УДК 550.388

СОПОСТАВЛЕНИЕ ВОЛНОВОЙ АКТИВНОСТИ В ОБЛАСТИ МЕЗОПАУЗЫ НА СТАНЦИИ МАЙМАГА С ТЕМПЕРАТУРНЫМИ ДАННЫМИ EOS MLS (AURA) И АКТИВНОСТЬЮ ПЛАНЕТАРНЫХ ВОЛН НА СТАНЦИИ ТИКСИ

**В. И. Сивцева, П. П. Аммосов, Г. А. Гаврильева,
И. И. Колтовской, А. М. Аммосова**

Институт космофизических исследований и аэронавтики им. Ю. Г. Шафера Сибирского
отделения Российской академии наук, 677980,
г. Якутск, пр. Ленина, 31

E-mail: verasivtseva@gmail.com, ammosov@ikfia.ysn.ru, gagavriilyeva@mail.ru,
koltigor@mail.ru, ammosovaam@mail.ru

Исследованы данные температуры области мезопаузы, полученные за период 2013-2018 гг. на станции Маймага (63.04°N, 129.51°E) и за период 2015-2018 гг. на станции Тикси (71.58° N, 128.77° E). В зимний период сезона наблюдений 2014-2015 характеристика активности внутренних гравитационных волн (ВГВ) σ_{gw} имеет более низкие значения, чем в другие сезоны, а средненочная температура, наоборот, превышает аналогичные значения в другие сезоны. Для сопоставления рассматривались спутниковые данные температурных профилей полученные EOS MLS (Aura). После выделения и вычитания вклада гравитационной составляющей из температурных профилей EOS MLS для области над станцией Маймага заметно отличие в зимней стратопаузе сезона 2014-2015. В этот сезон в зимний период, с учетом вычета вклада флуктуаций температуры обусловленных ВГВ, наблюдается отсутствие резких потеплений в районе стратопаузы в отличие от остальных сезонов. Измерение параметров планетарных волн в течение периода 2015-2018 гг. совместных наблюдений на станциях Маймага и Тикси показали, что фазы наблюдаемых на обеих станциях волн совпадают, а амплитуды на станции Тикси несколько (1–2 К) превышают амплитуды на станции Маймага.

Ключевые слова: внутренние гравитационные волны, планетарные волны, мезопауза, стратопауза, гидроксил

© Сивцева В. И. и др., 2019

Введение

Волновая активность вносит существенный вклад в температурный режим мезопаузы. Волновые процессы различного масштаба – от гравитационных до планетарных, доходящие до верхней атмосферы перенося энергию и импульс, играют существенную роль в термодинамическом равновесии всей атмосферы, тем самым и в формировании климата. В частности, внутренние гравитационные волны (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 [1].

На высотах мезопаузы волновую активность исследуют как методом спутниковых измерений, так и с помощью наземных наблюдений. Наиболее распространенными и доступными среди наземных методов являются спектральные наблюдения эмиссий гидроксила OH (3, 1), которые возбуждаются в области мезопаузы. Спутниковые наблюдения предоставляют обширный объем данных для исследований. Но для определенных географических зон, из-за особенностей орбит, на протяжении года данные обычно имеют существенные пробелы. Aura – научно-исследовательский спутник, предоставляющий почти непрерывные температурные данные для высокоширотных зон.

В данной работе представлены исследования волновой активности в области мезопаузы (87 км) по измерениям на высокоширотной станции Маймага и сопоставление результатов с температурными данными EOS MLS (Aura) и активностью планетарных волн на станции Тикси.

Наземные наблюдения на станции Маймага

На станции Маймага (63.04° N, 129.51° E) с 2013 года ведется наблюдение температуры мезопаузы с помощью спектрографа Shamrock (Andor), регистрирующего полосу OH (3, 1). Спектрограф позволяет измерять температуру мезопаузы с точностью ~2 К. Разработанное программное обеспечение позволяет прибору работать полностью в автономном режиме [2].

В качестве характеристики ночной волновой активности принято стандартное отклонение температуры от ее средненочного значения. Согласно работе [3] суперпозиция волн может быть представлена в виде $\sigma = \sqrt{\sigma_{tw}^2 + \sigma_{gw}^2 + \sigma_{noise}^2}$, где σ_{tw} – стандартное отклонение температуры, обусловленное приливными волнами, σ_{gw} – внутренними гравитационными волнами, σ_{noise} – шумом темнового тока детектора. 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_{tw} определялась посредством выделения из ночного температурного ряда методом наименьших квадратов гармоник, соответствующих 24-, 12- и 8-часовой компонентам суточного прилива [4] [5].

