

УДК 551.51, 551.55

ВОЛНОВАЯ АКТИВНОСТЬ ВНУТРЕННИХ ГРАВИТАЦИОННЫХ ВОЛН В МЕЗОСФЕРЕ И НИЖНЕЙ ТЕРМОСФЕРЕ В ПЕРИОД МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОГО ШТОРМА

© 2024 г. О. П. Борчевкина¹, *, Ф. С. Бессараб¹, А. В. Тимченко¹, И. В. Карпов¹

¹Калининградский филиал Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова (Кф ИЗМИРАН), Калининград, Россия

*e-mail: olga.borchevkina@mail.ru

Поступила в редакцию 06.02.2024 г.

После доработки 13.03.2024 г.

Принята к публикации 04.04.2024 г.

Исследуется влияние метеорологического шторма в октябре 2018 г. в Балтийском море на состояние мезосферы и нижней термосферы. Проведен анализ волновой активности внутренних гравитационных волн по данным спутника TIMED/SABER и определены эффекты метеорологического шторма на высотах 80–100 км. Для расчета плотности потенциальной энергии внутренних гравитационных волн и выделения возмущений температуры, обусловленных их распространением на высотах нижней термосферы, был адаптирован метод на основе модовой декомпозиции из данных SABER. Проведенный вейвлет-анализ возмущений температуры выявил два диапазона вертикальных длин волн 5–8 км и 14–18 км. В области метеорологического шторма амплитуда внутренних гравитационных волн 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.

DOI: 10.31857/S0016794024040072, EDN: RSVTYW

1. 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 [Григорьев, 1999; Medvedev and Yiğit, 2019; Fritts and Alexander, 2003; Plougonven and Zhang, 2014; Borchevkina et al., 2021; Mosna et al., 2020]. Влияние ВГВ, распространяющихся из области метеорологических штормов в тропосфере, отмечается в существенных возмущениях как в F -области ионосферы [Карпов и др., 2016; Федоренко и др., 2017; Koucká Knížová et al., 2020], так и в мезосфере и нижней термосфере [Шалимов и Соловьева, 2022; Бахметьева и др., 2022, 2023; Шалимов и др., 2023].

Для экспериментального исследования влияния ВГВ на термосферу и ионосферу используют как наземные, так и спутниковые методы наблюдений. Наземные измерения могут обеспечивать локальные измерения параметров ВГВ до высот нижней термосферы [Baumgarten et al., 2018; Strelnikova et al., 2021]. Спутниковые миссии позволяют обеспечивать большой объем 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 ~110 км. Полученные данные о температуре являются важным ресурсом для исследования различных параметров ВГВ. Подробная информация об инструменте SABER

и соответствующих данных о температуре представлены в работах [Mlynczak, 2002; Garcia et al., 2005; Remsberg et al., 2008]. Данные SABER доступны на сайте <https://saber.gats-inc.com/>.

Вертикальный профиль наблюдаемой температуры можно представить в виде суммы фоновой и возмущенной составляющих, предполагая, что возмущенная составляющая обусловлена ВГВ:

$$T = T' + \bar{T} . \quad (1)$$

Для определения характеристик ВГВ необходимо разделять температуру на фоновую и возмущенную составляющую. Существует несколько способов выделения фонового и возмущенного профилей температуры. Так, Nigussie et al. [2022] использовали полиномиальный метод регрессионного анализа, при котором связь между зависимой и независимой переменными моделируется полиномом n -й степени от зависимой переменной с помощью метода наименьших квадратов. Wang et al. [2005] проводили сравнение полиномов различных порядков, а также фильтра низких частот для выделения фоновой температуры из экспериментального профиля. Однако стоит заметить, что исследование в данных работах касалось ВГВ в средней атмосфере на высотах 30–50 км.

Другим популярным методом, который использовался Hindley et al. [2015], является применение низкочастотного цифрового фильтра Савицкого–Голея [Savitzky and Golay, 1964], который широко используется в геофизике для выделения определенных длин волн и является развитием метода скользящего среднего за счет введения аппроксимирующего полинома n -й степени в заданном окне по методу наименьших квадратов. Использование данного фильтра отсекает вертикальные длины волн, которые больше используемого в фильтре окна. В последнее время становится популярным метод эмпирической модовой декомпозиции (EMD), основанный на преобразовании Гильберта–Хуанга [Huang et al., 1998], который позволяет представить исходный сигнал в виде суммы собственных модовых функций (IMF). Подробный обзор методов выделения ВГВ из экспериментальных данных представлен в публикации [Sakib and Yiğit, 2022].

Нами было проведено сравнение трех основных методов выделения фоновой составляющей: полиномиальный, фильтр Савицкого–Голея и EMD. На высотах мезосферы и нижней термосферы, где профиль температуры испытывает значительные изменения, сложно подобрать фоновую полиномиальную функцию. При использо-

вании низкочастотных оконных фильтров при анализе каждого измерения необходимо подбирать оптимальный размер окна. К тому же использование фильтра Савицкого–Голея обрезает вертикальные длины волн, которые больше используемого в фильтре окна (15–20 км). Проведенные нами сравнения методов показали, что эмпирическая модовая декомпозиция продемонстрировала лучшую робастность и оказалась лучшим методом выделения фоновой температуры и ее флуктуации для исследования метеорологического шторма 22–24 октября 2018 г.

