

**ВОЛНОВАЯ АКТИВНОСТЬ МЕЗОСФЕРЫ
В ДИАПАЗОНЕ ПЛАНЕТАРНЫХ ВОЛН ПО НАБЛЮДЕНИЯМ ЭМИССИИ ОН (3-1)
НА СТАНЦИЯХ МАЙМАГА И ТИКСИ ЗА ПЕРИОД 2015–2020 гг.**

**WAVE ACTIVITY OF THE MESOSPHERE IN THE PLANETARY WAVE RANGE
ACCORDING TO OH (3-1) EMISSION OBSERVATIONS
AT MAIMAGA AND TIKSI STATIONS FOR 2015–2020**

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@ikfia.ysn.ru
Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия*

А.М. Аммосова 

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

И.И. Колтовской 

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

V.I. Sivtseva

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

P.P. Ammosov

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

G.A. Gavrilieva

*Yu.G. Shafer Institute of Cosmophysical Research
and Aeronomy SB RAS,
Yakutsk, Russia, gagavrilyeva@ikfia.ysn.ru
Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia*

A.M. Ammosova

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

I.I. Koltovskoi

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

Аннотация. В статье сравнивается межгодовая изменчивость атмосферы на высоте свечения гидроксидов ОН, которую можно связать с распространением планетарных волн, на разнесенных по широте станциях. В качестве характеристики, отражающей активность планетарных волн, рассматривается стандартное отклонение средней за ночь температуры в области мезопаузы σ_{pw} от ее среднемесячного значения после учета сезонного хода. Совместные измерения температуры в области мезопаузы на высоких широтах на оптических станциях Маймага (63.04° N, 129.51° E) и Тикси (71.58° N, 128.77° E) начались в 2015 г. На станциях установлены идентичные инфракрасные спектрографы с высоким качеством изображения Shamrock (Andor) для регистрации эмиссии ОН (3-1) в ближней инфракрасной области (~1.5 мкм). Основным результатом исследования активности планетарных волн в течение 5-летнего периода одновременных наблюдений является то, что активность планетарных волн на ст. Тикси несколько (примерно на 1–2 К) превышает активность волн на ст. Маймага. В колебаниях среднегодовой активности прослеживаются квазидвухлетние осцилляции.

Ключевые слова: планетарные волны, область мезопаузы, гидроксил.

Abstract. The article compares the interannual variability of the atmosphere at the OH glow height, which can be associated with planetary wave propagation, at stations spaced in latitude. As a characteristic reflecting planetary wave activity we consider standard deviations of the average overnight temperature σ_{pw} from its monthly average after taking into account the seasonal variation. Joint mesopause temperature measurements at high latitudes at two optical stations Maimaga (63.04° N, 129.51° E) and Tiksi (71.58° N, 128.77° E) began in 2015. The stations are equipped with identical Shamrock (Andor) high image quality infrared spectrographs for registration of OH (3-1) in the near infrared region (~1.5 μ m). The main result of studying the planetary wave activity during the 5-year period of simultaneous observations is that at Tiksi station it slightly (by about 1–2 K) exceeds that at Maimaga station. In average annual activity fluctuations, the presence of quasi-biennial oscillations is traced.

Keywords: planetary waves, mesopause region, hydroxyl.

ВВЕДЕНИЕ

Термином «планетарные волны» (ПВ) описывают волновые возмущения различных типов в атмосфере, имеющие глобальный, планетарный масштаб. Источниками их генерации могут быть неоднородности поверхности, контраст температур вследствие неоднородности нагревания суши и моря, лунные гравитационные приливы, крупномасштабные метеорологические возмущения и т. д. Доминирующими возмущениями в зимней стратосфере и мезосфере являются волны Россби, возбуждаемые в атмосфере в результате широтного градиента силы Кориолиса, уравнивающего изменение градиента давления [Smith, 2012; Yiğit, Medvedev, 2015]. Планетарные волны считаются важным движущим механизмом меридиональной атмосферной циркуляции [Holton et al., 1995], которая, в силу своего глобального характера, определяет динамическое взаимодействие различных слоев и областей атмосферы. Кроме того, опрокидывание планетарных волн, распространяющихся из тропосферы вверх, может вызвать развитие внезапного стратосферного потепления в зимний период [Matsuno, 1971; Schoeberl, 1978].