Стандартные отклонения температуры, соответствующие ВГВ показаны на рис.1.а, где красной линией обозначено скользящее среднее с окном пропускания 30 дней, представляющее сезонный ход гравитационной компоненты σ_{gw} . На рис.1.б показаны средненочные вращательные температуры гидроксила. Синяя линия является линией скользящего среднего (30 дней).

В сезоне наблюдений 2014-2015 гравитационная компонента стандартных отклонений температуры σ_{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 от 1.5 до 5 К. Кроме того, в этот сезон средненочные температуры зимней мезопаузы, наоборот, превышают значения в другие сезоны.

Рис. 1. а) Сезонные вариации ВГВ-компоненты стандартных отклонений температуры, являющиеся скользящим средним с окном усреднения 30 дней, б) средненочные вращательные температуры гидроксидов по наблюдениям на ст. Маймага

Температурные данные EOS MLS (Aura)

Ауга — научно-исследовательский спутник, предназначенный для изучения атмосферы Земли. Запущен 15 июля 2004 года. Ауга была запущена на солнечно-синхронную околополярную орбиту (угол наклона 98.2°). Он 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 [6].

Так как орбита Ауга является солнечно-синхронной, наблюдения MLS на данной широте на восходящей или нисходящей сторонах орбиты имеют примерно одинаковое местное солнечное время (с точностью до нескольких минут) на протяжении всей миссии. Следовательно, из данных температуры EOS MLS (Aura) невозможно определить вклад приливных волн, так как приливы в основном обуславливаются сменой дня и ночи (перемещением терминатора день-ночь). А над станцией Маймага спутник снимает показания один раз за ночь всегда примерно в одно и то же местное солнечное время ($\sim 03:00$ UT).

В этом исследовании ВГВ анализируются аналогичного методу, представленному в работе [7], [8] и [9]. Метод, используемый здесь, резюмируется следующим образом: компоненты температуры соответствующие зональным волновым числам 1-6 (соответствующие волнам Россби) оцениваются путем подгонки методом наименьших квадратов, а сумма зональных средних температур ($\bar{T}$) (волновое число 0) и вклада компонент зональных волновых чисел 1-6 (T_{pw}) рассматриваются как «фоновые температуры (T_{BG})». При измерениях в фиксированное местное солнечное время, вклад всех приливных компонент включается во вклад компонент волновых чисел 0–6 и поэтому может быть вычтен вместе с планетарными волнами (T_{pw}). 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 $T_{gw} = \bar{T} - T_{BG}$), а T_{gw} рассматриваются как температурные возмущения, вызванные ВГВ.

Рис. 2. Температурный профиль атмосферы над ст. Маймага в течение 2013-2018 гг.

Данные Ауга для одного широтного кольца (широта станции Маймага 63.04° 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 (всего 55 раз). После выделения и вычитания вклада гравитационной компоненты из температурных профилей Ауга над станцией Маймага, заметно отличие в зимней стратопause сезона 2014-2015 гг. (рис. 2). В этот сезон в зимний период наблюдается отсутствие резких потеплений в районе стратопause в отличие от остальных сезонов.

Активность планетарных волн на станциях Маймага и Тикси

В качестве характеристики активности планетарных волн принято стандартное отклонение температуры от ее среднемесячного значения после вычета сезонного хода температуры – T_{pw} . Для учета сезонного хода температуры выделялись из средненочного температурного ряда гармоник, соответствующие годовой, полугодовой и третьгодовой составляющих сезонного температурного хода.

$$f_{sv} = \bar{T}_{year} + A_1 \cos \frac{2\pi}{365(t - \phi_1)} + A_2 \cos \frac{2\pi}{183(t - \phi_2)} + A_3 \cos \frac{2\pi}{122(t - \phi_3)}$$

Результат вычитания из годового средненочного температурного ряда суммы гармоник сезонного хода соответствует вкладу распространения планетарных волн в температуру (рис. 3).

На рис. 3 представлены вариации средненочной температуры после вычитания сезонного хода, обусловленные планетарными волнами. Произведена выборка дней во время которых производились одновременные наблюдения на станциях. Наблюдается совпадение фаз планетарных волн (ПВ) наблюдаемых на станциях. Амплитуды ПВ на станции Тикси превышают амплитуды ПВ на станции Маймага.