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

2. ОПИСАНИЕ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОГО ШТОРМА И ДАННЫЕ ИЗМЕРЕНИЙ

Обычно штормы в Балтийском море формируются в Атлантическом океане и вследствие отсутствия орографических препятствий достигают Балтийского моря и Калининградской области менее чем за сутки. С 2015 г. такие штормы выделены в отдельный метеорологический класс, называющийся Европейский шторм. Отметим, что метеорологические штормы в Балтийском море особенно часты и интенсивны в период с октября по март. Изменение климата увеличивает изменчивость динамики атмосферы, и экстремальные погодные явления, скорее всего, станут более частыми и интенсивными. Продолжительность Европейского шторма обычно составляет от 1 до 3 сут.

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. Примерная траектория движения шторма по времени показана на рис. 1. Пространственный размер возмущения составлял около 300 км² (обозначен овалом в виде штриховой линии). Основное внимание уделялось области метеорологического шторма, т.е. ~55–60° N, 15–20° E 22–23 октября 2018 г.

Ранее, в работах [Борчевкина и др., 2020; Карпов и др., 2020] было показано, что во время данного метеорологического события по данным инструментов obs. Калининградского филиала ИЗМИРАН наблюдались существенные измене-

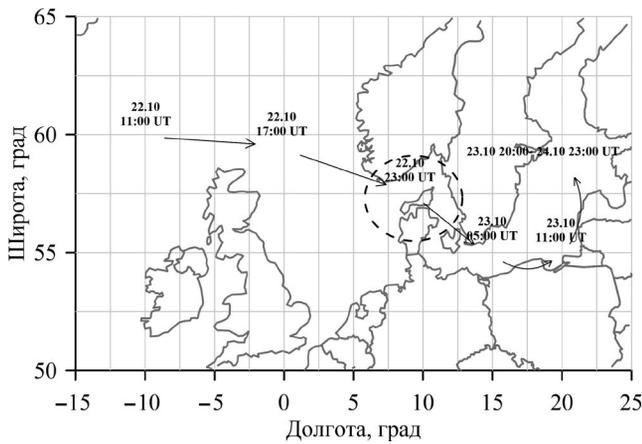


Рис. 1. Схематическая траектория движения шторма в октябре 2018 г.

ния в ПЭС и критической частоте $F2$ -слоя ($foF2$) на фоне спокойной геомагнитной обстановки. Так, максимальное изменение критической частоты $F2$ -слоя достигало 19%, а ПЭС – 20% относительно осредненных величин в ночное время. Анализ критической частоты спорадического E -слоя показал изменение характеристик слоя E_s , проявляющееся в снижении предельной частоты E_s ниже порога чувствительности ионозонда (~2 МГц) и немонотонном изменении высоты слоя. Причины возникновения наблюдаемых возмущений на высотах ионосферы, по-видимому, обусловлены распространением ВГВ, генерируемых конвективными процессами в нижней атмосфере в периоды метеорологического шторма.

Использование спутниковых данных позволяет изучить пространственные характеристики волновых возмущений. При обработке данных SABER следует учитывать особенности спутниковых измерений. Период обращения спутника TIMED составляет 97.3 мин, а время пролета над

областью шторма не превышало 5 мин. В течение времени между измерениями, которые составляют 50 с, спутник смещался на 3–4° по широте, практически не сдвигаясь вдоль долготы. Указанные особенности приводят к тому, что измерения спутника над областью метеорологического шторма позволяют получить температурные данные в исследуемой области 1–2 раза в сутки.

Для иллюстрации эффектов шторма в нижней термосфере и мезосфере нам пришлось расширить регион осреднения для увеличения числа пролетов спутника над исследуемой областью. На рис. 2 представлены изменения температуры в дневное и ночное время 20–27 октября 2018 г. по данным SABER в европейском регионе (40–60° N, 0–20° 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 отчетливо видно увеличение температуры на высотах от 80 до 88 км и ее 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, если учесть, что возмущение в виде ВГВ, источник которого находится в тропосфере, от центра метеорологического шторма распространяется не вертикально [Куницын и др., 2015; Кшевецкий и др., 2023].

Естественно предположить, что изменения в параметрах нейтральной атмосферы, в частности, в температуре в отсутствие геомагнитной возмущенности, по-видимому, связаны с волновой активностью.