Имеются два типа ПВ: стационарные (или квазистационарные) и перемещающиеся. В нижней и средней атмосфере стационарные ПВ привязаны к определенному местоположению, и их проявления трудно отделить от фоновых значений измеряемых параметров при наземных наблюдениях верхней атмосферы. В обзорной работе [Smith, 2012] упомянуто, что амплитуда таких волн в области мезопаузы (~100 км) невелика. Таким образом, предполагается, что наблюдаемые с одной точки наземными приборами колебания параметров верхней атмосферы с периодами от нескольких дней до месяца можно отнести к перемещающимся ПВ.

В данной работе представлено исследование влияния ПВ на температуру атмосферы вблизи мезопаузы по наблюдениям вращательной температуры гидроксидной полосы ОН (3-1) в двух пунктах, расположенных примерно на одном меридиане, но разных по широте. В качестве показателя активности ПВ используется стандартное отклонение средней температуры после вычитания сезонной составляющей, определенной с помощью метода, предложенного в работах [Bittner et al., 2002; Offermann et al., 2009]. Такой подход отличается простотой вычисления, нечувствителен к требованию стационарности и линейности, нет необходимости вычислять для каждой конкретной волны период, амплитуду, фазу и зональное волновое число. Этот метод ранее был использован в работах [Perminov et al., 2014; Reisin et al., 2014].

ПРИБОР И МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ

Два спектрографа Shamrock установлены на ст. Маймага (63.04° N, 129.51° E) в 150 км к северу от Якутска и на высокоширотной станции Тикси (71.58° N, 128.77° E). Прибор на ст. Маймага ведет постоянную регистрацию с января 2013 г., а на ст. Тикси —

с сентября 2015 г. Для взаимной калибровки приборов были проведены одновременные наблюдения в течение 10 дней в августе 2015 г. Разработанное сотрудниками ИКФИА СО РАН программное обеспечение позволяет приборам работать полностью в автономном режиме.

Спектрографы регистрируют полосу гидроксидной ОН (3-1) в близкой инфракрасной области (около 1.5 мкм) при угле погружения Солнца >9°. В данной области спектра наблюдается наибольшая интенсивность эмиссии гидроксидной, а интенсивность эмиссии полярных сияний, напротив, значительно понижена, как и вклад паразитного света от Луны и звезд, который уменьшается существенно — в $1/\lambda^4$ раз [Шефов и др., 2006]. Рабочая температура охлаждения камер спектрографов выставлена на -50 °C для устранения температурного дрейфа темного тока, время экспозиции составляет 60 с. В данных условиях спектрографы дают возможность измерять температуру в области мезопаузы с точностью ~2 К (ошибка была рассчитана для каждого измерения отдельно).

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, Gavrilieva, 2000; Gavrilieva et al., 2021]. Полоса ОН (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 гидроксидной были использованы вероятности перехода, рассчитанные в работе [Mies, 1974].

РАСЧЕТ АКТИВНОСТИ ПЛАНЕТАРНЫХ ВОЛН НА РАЗНЫХ ШИРОТАХ

В качестве характеристики активности планетарных волн принято σ_{pw} — стандартное отклонение среденочной (после вычета сезонных вариаций f_{sv}) температуры T_{pw} в области мезопаузы от ее среднемесячного значения $T_{pw_month_av}$:

$$\sigma_{pw} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (T_{pw}^i - T_{pw_month_av})^2}{N-1}},$$

где N — количество измерений.

