4073\(97\)00112-X](https://doi.org/10.1016/S0022-4073(97)00112-X).

Hines C.O. The upper atmosphere in motion. AGU. Washington D.C., 1974. 1027 p. ISBN 0875900186.

Mies F.H. Calculated vibrational transition probabilities of OH(X²Π). *J. Molecular Spectroscopy*. 1974, vol. 53, no. 2, pp. 150–180. DOI: [10.1016/0022-2852\(74\)90125-8](https://doi.org/10.1016/0022-2852(74)90125-8).

Noll S., Kausch W., Kimeswenger S., Unterguggenberger S., Jones A. M. OH populations and temperatures from simultaneous spectroscopic observations of 25 bands. *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2015, vol. 15, pp. 3647–3669. DOI: [10.5194/acp-15-3647-2015](https://doi.org/10.5194/acp-15-3647-2015).

Offermann D., Gusev O., Donner M., Forbes J.M., Hagan M., Mlynczak M.G., Oberheide J., Preusse P., Schmidt H., Russell J.M. III. Relative intensities of middle atmosphere waves. *J. Geophys. Res.* 2009, vol. 114, p. D06110. DOI: [10.1029/2008JD010662](https://doi.org/10.1029/2008JD010662).

Offermann D., Hoffmann P., Knieling P., Koppmann R., Oberheide J. Long-term trends and solar cycle variations of mesospheric temperature and dynamics. *J. Geophys. Res.* 2010, vol. 115, iss. D18, CiteID D18127. DOI: [10.1029/2009JD013363](https://doi.org/10.1029/2009JD013363).

Offermann D., Wintel J., Kalicinsky C., Knieling P., Koppmann R., Steinbrecht W. Long-term development of short-period gravity waves in middle Europe. *J. Geophys. Res.* 2011, vol. 116, iss. D4, p. D00P07. DOI: [10.1029/2010JD015544](https://doi.org/10.1029/2010JD015544).

Perminov V.I., Medvedeva I.V., Semenov A.I. Temperature variability in the mesopause region from midlatitude measurements of the hydroxyl emission. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zernli iz kosmosa* [Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space]. 2013, vol. 10, no. 1, pp. 134–141. (In Russian).

Perminov V.I., Semenov A.I., Medvedeva I.V., Pertsev N.N. Temperature variations in the mesopause region according to the hydroxyl-emission observations at midlatitudes. *Geomagnetism and Aeronomy*. 2014, vol. 54, no. 2, pp. 230–239. DOI: [10.1134/S0016793214020157](https://doi.org/10.1134/S0016793214020157).

Shefov N.N., Semenov A.I., Khomich V.Yu. *Izuchenie verkhnnei atmosfery — indikator ee struktury i dinamiki* [Research into the upper atmosphere as an indicator of its structure and dynamics]. Moscow, GEOS Publ., 2006. 741 p. (In Russian).

Takano M., Watanabe T., Nakamura M. Rocket measurements of O₂ atmospheric (0-0) and OH Meinel bands in the night airglow. *J. Geomagn. Geoelectr.* 1990, vol. 42, pp. 1193–1208. DOI: [10.5636/jgg.42.1193](https://doi.org/10.5636/jgg.42.1193).

van der Loo M.P.J., Groenenboom G.C. Theoretical transition probabilities for the OH Meinel system. *J. Chem. Phys.* 2007, vol. 126, p. 114314. DOI: [10.1063/1.2646859](https://doi.org/10.1063/1.2646859).

Yee J.H., Growley G., Roble R.G., Skinner W.R., Burrage M.D., Hays P.B. Global simulations and observations of O(¹S), O₂(¹Σ), and OH mesospheric nightglow emissions. *J. Geophys. Res.* 1997, vol. 102, iss. A9, pp. 19949–19968. DOI: [10.1029/96JA01833](https://doi.org/10.1029/96JA01833).

Zhang S.P., Shepherd G.G. The influence of the diurnal tide on the O(¹S) and OH emission rates observed by WINDII on UARS. *Geophys. Res. Lett.* 1999, vol. 26, iss. 4, pp. 529–532. DOI: [10.1029/1999GL900033](https://doi.org/10.1029/1999GL900033).

Как цитировать эту статью

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/szf-42201811](https://doi.org/10.12737/szf-42201811).