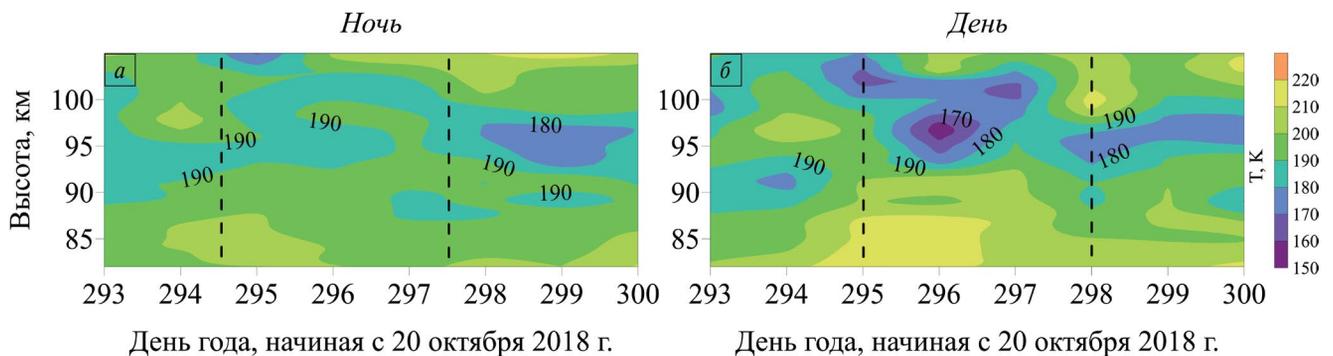


Рис. 2. Вариации температуры, осредненные в области 40–60° N, 0–20° E в ночное (а) и дневное (б) время в октябре 2018 г. по данным SABER/TIMED. Время начала и окончания шторма выделено вертикальными штриховыми линиями.

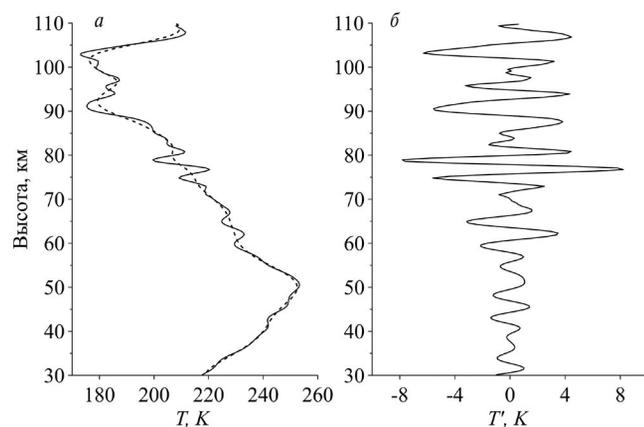


Рис. 3. Профиль температуры 19 октября 2018 г. в 13:41 UT в 53° N, 21° E (черная линия), фоновая температура (серая линия) (а), возмущения температуры, обусловленные влиянием ВГВ (б).

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

Для выделения фоновой температуры и ее флуктуаций, обусловленных распространением ВГВ из нижних слоев атмосферы, применялся метод эмпирической модовой декомпозиции. Исходный профиль раскладывался на собственные модовые функции (IMF). Восстановленный сигнал представляет сумму всех IMF. IMF-1 представляет собой компоненту с самой короткой длиной волны и рассматривается как флуктуация температуры T' . Сумма всех остальных IMF рассматривается как фоновая температура \bar{T} [Nayak and Yigit, 2019]. На рис. 3 представлен профиль температуры, построенный по результатам зондирования SABER/TIMED в точке с координатами 53° N, 21° E 19 октября 2018 г. в 13:41 UT (а), а также фоновая температура и ее возмущения, определенные методом эмпирической модовой декомпозиции (б). Как видно из рис. 3а, фоновый и экспериментальный профили температуры хорошо согласуются на всех высотах. Флуктуации температуры, представленные на рис. 3б, полученные как разность экспериментальных и фоновых значений, имеют волновой характер, а их амплитуды составляют несколько градусов. Далее флуктуации температуры будут использоваться для расчета характеристик ВГВ.

3. ХАРАКТЕРИСТИКИ ВОЛНОВЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ

Возмущения температуры, выделенные из экспериментальных профилей, содержат информацию о различных характеристиках ВГВ. Для анализа спектральных характеристик атмосферных волн применялся вейвлет-анализ:

$$W(s, b) = \frac{1}{\sqrt{s}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(h) \Psi\left(\frac{h-b}{s}\right) dt, \quad (2)$$

где s — масштаб вейвлета; b — параметр пространственного сдвига; h — независимая переменная (высота); Ψ — базовая функция вейвлета. В нашем случае сдвиг b соответствует высоте, а параметр s связан с вертикальной длиной волны λ . В качестве базовой функции использовалась функция Морле. Выбранная базовая функция дает хорошее разрешение, а пространственный масштаб вейвлета s практически совпадает с длиной волны λ . Подробная методика определения длин волн представлена в работе [Коршунов и Зубачев, 2015]. Для анализа рассматривалась амплитуда коэффициентов вейвлет-разложения:

$$W(h, \lambda) = \sqrt{\text{Re}^2(W_n(h, \lambda)) + \text{Im}^2(W_n(h, \lambda))}. \quad (3)$$

На рис. 4 представлены спектрограммы амплитуды вертикальных длин волн, рассчитанные из экспериментальных профилей температуры над областью, ограниченной координатами 48–63° N, 15–17° E, примерно в 23:30 22 октября 2018 г. В связи с особенностями пространственного распространения ВГВ, рассматриваемая область волнового возмущения на высотах мезосферы и нижней термосферы больше области метеорологического шторма в тропосфере и охватывает регион ~ 52–62° N. Как видно из рис. 4, спектрограммы 4б–4д соответствуют возмущениям температуры над областью шторма, а 4а, 4е — вне шторма. На всех спектрограммах можно выделить максимумы, которые соответствуют вертикальным длинам волн 5–8 км (“короткие волны”) и 14–18 км (“длинные волны”), кроме спектрограммы на рис. 4а. Вне области шторма максимум по высоте на спектрограмме, соответствующий коротким волнам, располагается на высотах 80 км (рис. 4а), а вблизи эпицентра метеорологического шторма (рис. 4в, з) область максимума волновой активности коротких ВГВ расширяется и смещается вверх на высоты ~90 км, также увеличивается интенсивность коротких ВГВ.

