

ВОЛНОВАЯ АКТИВНОСТЬ ВГВ В НИЖНЕЙ ТЕРМОСФЕРЕ В ПЕРИОД МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОГО ШТОРМА ПО ДАННЫМ НАБЛЮДЕНИЙ SABER/TIMED

О.П. Борчевкина, Ф.С. Бессараб, А.В. Тимченко, И.В. Карпов

Калининградский филиал института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн
им. Н. В. Пушкова Российской академии наук, Калининград, Россия,
timchenko.leks@gmail.com

GRAVITY WAVES ACTIVITY IN THE MESOSPHERE AND LOWER THERMOSPHERE DURING A METEOROLOGICAL STORM

O. P. Borchevkina, F. S. Bessarab, A. V. Timchenko, I. V. Karpov

West Department of Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation,
Russian Academy of Sciences, Kaliningrad, Russia,
timchenko.leks@gmail.com

Аннотация. Исследуется влияние метеорологического шторма в октябре 2018 г. в Балтийском море на состояние мезосферы и нижней термосферы. Проведён анализ волновой активности внутренних гравитационных волн по данным спутника TIMED/SABER и определены эффекты метеорологического шторма на высотах 80–100 км. Проведённый вейвлет-анализ возмущений температуры выявил два диапазона вертикальных длин волн 5–8 км и 14–18 км. В области метеорологического шторма амплитуда ВГВ с вертикальными длинами волн 5–8 км возрастает, а область их максимума расширяется и смещается вверх на высоты ~90 км, в то время как в метеорологически спокойные дни данные волны наблюдаются на высотах 65–70 км и с меньшими амплитудами. Над областью метеорологического шторма на высотах 90–100 км значительно увеличиваются значения плотности потенциальной энергии внутренних гравитационных волн по сравнению со спокойными днями до и после шторма, а также увеличиваются пространственные размеры области возмущения.

Ключевые слова: TIMED/SABER, метеорологический шторм, ВГВ, внутренние гравитационные волны.

Abstract. The influence of the meteorological storm in October 2018 in the Baltic Sea on the state of the mesosphere and lower thermosphere is investigated. The wave activity of gravity waves was analyzed using TIMED/SABER satellite data and the effects of the meteorological storm at altitudes of 80–100 km were determined. The wavelet analysis of temperature perturbations revealed two ranges of vertical wavelengths 5–8 km and 14–18 km. In the area of a meteorological storm, the GWs amplitude with vertical wavelengths of 5–8 km increases, and the area of their maximum expands and shifts upward to heights of ~90 km, while on meteorologically calm days these waves are observed at heights of 65–70 km and with smaller amplitudes. Above the meteorological storm region at altitudes of 90–100 km, the values of the gravity waves potential energy density significantly increase compared to calm days before and after the storm, as well as the spatial dimensions of the disturbance region increase.

Keywords: TIMED/SABER, meteorological storm, GWs, the gravity waves.

ВВЕДЕНИЕ

Динамические процессы в нижней атмосфере, такие как метеорологические штормы, ураганы, извержения вулканов, землетрясения являются источником широкого спектра внутренних гравитационных волн (ВГВ), которые способны распространяться вверх до высот термосферы и ионосферы и оказывать существенное влияние на параметры и динамику верхней атмосферы [Borchevkina et al., 2021]. Влияние ВГВ, распространяющихся из области метеорологических штормов в тропосфере, отмечается в существенных возмущениях как в F-области ионосферы [Карпов и др., 2016; Koucká Knížová et al., 2020], так и в мезосфере и нижней термосфере [Бахметьева и др., 2023; Шалимов и др., 2023].

Для экспериментального исследования влияния ВГВ на термосферу и ионосферу используют как наземные, так и спутниковые методы наблюдений. Спутниковые миссии позволяют обеспечивать большой объём наблюдений с разным временным и пространственным разрешением. Спутник TIMED (Thermosphere-Ionosphere-Mesosphere Energetic and Dynamics) широко используется для исследования состояния атмосферы до высот нижней термосферы. Зондирование атмосферы с помощью

широкополосной эмиссионной радиометрии (SABER) на спутнике TIMED позволяет определить профили температуры до высот примерно 110 км. Подробная информация об инструменте SABER и соответствующих данных о температуре представлены в работах [Remsberg et al., 2008].

Цель настоящей работы заключается в анализе волновой активности в нижней термосфере в период прохождения метеорологического шторма на основе измерений температуры спутниковой миссией TIMED.

ОПИСАНИЕ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОГО ШТОРМА И ДАННЫЕ

Для исследования активности ВГВ нами был выбран шторм в октябре 2018 г. в Балтийском море. Атмосферные возмущения на высотах тропосферы характеризовались сильными порывами ветра, достигающими 8 баллов по шкале Бофорта. 21 октября 2018 г. сформировавшийся в Атлантическом океане шторм начал движение на восток и достиг южной Балтики к 5 UT 23 октября 2018 г., где существовал до ~23 UT 24 октября. Пространственный размер возмущения составлял около 300 км². Основное внимание уделялось области

метеорологического шторма $\sim 55\text{--}60^\circ \text{ N}$, 15° E 22–23 октября 2018 г.