Для учета сезонного хода температуры из среденочного температурного ряда выделялись гармоники, соответствующие годовой, полугодовой и трехгодовой составляющим сезонного температурного хода:

$$f_{sv} = T_{year} + A_1 \cos\left(\frac{2\pi}{365}(t - \varphi_1)\right) + A_2 \cos\left(\frac{2\pi}{183}(t - \varphi_2)\right) + A_3 \cos\left(\frac{2\pi}{122}(t - \varphi_3)\right).$$

Здесь T_{year} — среднегодовая температура; A_1, A_2, A_3 — амплитуды годовых/сезонных гармоник; t — время

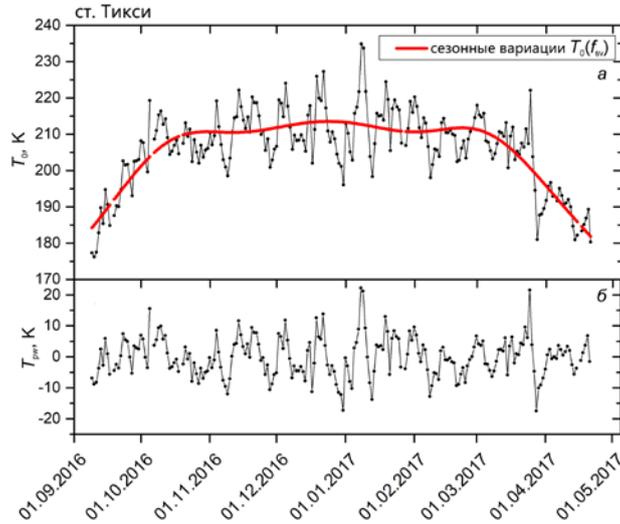


Рис. 1. Среднемесячная температура и сезонные вариации температуры в 2016–2017 гг. на ст. Тикси (а). Возмущения температуры после вычитания суммы гармоник сезонного хода (б)

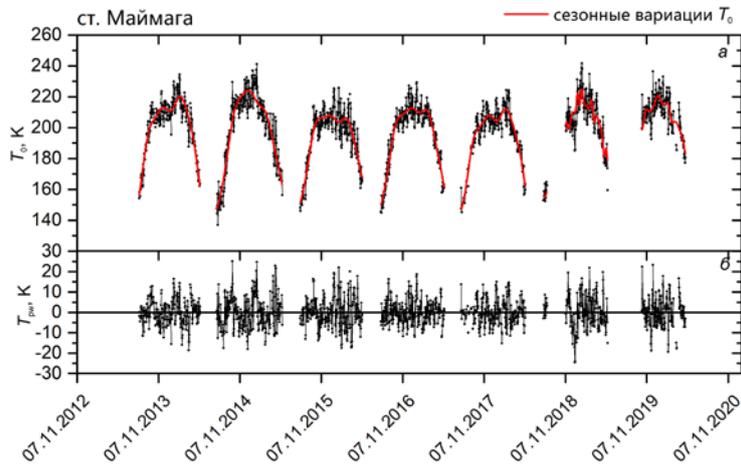


Рис. 2. Среднемесячная температура и сезонные вариации температуры в 2013–2020 гг. на ст. Маймага (а). Возмущения температуры после вычитания суммы гармоник сезонного хода (б)

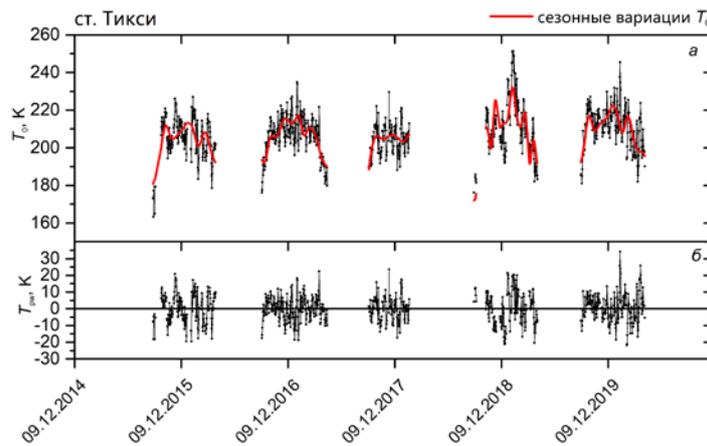


Рис. 3. Среднемесячная температура и сезонные вариации температуры в 2015–2020 гг. на ст. Тикси (а). Возмущения температуры после вычитания суммы гармоник сезонного хода (б)

(дата, день года); ϕ — соответствующий сдвиг по времени (поскольку фаза задана).