На рис. 4а, е, которые соответствуют измерениям вне области шторма, отчетливо выделяются

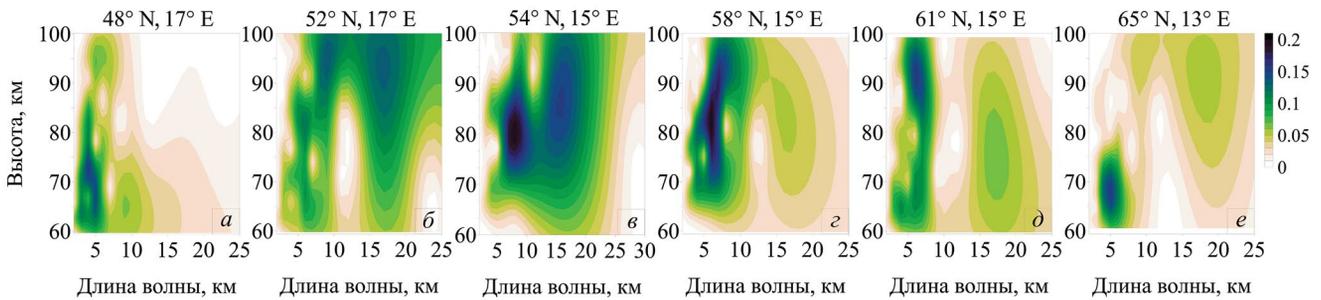


Рис. 4. Спектрограммы температурных возмущений в долготном секторе 13–17° E и на широтах 48° N (а); 52° N (б); 54° N (в); 58° N (г); 61° N (д); 65° N (е) в ~ 23:30 UT 22 октября 2018 г.

короткие волны ($\lambda \leq 5$ км), а волны с вертикальной длиной более 8 км имеют небольшие амплитуды. Длинные волны хорошо видны на спектрограмме рис. 4е, причем максимум амплитуды этих волн расположен достаточно высоко — вблизи 85–95 км. На рис. 4а, который соответствует региону, расположенному южнее области шторма, подобного максимума нет.

Длинноволновая часть спектра для четырех измерений вертикальных профилей температуры над областью шторма (рис. 4б–4д) выглядит по-разному. На рис. 4б, 4в высота спектрального максимума расположена на 92–97 км и 83–88 км соответственно. Амплитуда длинных волн в этих измерениях сопоставима с амплитудой коротких волн, а на 100 км даже превосходит их (рис. 4в). На рис. 4г и 4д длиноволновая часть спектра по амплитуде ближе к измерениям вне эпицентра метеорологического шторма (рис. 4е), а максимумы расположены ниже, чем на рис. 4б и 4в. Таким образом, общим проявлением штормовой активности при анализе температурных флуктуаций является усиление амплитуды коротких волн, которые проникают в мезосферу и нижнюю термосферу.

Отмечаемое повышение амплитуд определенных длин волн на высотах 80–90 км над областью эпицентра метеорологического возмущения может быть связано с усилением волновой активности из области метеорологического шторма.

4. ПОТЕНЦИАЛЬНАЯ ЭНЕРГИЯ ВГВ

Для исследования характеристик активности ВГВ часто рассматриваются пространственные и временные характеристики плотности потенциальной энергии ВГВ, определяемой по колебаниям температуры [John and Kumar, 2012; Yigit et al., 2021].

Плотность потенциальной энергии (E_p) внутренних гравитационных волн считается крити-

ческой мерой активности ВГВ [Llamedo et al., 2019; Hindley et al., 2015], которая может быть использована для получения потока импульса, важного параметра для параметризации волн в численных моделях динамики верхней атмосферы:

$$E_p(z) = \frac{1}{2} \left(\frac{g}{N} \right)^2 \left(\frac{T'(z)}{\bar{T}(z)} \right)^2, \quad (4)$$

где g — ускорение свободного падения; N — частота Брента–Вайсяля; T' — возмущение температуры; \bar{T} — фоновая температура.

На рис. 5 представлены профили плотности потенциальной энергии на единицу массы, рассчитанные по формуле (4) для отдельных пролетов спутника над регионом, ограниченным широтами 52–55° N и долготами 15–21° E, в период 19–25 октября 2018 г. Измерения проводились приблизительно в одно время 22:30–23:40 UT. Дни 19 и 25 октября для данного региона соответствуют дню до и после исследуемого метеорологического шторма.

Анализ изменения плотности потенциальной энергии ВГВ показал, что в день до (19 октября) и после (25 октября) шторма значения E_p не превышают 200 Дж/кг, а колебания энергий выглядят как шумовые вариации. По мере усиления шторма над исследуемым регионом амплитуда вариаций потенциальной энергии увеличивается до 300–400 Дж/кг, а ее колебания структурируются на различных высотах, приобретая форму волновых пакетов. Так, 22 октября на профиле E_p формируются два максимума, центрированных на 55 и 82 км, которые затем уменьшаются (23 октября) и практически исчезают 24 октября. Одновременно в эти дни резко увеличивается амплитуда колебаний потенциальной энергии на высоте 95–100 км до 700–800 Дж/кг, что можно интерпретировать как следствие разрушения ВГВ.