Рис. 3. Вариации средненочной температуры, обусловленные планетарными волнами

Рис. 4. Стандартные отклонения температуры, обусловленные планетарными волнами

На рис. 4 представлена активность планетарных волн по номерам месяцев за период наблюдений 2015-2018 гг. (первый месяц – август 2015 г.). Активность ПВ на станции Тикси несколько (1-2 К) превышает активность ПВ на станции Маймага.

Заключение

Исследованы данные температуры области мезопаузы, полученные за период 2013-2018 гг. на станции Маймага (63.04°N, 129.51°E) и за период 2015-2018 гг. на станции Тикси (71.58° N, 128.77° E). В зимний период сезона наблюдений 2014-2015 характеристика активности ВГВ σ_{gw} имеет более низкие значения, а температура области мезопаузы превышает аналогичные значения в другие сезоны. После выделения и вычитания вклада гравитационной составляющей из температурных профилей EOS MLS (Aura) для области над станцией Маймага заметно отличие в зимней стратопause сезона 2014-2015. В этот сезон в зимний период, с учетом вычета вклада флуктуаций температуры обусловленных ВГВ, наблюдается отсутствие резких потеплений в районе стратопause в отличие от остальных сезонов.

Измерение параметров планетарных волн в течение периода 2015-2018 гг. совместных наблюдений на станциях Маймага и Тикси показали, что фазы наблюдаемых на обеих станциях волн совпадают, а амплитуды на станции Тикси превышают амплитуды на станции Маймага. Активность ПВ в Тикси в среднем на 1-2 К больше чем в Маймаге.

Более низкие показатели активности ВГВ в области мезопаузы в зимний период сезона 2014-2015 (рис. 1.а) могут быть объяснены тем, что возможно в этот сезон отсутствие резких потеплений в районе стратопause (рис. 2) позволило ВГВ пройти вверх из нижних слоев атмосферы, затем значительная часть энергии ВГВ была поглощена на высоте близкой к высоте эмиссионного слоя гидроксила, нагревая область мезопаузы (рис. 1.б).

Список литературы/References

- [1] Hines C. O., *The upper atmosphere in motion*, AGU, Washington D. C., 1974, 1027 pp.
- [2] Koltovskoi I. I., Ammosov P. P., Gavril'yeva G. A., Ammosova A. M., Sivseva V. I., "New infrared spectrograph for the investigation of the mesopause region", *Proc. SPIE 23rd International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics*, **10466** (2017), 1046645.
- [3] 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.*, **114** (2009), D06110.
- [4] 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*, **4**:2 (2018), 109-112. [Sivtseva V.I., Ammosov P.P., Gavril'yeva G.A., Koltovskoy I.I., Ammosova A.M., "Sravneniye sezonnykh variatsiy aktivnosti prilivnykh i vnutrennikh gravitatsionnykh voln po nablyudeniym na stantsiyakh Maymaga i Tiksi", *Solnechno-zemnaya fizika*, **4**:2 (2018), 109-112, (in Russian)].
- [5] Сивцева В. И., *Вестник СВФУ*, **66**:4 (2018), 61-67. [Sivtseva V. I., *Vestnik SVFU*, **66**:4 (2018), 61-67, (in Russian)].
- [6] NASA EOS Aura, *Discoveries from EOS Aura*, Goddard Space Flight Center, Greenbelt, 2007, 57 pp.
- [7] Preusse P., A. Dörnbrack, S. D. Eckermann, M. Riese, B. Schaeler, J. Bacmeister, D. Broutman, K. U. Grossmann, "Space based measurements of stratospheric mountain waves by CRISTA: 1. Sensitivity, analysis method and a case study", *J. Geophys. Res.*, **107** (2002), 8178.
- [8] Preusse P., S. D. Eckermann, M. Ern, J. Oberheide, R. H. Picard, R. G. Roble, M. Riese, J. M. Russell, III, and M. G. Mlynczak, "Global ray tracing simulations of the SABER gravity wave climatology", *J. Geophys. Res.*, **114** (2009), D08126.

- [9] Fetzer E. J., J. C. Gille., "Gravity wave variance in LIMS temperatures. Part I: Variability and comparison with background winds", *J. Atmos. Sci.*, **51** (1994), 2461–2483.

