
ХИМИЧЕСКАЯ ФИЗИКА
АТМОСФЕРНЫХ ЯВЛЕНИЙ

УДК 551.510.535

ВЕРТИКАЛЬНОЕ РАСПРОСТРАНЕНИЕ АКУСТИКО-ГРАВИТАЦИОННЫХ ВОЛН ИЗ НИЖНЕЙ АТМОСФЕРЫ В ПЕРИОД СОЛНЕЧНОГО ЗАТМЕНИЯ

© 2020 г. Ю. А. Дьяков¹, Ю. А. Курдяева², О. П. Борчевкина^{2,3}, И. В. Карпов^{2,3}, С. О. Адамсон¹, Г. В. Голубков^{1,4}, О. А. Ольхов¹, В. Д. Песков¹, А. И. Родионов¹, И. П. Родионова¹, В. Л. Шаповалов¹, Д. В. Шестаков¹, М. Г. Голубков^{1*}

¹Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н.Н. Семёнова
Российской академии наук, Москва, Россия

²Калининградский филиал Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн
им. Н.В. Пушкова Российской академии наук, Калининград, Россия

³Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград, Россия

⁴Национальный исследовательский центр “Курчатовский институт”, Москва, Россия

*E-mail: golubkov@chph.ras.ru

Поступила в редакцию 16.04.2019;

после доработки 27.06.2019;

принята в печать 22.07.2019

В настоящей работе представлены результаты анализа численного эксперимента по генерации в нижней атмосфере акустико-гравитационных волн (АГВ) и их распространению в верхнюю атмосферу. В качестве источника волн рассмотрены наблюдаемые вариации атмосферного давления в период прохождения солнечного затмения 20 марта 2015 года над Калининградом (54° N, 20° E). Результаты расчетов показали, что прохождение солнечного затмения сопровождается в нижней атмосфере повышением волновой активности в диапазоне АГВ с периодами ~4–20 мин. В верхней атмосфере, на высотах ~200 км, вследствие диссипации АГВ, приходящих из нижней атмосферы, формируются распространяющиеся возмущения с характерными периодами ~50 мин. Направление распространения таких возмущений противоположно направлению распространения области солнечного затмения вдоль поверхности Земли. Результаты численного эксперимента качественно согласуются с результатами наблюдений ионосферных возмущений в период солнечного затмения 20 марта 2015 года.

Ключевые слова: ионосфера, лидар, акустико-гравитационные волны, солнечное затмение, математическое моделирование.

DOI: 10.31857/S0207401X20040068

ВВЕДЕНИЕ

В экспериментальных исследованиях выявлены ионосферные возмущения, возникающие в периоды развития мощных динамических процессов в нижней атмосфере и на поверхности Земли. Ионосферная реакция на такие события проявляется в формировании перемещающихся ионосферных возмущений, возмущений электрических полей, оптических эмиссий и т.д. Ионосферные возмущения, в свою очередь, влияют на процессы распространения радиоволн в различных частотных диапазонах, существенно снижая функциональные возможности систем радиосвязи, навигации и позиционирования, включая спутниковые системы. До настоящего времени физические процессы, реализующие связи динамических процессов в нижней атмосфере и ионосфере, остаются недостаточно изученными. Гипотезы о механизмах воздействия процессов в

нижней атмосфере на состояние верхней атмосферы и ионосферы основываются главным образом на представлениях о волновом характере этих связей. Основное внимание при этом уделяется акустико-гравитационным волнам (АГВ), которые могут распространяться из нижней атмосферы до высот термосферы и в значительной мере определять реакцию ионосферы. Источниками таких волн в нижней атмосфере являются процессы, связанные с развитием метеорологических возмущений, возмущений сейсмической активности, а также с прохождением солнечного терминатора и солнечного затмения.

В многочисленных теоретических исследованиях различные вопросы генерации, распространения и влияния АГВ на состояние атмосферы изучены достаточно подробно [1]. Однако в большинстве работ рассматриваются упрощенные ситуации, в которых, как правило, либо пренебрега-

ется процессами взаимодействия волн между собой и фоновым состоянием атмосферы, либо не учитывается реальная стратификация атмосферы. Длительное время такие упрощения определялись недостаточным развитием численных методов решения уравнений гидродинамики (с учетом широкого спектра изучаемых волновых процессов), недостаточностью знаний начальных и граничных условий, неточностью описания источников возмущений, отсутствием необходимых вычислительных мощностей.

В настоящее время развитие вычислительной техники и совершенствование методов численного интегрирования уравнений гидродинамики дали возможность создать модели атмосферы, которые позволяют эффективно исследовать нелинейные и диссипативные процессы, в том числе распространение АГВ в атмосфере с учетом ее реальной стратификации (см., например, [2–4]). Однако важной проблемой при моделировании процессов генерации и распространения АГВ остается описание источников возмущений и граничных условий. Современные системы наблюдений параметров атмосферы позволяют определять вариации параметров атмосферы с высоким временным разрешением, что дает возможность непосредственно применять данные наблюдений в модельных исследованиях. Так, например, в работе [5] доказана корректность задачи о генерации и распространении атмосферных волн, в которой в качестве источника волн рассматриваются вариации давления на нижней границе численной модели. Результаты численного моделирования атмосферных возмущений, генерируемых метеорологическим процессом, с включением экспериментальных данных о вариациях приземного давления в московском регионе представлены в [6].