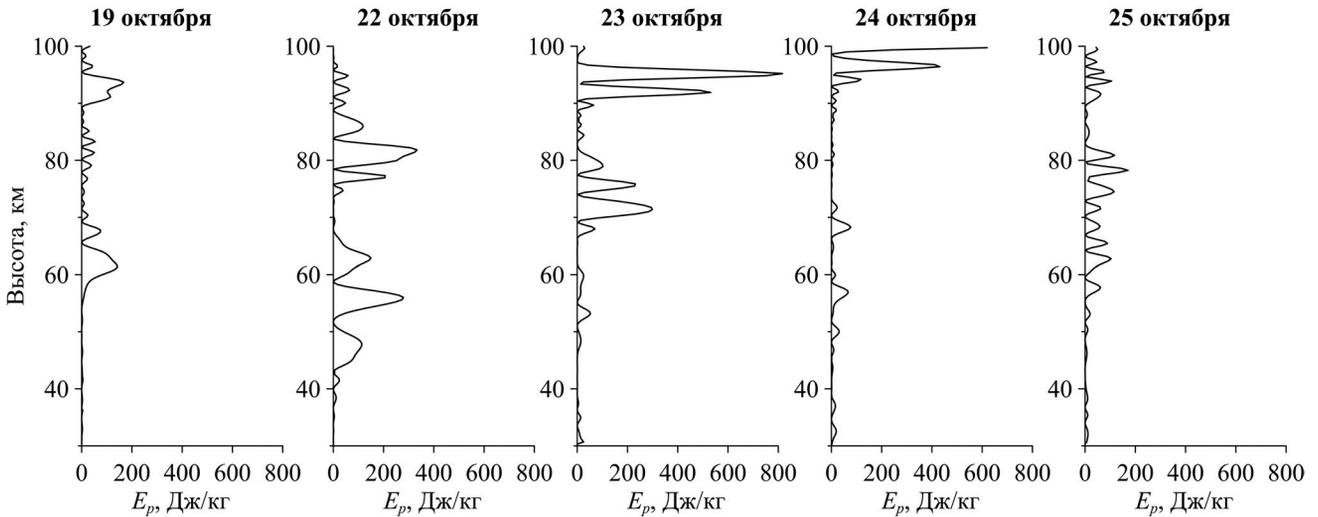


Рис. 5. Плотность потенциальной энергии ВГВ в области $52\text{--}55^\circ\text{ N}$ и $15\text{--}21^\circ\text{ E}$ для отдельных ночных пролетов спутника 19, 22–25 октября.

Для пространственного анализа плотности потенциальной энергии использовались профили температуры, полученные в наблюдениях TIMED/SABER в долготном регионе $10\text{--}20^\circ\text{ E}$ в ночное и дневное время (рис. 6). Рассматривался временной период, включающий дни метеорологического шторма, а также дни до и после шторма, которые характеризовались слабой метеорологической и геомагнитной активностью. На верхней панели рис. 6 представлены вариации E_p , соответствующие 20, 22, 23 и 31 октября 2018 г. в ночное время, а на нижней панели — 18, 23, 24 и 29 октября 2018 г. — в дневное время.

В метеорологически спокойные дни 18 и 20 октября, предшествующие шторму, плотность потенциальной энергии невелика и не превышает 300 Дж/кг . Из рис. 6 можно отметить присутствие двух областей на высотах $60\text{--}65\text{ км}$ и $80\text{--}83\text{ км}$ с увеличенными значениями E_p по сравнению со значениями в метеорологически спокойные дни. При этом максимум энерговыделения расположен на высотах $93\text{--}97\text{ км}$. Характерные горизонтальные размеры локальных максимумов E_p составляют около $400\text{--}500\text{ км}$. Температурные профили спутникового зондирования 22 октября, используемые для расчетов E_p , получены в $23:26\text{--}26:30\text{ UT}$, когда передний фронт шторма достиг 10° E (см. рис. 1). Во время метеорологического возмущения (22–24 октября) плотность потенциальной энергии увеличивается и на высотах $90\text{--}100\text{ км}$ достигает 500 Дж/кг . Расширяется и горизонтальная область волнового возмущения, которая максимальна 23 октября. Характерный размер этой области на высоте 92 км состав-

ляет 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.

5. ОБСУЖДЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Отмеченные в разделе 4 особенности поведения E_p связаны, на наш взгляд, с разрушением ВГВ на высотах нижней термосферы. Это согласуется с теоретическими расчетами уровней разрушения акустических и внутренних гравитационных волн, см, например, [Куницын и др., 2015; Кшевецкий и др., 2023].

Обрушение ВГВ и турбулизация нижней термосферы приводит к значительным тепловым и динамическим эффектам. Изменения в нейтральной составляющей верхней атмосферы приводят и к заметным изменениям ионосферных параметров.