На рис. 1 представлены изменения температуры в дневное и ночное время 20–27 октября 2018 г. по данным SABER в европейском регионе ($40\text{--}60^\circ \text{ N}$, $0\text{--}20^\circ \text{ E}$) в области высот 80–105 км. Заметим, что под ночными часами мы подразумеваем интервал от 21:00 одного дня до 08:00 UT следующего дня. Например, ночь 22 октября — это время от 21 до 24 UT 22.10.2018 г. и от 0 до 8 UT 23.10.2018 г.

В дневное время отчётливо видно увеличение температуры на высотах от 80 до 88 км и её уменьшение на высотах от 93 до 104 км в первые дни метеорологического шторма. Подобное, но менее выраженное поведение температуры отмечается и в ночное время. Заметим, что повышение температуры в области мезопаузы началось до формальной даты прихода шторма в исследуемую область. Такое изменение фоновой температуры можно объяснить тем, что возмущение в виде ВГВ от центра метеосторма распространяется не вертикально [Куницын и др., 2015; Кшевский и др., 2023]. Такие изменения в параметрах нейтральной атмосферы в отсутствие геомагнитной возмущённости связаны с волновой активностью.

Для дальнейшего анализа, учитывая географию области метеорологического возмущения, отбирались профили температуры по данным SABER/TIMED в широтно-долготном регионе $50\text{--}60^\circ \text{ N}$, $15\text{--}20^\circ \text{ E}$ в течение нескольких дней в октябре 2018 г., включающих дни шторма, без пространственного и временного осреднения.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В метеорологически спокойные дни 18 и 20 октября, предшествующие шторму, плотность потенциальной энергии невелика и не превышает 300 Дж/кг. Из рис. 2 можно отметить присутствие двух областей на высотах 60–65 км и 80–83 км с увеличенными значениями E_p по сравнению со значениями в метеорологически спокойные дни. При этом максимум энергосвыделения расположен на высотах 93–97 км. Характерные горизонтальные размеры локальных максимумов E_p составляют около 400–500 км. Температурные профили спутникового зондирования 22 октября, используемые для расчётов E_p , получены в 23:26–26:30 UT, когда передний фронт шторма достиг 10° E . Во время метеорологического возмущения (22–24 октября) плотность потенциальной энергии увеличивается и на высотах 90–100 км достигает 500 Дж/кг. Расширяется и горизонтальная область волнового возмущения, которая максимальна 23 октября. Характерный размер этой области на высоте 92 км составляет около 1000 км и несколько меньше — на 97 км. К 24 октября величина потенциальной энергии уменьшается и не превосходит значений в спокойный день 18 октября. Интересно выглядит пространственное распределение E_p на 97 км 24 октября. Резкая граница, разделяющая области максимума и минимума плотности энергии, может свидетельствовать о преимущественно долготной ориентации области волнового возмущения.

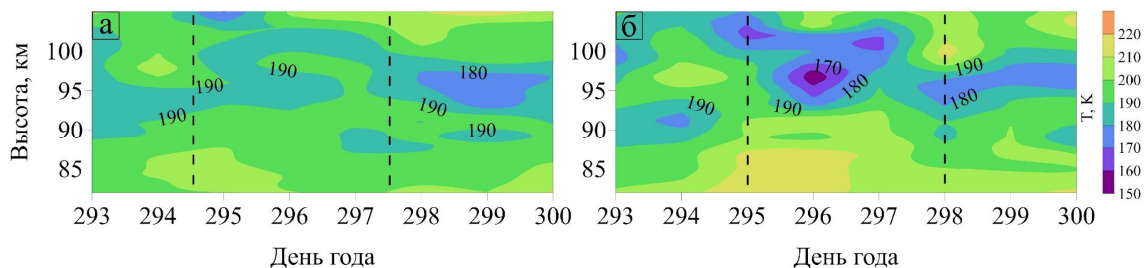


Рис. 1. Вариации температуры в ночное (а) и дневное (б) время по данным SABER/TIMED. Время начала и окончания шторма выделено вертикальными штриховыми линиями

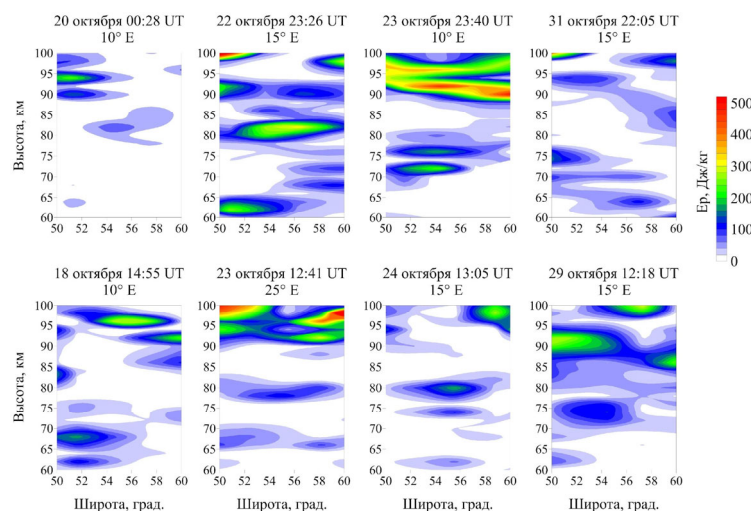


Рис. 2. Изменения потенциальной энергии ВГВ в различные дни октября 2018 г. в ночное время (верхняя панель) и в дневное время (нижняя панель)