Результат вычитания из годового среднемесячного температурного ряда суммы гармоник сезонного хода соответствует, как было ранее принято, вкладу распространения планетарных волн в температуру (рис. 1).

На рис. 2 и 3 приведены результаты расчета сезонных вариаций и возмущений температуры, обусловленных распространением ПВ, для ст. Маймага и Тикси соответственно. Прослеживается довольно четкая картина сезонного хода температуры в области мезопазузы, измеренной на двух оптических станциях.

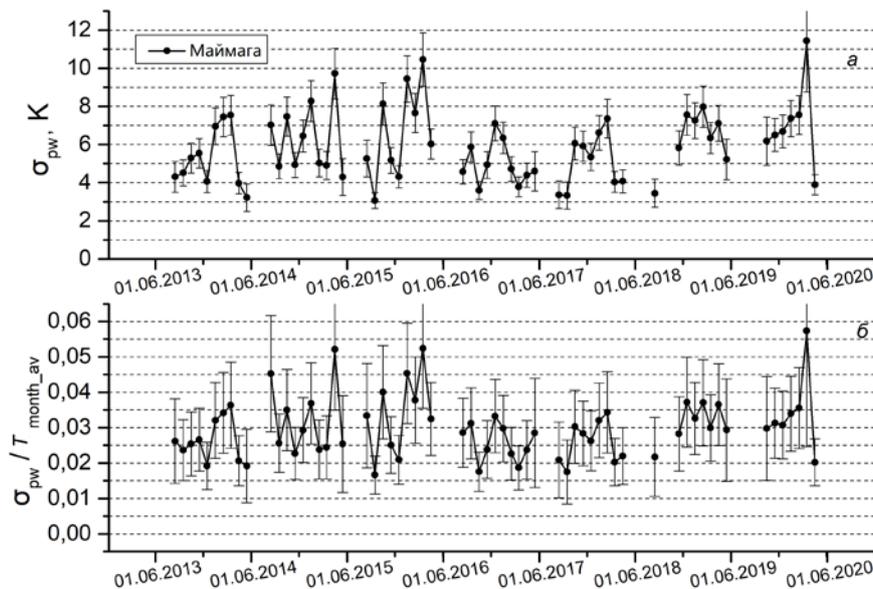


Рис. 4. Стандартные отклонения (а) и относительные стандартные отклонения температуры (б), обусловленные планетарными волнами (2013–2020 гг., ст. Маймага)