Ранее в экспериментальных исследованиях было замечено, что ионосферные эффекты метеорологических возмущений проявляются, как правило, в формировании спорадических слоев в E -области ионосферы и понижении критических частот в $F2$ -слое ионосферы. Попытки моделирования ионосферных эффектов от метеорологических событий в тропосфере показали, что

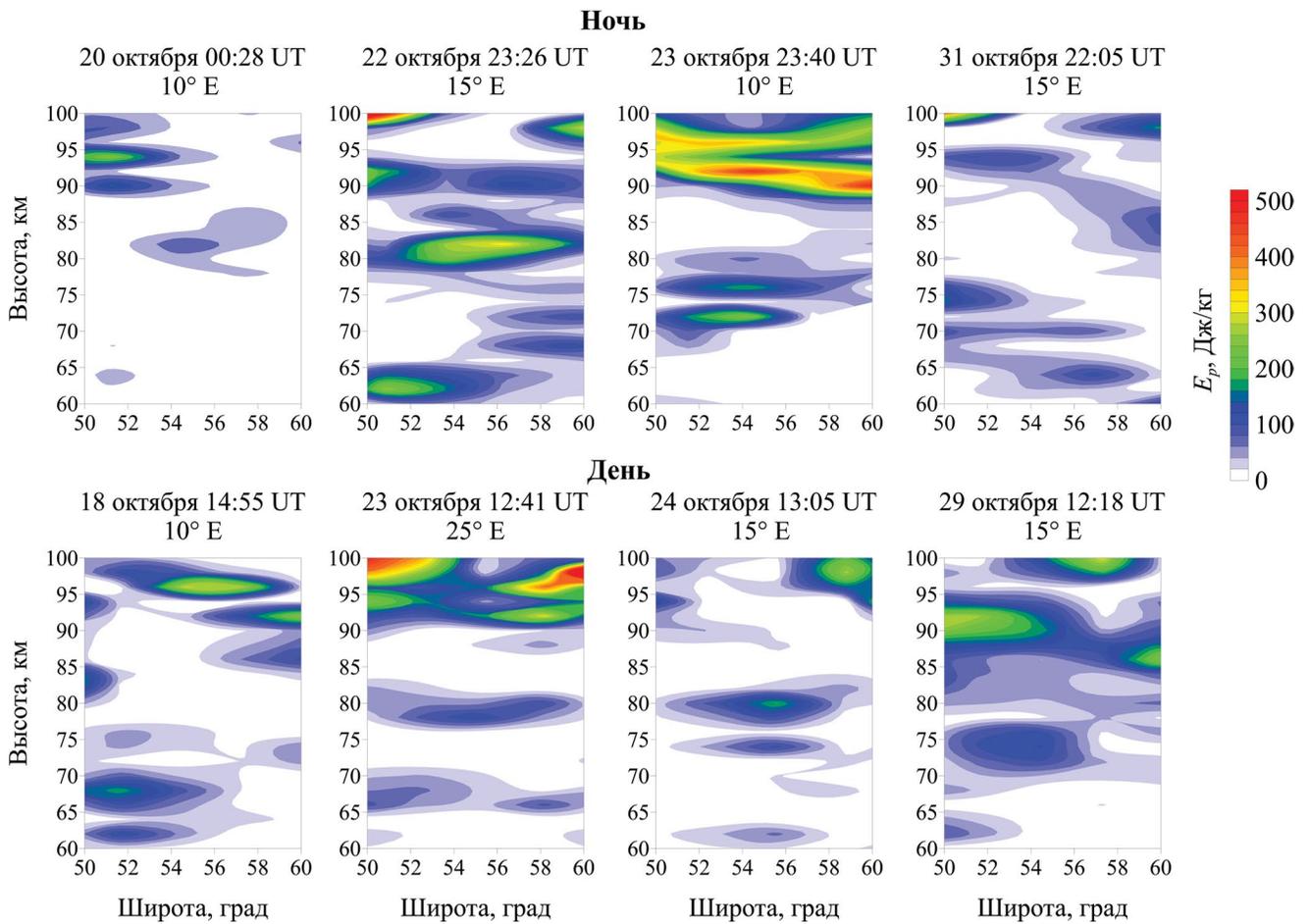


Рис. 6. Изменения потенциальной энергии ВГВ в различные дни октября 2018 г. в ночное время (верхняя панель) и в дневное время (нижняя панель).

включение только тепловых возмущений термосферы, вследствие диссипации волн, не позволяет воспроизвести количественные оценки наблюдаемых эффектов. В работе [Карпов и Васильев, 2020] сделано предположение, что существенное влияние на ионосферные возмущения могут оказывать турбулентные процессы в нижней термосфере, которые приводят к изменению газового состава среды.

ВГВ, распространяющиеся из области конвективных процессов в нижней атмосфере, в частности, метеорологического шторма, 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 [Walterscheid and Schubert, 1990; Fritts et al., 2003] волна становится неустойчивой и разрушается, образуя турбулентные области.

В работе [Бахметьева и др., 2021] представлены новые результаты исследования динамики атмосферы, которые дополняют ранее полученные данные по турбулентности и динамике нижней ионосферы. Уровень турбопаузы в интервале высот 88–110 км подвержен как быстрым, так и медленным изменениям. Высотные и временные вариации параметров нейтральной компоненты убедительно показали значительное влияние на них волновых процессов. Изменения параметров во времени происходят с периодичностью, характерной для ВГВ. На характеристики и свойства мезосферы и нижней термосферы существенное влияние оказывают турбулентность и атмосферные волны. Турбулентные образования играют важную роль в процессах нагрева атмосферы, перераспределения химических компонентов атмосферного аэрозоля, в разрушении и ослаблении ВГВ, а также в диссипации струйных течений в свободной атмосфере [Беляев, 2022].