Список литературы (ГОСТ)

- [1] Hines C. O. The upper atmosphere in motion. Washington D. C.: AGU, 1974. 1027 p.
- [2] Koltovskoi I. I., Ammosov P. P., Gavriilyeva G. A., Ammosova A. M., Sivseva V. I. New infrared spectrograph for the investigation of the mesopause region // Proc. SPIE 23rd International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics. 2017. 10466. 1046645
- [3] 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. D06110.
- [4] 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. 109-112."
- [5] Сивцева В. И. Сезонные колебания активности ВГВ в области мезопаузы по измерениям на станции Маймага // *Вестник СВФУ*. 2018. Т. 66. №4. С. 61-67.
- [6] NASA EOS Aura. Discoveries from EOS Aura. Greenbelt. Goddard Space Flight Center, 2007. 57 p.
- [7] Preusse P., A. Dörnbrack, S. D. Eckermann, M. Riese, B. Schaeler, J. Bacmeister, D. Broutman, K. U. Grossmann. Space based measurements of stratospheric mountain waves by CRISTA: 1. Sensitivity, analysis method and a case study // *J. Geophys. Res.* 2002. vol. 107. 8178.
- [8] Preusse P., S. D. Eckermann, M. Ern, J. Oberheide, R. H. Picard, R. G. Roble, M. Riese, J. M. Russell, III, and M. G. Mlynczak. Global ray tracing simulations of the SABER gravity wave climatology // *J. Geophys. Res.* 2009. vol. 114. D08126.
- [9] Fetzer E. J., Gille J. C. Gravity wave variance in LIMS temperatures. Part I: Variability and comparison with background winds // *J. Atmos. Sci.* 1994. vol. 51. pp. 2461–2483.

Для цитирования: 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

For citation: Sivtseva V. I., Ammosov P. P., Gavriilyeva G. A., Koltovskoi I. I., Ammosova A. M. Comparison of wave activity in the mesopause region at maimaga station with EOS MLS (Aura) temperature data and activity of planetary waves at Tiksi station, *Vestnik KRAUNC. Fiz.-mat. nauki*. 2019, **29**: 4, 182-189. DOI: 10.26117/2079-6641-2019-29-4-182-189

Поступила в редакцию / Original article submitted: 12.09.2019

DOI: 10.26117/2079-6641-2019-29-4-182-189

PACS 92.60.hh

COMPARISON OF WAVE ACTIVITY IN THE MESOPAUSE REGION AT MAIMAGA STATION WITH EOS MLS (AURA) TEMPERATURE DATA AND ACTIVITY OF PLANETARY WAVES AT TIKSI STATION

**V. I. Sivtseva, P. P. Ammosov, G. A. Gavril'yeva,
I. I. Koltovskoi, A. M. Ammosova**

Yu. G. Shafer Institute of Cosmophysical Research and Aeronomy of SB RAS, 677980, Yakutsk,

Lenin ave., 31, Russia

E-mail: verasivtseva@gmail.com, ammosov@ikfia.ysn.ru, gagavril'yeva@mail.ru, koltigor@mail.ru, ammosovaam@mail.ru

The temperature data of the mesopause region obtained for the period 2013-2018 at the station Maimaga (63.04° N, 129.51° E) and for the period 2015-2018 at the station Tiksi (71.58° N, 128.77° E) was investigated. During the winter period of the 2014–2015 observation season, the characteristic of the internal gravity waves (IGW) activity σ_{gw} has lower values than in other seasons, and the average night temperature of the mesopause region, on the contrary, exceeds corresponding values in other seasons. For comparison, satellite data of temperature profiles obtained by EOS MLS (Aura) are given. After isolating and subtracting the contribution of the gravity waves from the EOS MLS temperature profiles for the region above the st. Maimaga, the difference in the winter stratopause of the 2014-2015 season is noticeable. In this season in winter there is a lack of sharp warming in the stratopause region, in contrast to other seasons, taking into account the deduction of the contribution of temperature fluctuations due to IGW. Measurement of the parameters of planetary waves during the period 2015-2018 of joint observations at Maimaga and Tiksi stations showed that the phases of the waves observed at both stations coincide, and the amplitudes at Tiksi station are several (1-2 K) higher than the amplitudes at Maimaga station.

Key words: internal gravity waves, planetary waves, mesopause, stratopause, hydroxyl.

© Sivtseva V. I. et al., 2019