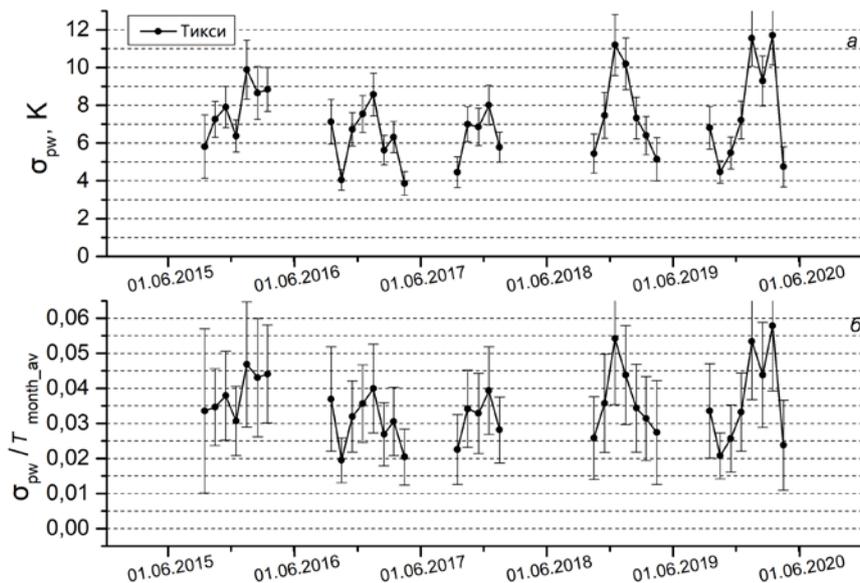


Рис. 5. Стандартные отклонения (а) и относительные стандартные отклонения температуры (б), обусловленные планетарными волнами (2015–2020 гг., ст. Тикси)

На рис. 4 и 5 показаны стандартные отклонения температуры σ_{pw} и относительные стандартные отклонения σ_{pw}/T_{month_av} от среднемесячных значений, принятые в качестве характеристик активности планетарных волн. Ошибки определяемого параметра изменчивости температуры (σ_{pw}) вычислялись по следующей формуле [Атмосфера: справочник, 1991; Perminov et al., 2014]: $\delta_{\sigma} = \frac{\sigma}{\sqrt{2(n-1)}}$ — ошибка определения стандартного отклонения, где n — количество элементов (измерений).

Относительные стандартные отклонения температуры σ_{pw}/T_{month_av} , полученные на ст. Маймага и Тикси, близки (~ 0.03) к значениям σ_{dd}/T_0 , полученным на ст. Звенигород [Perminov et al., 2014]. Для исследования межгодовой активности планетарных волн

рассчитывались стандартные отклонения σ_{pw_year} набора данных за один сезон без разделения по месяцам. Годовая активность σ_{pw_year} представляет собой среднее значение активности планетарных волн за один сезон наблюдений (промежуток с сентября по май каждого года). Годовая активность планетарных волн σ_{pw_year} для ст. Маймага и Тикси приведена на рис. 6. Годовая активность на ст. Тикси превышает активность на ст. Маймага на ~ 1.4 К в каждый отдельно взятый сезон соответственно. В сезоны 2014–2015 и 2018–2019 гг. наблюдаются максимумы годовой активности σ_{pw_year} для ст. Маймага. В сезон 2018–2019 гг. наблюдается также максимум годовой активности σ_{pw_year} и для ст. Тикси. На рис. 6 можно обнаружить тенденцию к квазидвухлетним колебаниям активности, синхронным для обеих станций.

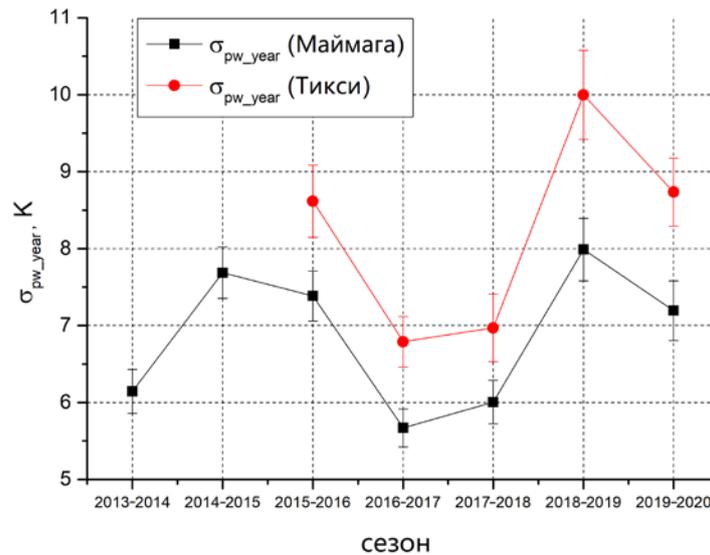


Рис. 6. Годовая активность планетарных волн σ_{pw_year} для ст. Маймага и Тикси (2013–2020 гг.)