6. 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 ее уменьшение на высотах 93–104 км.

Для анализа возмущения температуры нами был адаптирован метод выделения фоновой и возмущенной температуры на основе модовой декомпозиции (EMD) из данных измерений SABER. Возмущения температуры, связанные с модой IMF-1, рассматриваются нами как флуктуации температуры, связанные с распространением ВГВ. Проведенный далее вейвлет-анализ вертикальной структуры возмущений температуры показал, что в спектре ВГВ выделяются два диапазона волн с длинами 5–8 км и 14–18 км. Вблизи эпицентра метеорологического шторма амплитуда коротких ВГВ 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. Поведение ВГВ с длинами волн 14–18 км во время шторма более сложное и требует дополнительных исследований.

Рассчитанные значения плотности потенциальной энергии ВГВ (E_p) показали, что над областью метеорологического шторма на высотах мезопаузы и 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. Повышенное выделение потенциальной энергии ВГВ в периоды метеорологического шторма может приводить к изменению вертикальной структуры температуры, что отчетливо заметно в измерениях SABER/TIMED. Можно предположить, что такие изменения обусловлены усилением турбулентных процессов вследствие повышения волновой активности ВГВ в нижней термосфере.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

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

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бахметьева Н.В., Григорьев Г.И., Виноградов Г.Р., Жемьяков И.Н., Калинина Е.Е., Першин А.В. Параметры атмосферной турбулентности и динамика нижней ионосферы в исследованиях на стенде СУРА // Геомагнетизм и аэронавигация. Т. 61. №6. С. 777–793. 2021. doi 10.31857/S0016794021060031
- Бахметьева Н.В., Григорьев Г.И., Калинина Е.Е. Акустико-гравитационные волны в условиях неоднородного профиля температуры нейтральной компоненты в атмосфере Земли // Хим. физика. Т. 41. № 5. С. 441–52. 2022. doi 10.31857/S0207401X22050028
- Бахметьева Н.В., Жемьяков И.Н., Григорьев Г.И., Калинина Е.Е. Влияние природных факторов на температуру нижней термосферы // Хим. физика. Т. 42. № 10. С. 50–63. 2023. doi 10.31857/S0207401X23100023
- Беляев А.Н. Механизм формирования в атмосфере земли мезомасштабных пульсирующих струйных течений // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. Т. 58. № 3. С. 344–351. 2022. doi 10.31857/S0002351522030038
- Борчевкина О.П., Карпов И.В., Карпов М.И. и др. Ионосферные возмущения, обусловленные прохождением метеорологического шторма в Калининграде в октябре 2018 г. // Радиотехника. 2020. Т. 84. № 2. С. 37–41. doi 10.18127/j00338486-202002(04)-06
- Григорьев Г.И. Акустико-гравитационные волны в атмосфере Земли (Обзор) // Изв. вузов. Радиофизика. Т. 42. № 1. С. 3–24. 1999.
- 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. Т. 2. № 2. С. 64–68. 2016. doi 10.12737/18653
- Карпов И.В., Васильев П.А. Возмущения ионосферы, обусловленные воздействием локализованных термосферных источников // Геомагнетизм и аэронавигация. Т. 60. №4. С. 496–501. 2020. doi 10.31857/S0016794020040069
- Карпов М.И., Карпов И.В., Борчевкина О.П. и др. Возмущения ионосферы во время метеорологических штормов // Геомагнетизм и аэронавигация. Т. 60. № 5. С. 646–654. 2020. doi 10.31857/S0016794020050107
- Коршунов В.А., Зубачев Д.С. Определение параметров волновых возмущений средней атмосферы по данным лидарных измерений // Оптика атмосферы и океана. Т. 28. № 11. С. 993–1002. 2015. doi 10.15372/AO20151106