Обрушение ВГВ и образование турбулентных областей в нижней термосфере приводит к значительным тепловым и динамическим эффектам. Изменения в нейтральной составляющей верхней атмосферы приводят и к заметным изменениям ионосферных параметров.

ВГВ, распространяющиеся из области конвективных процессов в нижней атмосфере, в частности, метеосторма, могут усиливать турбулентные процессы на высотах верхней мезосферы и нижней термосферы. Амплитуда ВГВ увеличивается по мере уменьшения плотности атмосферы с высотой. При достижении определенного порогового значения [Fritts et al., 2003] волна становится неустойчивой и разрушается, образуя турбулентные области.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлены результаты исследования спутниковых наблюдений температуры в период прохождения метеорологического шторма над Балтийским морем в октябре 2018 г.

Результаты анализа 186 температурных профилей, отобранных из массива экспериментальных данных SABER/TIMED, для исследуемой области позволили определить эффекты метеорологического шторма на высотах мезосферы и нижней термосферы. Так, в дни метеорологического шторма отчетливо видно увеличение температуры на высотах от 80–88 км и её уменьшение на высотах 93–104 км.

Рассчитанные значения плотности потенциальной энергии ВГВ (E_p) показали, что над областью метеорологического шторма на высотах мезопазы–нижней термосферы (90–100 км) величина E_p значительно увеличивается, по сравнению со спокойными днями до и после шторма. Пространственные размеры области волнового возмущения, соответствующие большим значениям E_p , в период шторма увеличиваются с 400–500 км до 1000 км на высотах мезосферы и нижней термосферы. Широко-высотное распределение E_p демонстрирует устойчивые области повышенных значений плотности потенциальной энергии на высоте 62–63 и 80–84 км во все рассматриваемые дни.

Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда № 23-77-10004, <https://rscf.ru/project/23-77-10004/>.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бахметьева Н.В., Жемяков И.Н., Григорьев Г.И., Калинина Е.Е. Влияние природных факторов на температуру нижней термосферы // *Хим. физика*. 2023. Т. 42, № 10. С. 50–63. doi 10.31857/S0207401X23100023
- Карпов И.В., Борчевкина О.П., Дадашев Р.З., Ильминская А.В. Влияние метеорологических штормов на параметры ионосферы в Балтийском регионе в 2010 г. // *Солнечно-земная физика*. 2016. Т. 2, № 2. С. 64–68. doi 10.12737/18653
- Кшевецкий С.П., Курдяева Ю.А., Гаврилов Н.М. Приближение коротких по вертикали волн малой амплитуды в атмосфере с учетом среднего ветра // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана*. 2023. Т. 59, № 1. С. 44–54. doi 10.31857/S0002351523010078
- Куницын В.Е., Крысанов Б.Ю., Воронцова А.М. Генерация акустико-гравитационных волн различными источниками на поверхности Земли // *ВМУ. Серия 3. Физика. Астрономия*. 2015. № 6. С. 112–119.
- Шалимов С.Л., Захаров В.И., Соловьева М.С. и др. Волновые возмущения нижней и верхней ионосферы во время тропического циклона Faxai 2019 г. // *Геомагнетизм и аэрономия*. 2023. Т. 63, № 2. С. 216–226. doi 10.31857/S0016794022600442
- Borchevkina O.P., Adamson S.O., Dyakov Y.A. et al. The influence of tropospheric processes on disturbances in the D and E ionospheric layers // *Atmosphere*. 2021. V. 12, N 9. P. 1116. doi 10.3390/atmos12091116
- Fritts D.C., Bizon C., Wern, J.A., Meyer C.K. Layering accompanying turbulence generation due to shear instability and gravity-wave breaking // *J. Geophys. Res.* 2003. V. 108, N D8. doi 10.1029/2002JD002406
- Koucká Knížová P., Podolská K., Potužníková K. et al. Evidence of vertical coupling: meteorological storm Fabienne on 23 September 2018 and its related effects observed up to the ionosphere // *Ann. Geophys.* 2020. V. 38, N. 1. P. 73–93. doi 10.5194/angeo-38-73-2020.
- Remsberg E.E., Marshall B. T., Garcia-Comas M. et al. Assessment of the quality of the Version 1.07 temperature-versus-pressure profiles of the middle atmosphere from TIMED/SABER // *J. Geophys. Res.* 2008. V. 113, iss. D17. P. D17101. doi 10.1029/2008JD010013