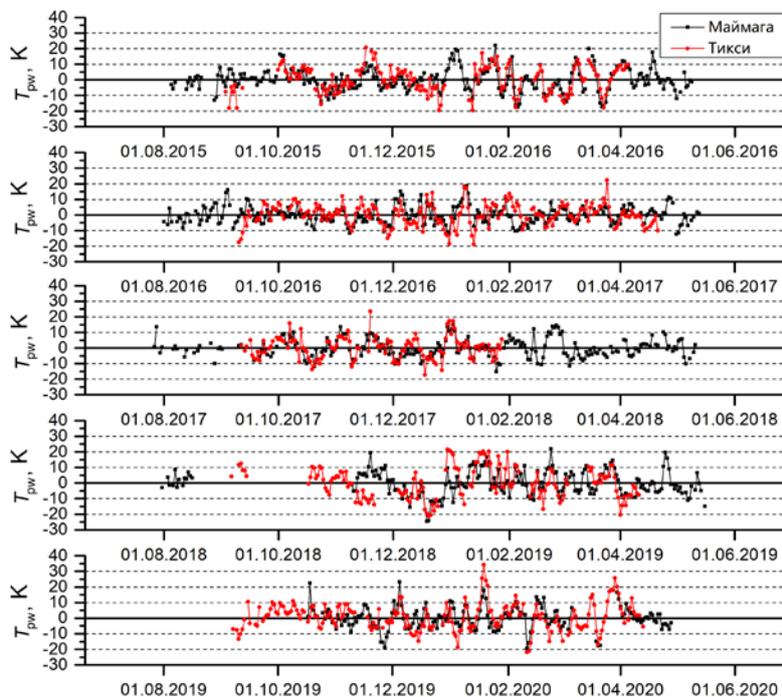


Рис. 7. Возмущения температуры после вычитания суммы гармоник сезонного хода на ст. Маймага и Тикси в 2015–2020 гг.

Такая же процедура, как при расчете σ_{pw} , но без разделения по месяцам используется для вычисления стандартного отклонения всего набора данных. Согласно [Reisin et al., 2014], полученная величина называется общим значением σ_{pw_total} (которое не совсем совпадает со средним арифметическим значением по отдельным значениям σ_{pw}) и, по сути, представляет собой среднее по всем доступным календарным месяцам значение активности планетарных волн.

Общая активность планетарных волн за весь период наблюдений σ_{pw_total} составляет 6.87 ± 0.12 К для ст. Маймага и 8.25 ± 0.20 К для ст. Тикси. В работе [Reisin et al., 2014] представлены по широте общие активности планетарных волн для различных станций по всему миру, при этом половина данных

попадает в узкий диапазон от 5.6 до 6.4 К. Однако это не исключает существования какого-либо широтного эффекта, поскольку все остальные высокоширотные станции (Halley (75.52° S; 26.72° W), Rothera (67.57° S; 68.13° W), Stockholm (59.5° N; 18.2° E), Maimaga (63.1° N; 127.1° E), Longyearbyen (78.15° N; 16.04° E)), согласно [Reisin et al., 2014], характеризуются значительно более высокой активностью планетарных волн — около 8 К и более. Обусловленные планетарными волнами возмущения средненочной вращательной температуры гидроксила после вычитания сезонного хода по наблюдениям на ст. Маймага и Тикси представлены на рис. 7.

Межсуточные колебания дисперсии σ_{pw} происходят на оптических станциях синхронно, а ее величина на ст. Тикси несколько (примерно на 1–2 К) больше,