- 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. Т. 59. № 1. С. 44–54. 2023. 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. № 6. С. 112–119. 2015.
- Федоренко А.К., Беспалова А.В., Жук И.Т., Крючков Е.И. Широтные особенности акустико-гравитационных волн в верхней атмосфере по данным спутниковых измерений // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 57. № 4. С. 510–521. 2017. doi 10.7868/S0016794017030051
- Шалимов С.Л., Захаров В.И., Соловьева М.С. и др. Волновые возмущения нижней и верхней ионосферы во время тропического циклона Фахаі 2019 г. // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 63. № 2. С. 216–226. 2023. doi 10.31857/S0016794022600442
- Шалимов С.Л., Соловьева М.С. Отклик ионосферы на прохождение тайфунов по наблюдениям методом СДВ-радиопросвечивания // Солнечно-земная физика. Т. 8. № 3. С. 54–61. 2022. doi 10.12737/szf-83202208
- Baumgarten K., Gerding M., Baumgarten G., Lübken F.J. Temporal variability of tidal and gravity waves during a record long 10-day continuous lidar sounding // Atmos. Chem. Phys. V. 18. № 1. P. 371–384. 2018. doi 10.5194/acp-18-371-2018
- Borchevskina 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. V. 12. № 9. P. 1116. 2021. doi 10.3390/atmos12091116
- Fritts D.C., Alexander M.J. Gravity wave dynamics and effects in the middle atmosphere // Rev. Geophys. V. 41. № 1. P. 3–64. 2003. doi 10.1029/2001RG000106
- 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. V. 108. № D8. 2003. doi 10.1029/2002JD002406
- Garcia R.R., Lieberman R., Russell J.M., Mlyneczek M.G. Large-scale waves in the mesosphere and lower thermosphere observed by SABER // J. Atmos. Sci. V. 62. № 12. P. 4384–4399. 2005. doi 10.1175/JAS3612.1
- Hindley N.P., Wright C.J., Smith N.D., Mitchell N.J. The southern stratospheric gravity wave hot spot: individual waves and their momentum fluxes measured by COSMIC GPS-RO // Atmos. Chem. Phys. V. 15. Is. 14. P. 7797–7818. 2015. doi 10.5194/acp-15-7797-2015
- Huang N.E., Shen Z., Long S.R. et al. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis // Proc. R. Soc. Lond. A. V. 454. P. 903–995. 1998. doi 10.1098/rspa.1998.0193
- John S.R., Kumar K.K. TIMED/SABER observations of global gravity wave climatology and their interannual variability from stratosphere to mesosphere lower thermosphere // Clim. Dynam. V. 39. P. 1489–1505. 2012. doi 10.1007/s00382-012-1329-9
- 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. V. 38. № 1. P. 73–93. 2020. doi 10.5194/angeo-38-73-2020.
- Llamedo P., Salvador J., de la Torre A. et al. 11 Years of Rayleigh lidar observations of gravity wave activity above the southern tip of South America // J. Geophys. Res. Atmos. V. 124. Is. 2. P. 451–467. 2019. doi 10.1029/2018JD028673
- Medvedev A.S., Yiğit E. Gravity waves in planetary atmospheres: Their effects and parameterization in global circulation models // Atmosphere. V. 10. P. 531. 2019. doi 10.3390/atmos10090531
- Mlyneczek M. A comparison of space-based observations of the energy budgets of the mesosphere and the troposphere // J. Atmos. Sol. Terr. Phys. V. 64. № 8–11. P. 877–887. 2002. doi 10.1016/S1364-6826(02)00043-3
- Mosna Z., Kouba D., Koucka Knizova P. et al. Ionospheric storm of September 2017 observed at ionospheric station Pruhonice, the Czech Republic // Adv. Space Res. V. 65. № 1. P. 115–128. 2020. doi 10.1016/j.asr.2019.09.024
- Nayak C., Yiğit E. Variation of small-scale gravity wave activity in the ionosphere during the major sudden stratospheric warming event of 2009 // J. Geophys. Res. V. 124. P. 470–488. 2019. doi 10.1029/2018JA026048
- Nigussie M., Moldwin M., Yizengaw E. Investigating the role of gravity waves on equatorial ionospheric irregularities using TIMED/SABER and C/NOFS satellite observations // Atmosphere. V. 13. № 9. P. 1414. 2022. doi 10.3390/atmos13091414
- Plougonven R., Zhang F. Internal gravity waves from atmospheric jets and fronts // Rev. Geophys. V. 52. № 1. P. 33–76. 2014. doi 10.1002/2012RG000419
- 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. V. 113. Is. D17. P. D17101. 2008. doi 10.1029/2008JD010013
- Sakib M.N., Yiğit E. A Brief overview of gravity wave retrieval techniques from observations // Front. Astron. Space Sci. V. 9 Art. 824875. P. 1–9. 2022. doi 10.3389/fspas.2022.824875
- Savitzky A., Golay M. J. E. Smoothing and differentiation of data by simplified least squares procedures // Anal. Chem. V. 36. P. 1627–1639. 1964. doi 10.1021/ac60214a047
- Strelnikova I., Almowafy M., Baumgarten G. et al. Seasonal cycle of gravity wave potential energy densities from lidar and satellite observations at 54° and 69°N // J. Atmos. Sci. V. 78. P. 1359–1386. 2021. doi 10.1175/JAS-D-20-0247.1
- Walterscheid R.L., Schubert G. Nonlinear evolution of an upward propagating gravity wave: overturning, convection, transience and turbulence // J. Atmos. Sci. V. 47. P. 101–125. 1990. doi 10.1175/1520-0469(1990)047<0101:NEOAUP>2.0.CO;2

– Wang L., Geller M.A., Alexander M.J. Spatial and temporal variations of gravity wave parameters. part I: Intrinsic frequency, wavelength, and vertical propagation direction // J. Atmos. Sci. V. 62. P. 125–142. 2005. doi 10.1175/JAS-3364.1

– Yiğit E., Medvedev A.S., Ern.M. Effects of latitude-dependent gravity wave source variations on the middle and upper atmosphere // Front. Astron. Space Sci. V. 7. Art. 614018. P. 1–17. 2021. doi 10.3389/fspas.2020.614018

Gravity Waves Activity in the Mesosphere and Lower Thermosphere During a Meteorological Storm

O. P. Borchevkina^{1,*}, F. S. Bessarab¹, A. V. Timchenko¹, I. V. Karpov¹

¹*Kaliningrad division of Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation, Russian Academy of Sciences, Kaliningrad, Russia*

**e-mail: olga.borchevkina@mail.ru*

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. A method based on mode decomposition from SABER data was adapted to calculate the gravity waves potential energy density and to separate the temperature perturbations due to their propagation at lower thermospheric heights. 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.