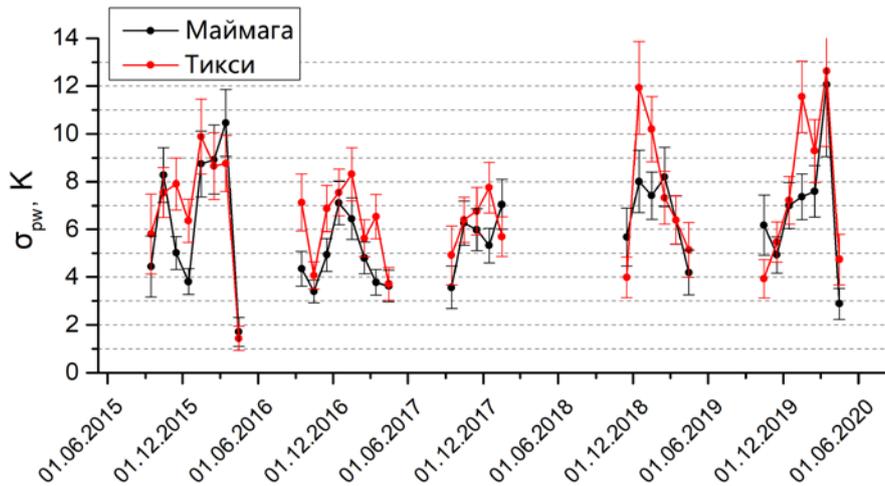


Рис. 8. Стандартные отклонения температуры, обусловленные планетарными волнами, в 2015–2020 гг. на ст. Маймага и Тикси

чем на ст. Маймага. То, что колебания σ_{pw} на станциях, расположенных примерно на одном меридиане, происходят почти одновременно, соответствует ожиданиям [Yigit, Medvedev, 2015] и свидетельствует о преимущественно зональном распространении планетарных волн с близкой фазовой скоростью. На рис. 8 представлена активность планетарных волн в 2015–2020 гг. по месяцам для дней, в которые проводились одновременные наблюдения. Активность ПВ на ст. Тикси на ~ 1.4 К превышает активность ПВ на ст. Маймага, т. е. активность планетарных волн выше на высоких широтах.

Полученный результат свидетельствует в пользу широтной зависимости активности планетарных волн и согласуется с наблюдательными данными сети NDMC [Reisin et al., 2014].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Поведение параметра σ_{pw} , отражающего активность планетарных волн, в 2015–2020 гг. на ст. Маймага и Тикси показало, что колебания σ_{pw} на обеих станциях происходят почти синхронно, а его величина на ст. Тикси превышает величину на ст. Маймага. Активность планетарных волн σ_{pw} в Тикси в среднем на 1–2 К больше, чем в Маймаге. Годовая активность планетарных волн σ_{pw_year} на ст. Тикси превышает активность на ст. Маймага на ~ 1 К в каждый отдельно взятый сезон соответственно. В сезоны 2014–2015 и 2018–2019 гг. наблюдаются максимумы годовой активности σ_{pw_year} для ст. Маймага. В сезон 2018–2019 гг. наблюдается также максимум годовой активности σ_{pw_year} для ст. Тикси. Общая активность планетарных волн за весь период наблюдений σ_{pw_total} составила 6.87 ± 0.12 К в Маймаге и 8.25 ± 0.20 К в Тикси. Полученные результаты свидетельствуют о широтной зависимости активности планетарных волн, что согласуется с выводами, сделанными по наблюдениям на сети станций NDMC. Одновременность колебаний σ_{pw} , регистрируемых на станциях, расположенных примерно на одном меридиане, говорит о преимущественно зональном распростране-

нии планетарных волн с близкой фазовой скоростью. Относительные стандартные отклонения температуры σ_{pw}/T_{month_av} , полученные на ст. Маймага и Тикси, близки (~ 0.03) к значениям σ_{ad}/T_0 , полученным на ст. Звенигород [Perminov et al., 2014].

Организация, сбор и накопление архива данных выполнено при поддержке РФФ № 22-27-20137, статистическая обработка данных выполнена в рамках гранта РФФ № 22-77-1008, анализ и интерпретация данных — в рамках финансовой поддержки Научно-образовательного фонда поддержки молодых ученых Республики Саха (Якутия), № 1423122021 и в рамках государственного задания (номер госрегистрации 122011700182-1).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Атмосфера: справочник (справочные данные, модели)*. Л.: Гидрометеоздат, 1991. 508 с.
- Шефов Н.Н., Семенов А.И., Хомич В.Ю. *Излучение верхней атмосферы — индикатор ее структуры и динамики*. М.: ГЕОС, 2006. 741 с.
- Ammosov P.P., Gavrilieva G.A. Infrared digital spectrograph for hydroxyl rotational temperature measurements. *Instruments and Experimental Techniques*. 2000. Vol. 43, iss. 6. P. 792–797.
- Bittner M., Offermann D., Graef H.-H., et al. An 18-year time series of OH rotational temperatures and middle atmosphere decadal variations. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2002. Vol. 64, iss. 8–11. P. 1147–1166. DOI: [10.1016/S1364-6826\(02\)00065-2](https://doi.org/10.1016/S1364-6826(02)00065-2).
- Gavrilieva G.A., Ammosov P.P., Koltovskoi I.I., et al. The optic meridional network in Yakutia: The method of mesopause temperature measurement. *AIP Conference Proc.* 2021. Vol. 2328, 050010. DOI: [10.1063/5.0042255](https://doi.org/10.1063/5.0042255).
- Holton J.R., Haynes P.H., McIntyre M.E., et al. Stratosphere-troposphere exchange. *Rev. Geophys.* 1995. Vol. 33. P. 403–439. DOI: [10.1029/95RG02097](https://doi.org/10.1029/95RG02097).
- Matsuno T. A dynamical model of the stratospheric sudden warming. *J. Atmos. Sci.* 1971. Vol. 28, iss. 8. P. 1479–1494. DOI: [10.1175/1520-0469\(1971\)028<1479:admots>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1971)028<1479:admots>2.0.co;2).
- Mies F.H. Calculated vibrational transition probabilities of OH(X2Π). *J. Molec. Spectroscopy*. 1974. Vol. 53, iss. 2. P. 150–188. DOI: [10.1016/0022-2852\(74\)90125-8](https://doi.org/10.1016/0022-2852(74)90125-8).
- Offermann D., Gusev O., Donner M., et al. Relative intensities of middle atmosphere waves. *J. Geophys. Res.* 2009. Vol. 114, D06110. DOI: [10.1029/2008JD010662](https://doi.org/10.1029/2008JD010662).

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, iss. 2. P. 230–239. DOI: [10.1134/S0016793214020157](https://doi.org/10.1134/S0016793214020157).

Reisin E.R., Scheer J., Dyrland M.E., et al. Traveling planetary wave activity from mesopause region airglow temperatures determined by the Network for the Detection of Mesospheric Change (NDMC). *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2014. Vol. 119. P. 71–82. DOI: [10.1016/j.jastp.2014.07.002](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2014.07.002).

Schoeberl M. Stratospheric warmings — observations and theory. *Rev. Geophys.* 1978. Vol. 16. P. 521–538. DOI: [10.1029/RG016i004p00521](https://doi.org/10.1029/RG016i004p00521).

Smith A. Global dynamics of the MLT. *Surv. Geophys.* 2012. Vol. 33. P. 1177–1230. DOI: [10.1007/s10712-012-9196-9](https://doi.org/10.1007/s10712-012-9196-9).

Yiğit E., Medvedev A.S. Internal wave coupling processes in Earth's atmosphere. *Adv. Space Res.* 2015. Vol. 55, iss. 4. P. 983–1003. DOI: [10.1016/j.asr.2014.11.020](https://doi.org/10.1016/j.asr.2014.11.020).

Как цитировать эту статью:

Сивцева В.И., Аммосов П.П., Гаврильева Г.А., Аммосова А.М., Колтовской И.И. Волновая активность мезосферы в диапазоне планетарных волн по наблюдениям эмиссии ОН (3-1) на станциях Маймага и Тикси за период 2015–2020 гг. *Солнечно-земная физика*. 2022. Т. 8, № 4. С. 95–101. DOI: [10.12737/szf-84202209](https://doi.org/10.12737/szf-84202209).