Цель настоящей работы состоит в изучении волновых возмущений верхней атмосферы, вызванных наблюдаемыми вариациями атмосферного давления в приземной атмосфере в период прохождения солнечного затмения.

ОПИСАНИЕ ЧИСЛЕННОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

Численный эксперимент был выполнен с применением двумерной версии модели высокого разрешения “AtmoSym” [7–9]. Модель позволяет разрешать процессы различных масштабов, в том числе инфразвуковых, поэтому ее использование является эффективным инструментом при исследовании характеристик атмосферных волн, генерируемых различными источниками [10–12]. В теоретических исследованиях процессов распространения АГВ в верхнюю атмосферу было показано, что волны с периодами инфразвуковых волн и периодами, близкими к периоду Вайсяля–Брента могут распространяться до высот ионосферы [13, 14].

В численном эксперименте, рассматриваемом в этой работе, источником возбуждения АГВ являются ежеминутные вариации атмосферного давления на нижней границе численной модели, заданной на поверхности Земли. Для нахождения амплитуды вариаций давления использовались результаты лидарного зондирования нижней атмосферы, выполненные в Калининграде (54° N, 20° E) 20.03.2015 г. в день прохождения солнечного затмения [15]. Время прохождения утреннего терминатора в этот день – 6:40 LT. Основная фаза затмения началась в 10:50 LT и закончилась в 13:10 LT. Максимальное перекрытие солнечного диска составило 70%. Лидарные наблюдения проводились в период с 6:00 до 18:00 LT. В наблюдениях определялась интенсивность рассеянного в нижней атмосфере лидарного сигнала. Предполагается, что вариации интенсивности лидарного сигнала отражают частотные характеристики вариаций давления на фиксированной высоте. Амплитудные значения вариаций давления рассчитывались согласно предположению, что максимальные амплитуды изменений наблюдаемой интенсивности рассеянного сигнала соответствуют амплитудам вариаций давления $p_{max} = 10$ мм рт.ст. Такие изменения давления в течение суток характерны для весенних условий в Калининграде:

$$p(t) = I(t) \frac{p_{max}}{I_{max}}, \quad (1)$$

где t – время, $I(t)$, I_{max} – значение интенсивности рассеянного лидарного сигнала в момент времени t и максимальное значение амплитуды рассеянного лидарного сигнала. Таким образом, амплитуды вариаций давления на нижней границе численной модели составляли ~1% от фоновых значений. Косвенное определение амплитуды вариаций давления, очевидно, влияет на реальные значения амплитуды давления, но не изменяет частотные характеристики вариаций.

Численные расчеты проводились в пространственной области с размерами 2000 км по горизонтали и 500 км по вертикали. Для задания граничных условий на нижней границе расчетной области предполагалось, что наблюдаемые вариации давления в нижней атмосфере создаются подвижными источниками (солнечный терминатор и солнечное затмение), распространяющимися вдоль нижней границы со скоростью $V = 270$ м/с солнечного терминатора на широте Калининграда:

$$\begin{aligned} P(z = 0, x, t) &= p(\tau), \quad \tau = Vt - x > 0, \\ P(z = 0, x, t) &= 0, \quad \tau = Vt - x < 0. \end{aligned} \quad (2)$$

Здесь x – горизонтальная координата, t – время, z – высота, $p(\tau)$ – рассчитанные по (1) возмущения давления в момент времени τ . Таким образом, передний фронт источника возмущений на нижней границе пересекает область интегрирования за ~2 ч. В качестве начальных условий исполь-

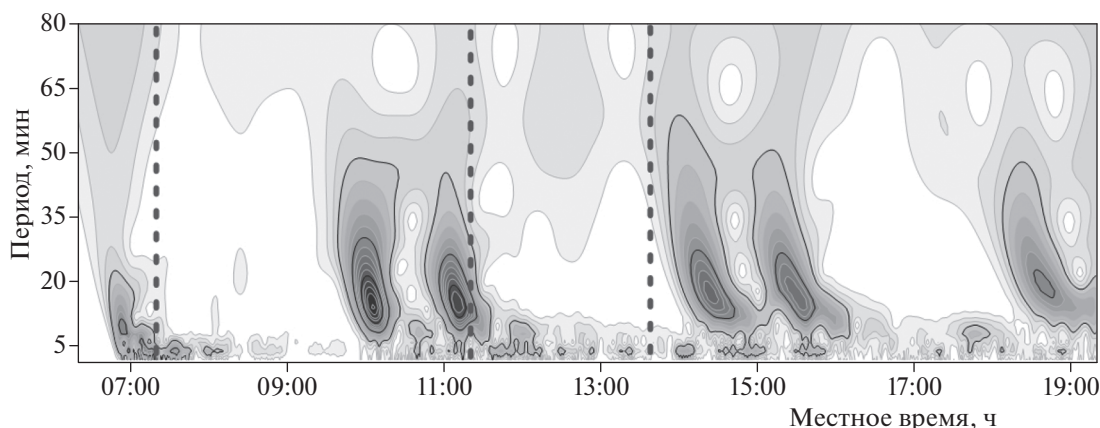


Рис. 1. Результат вейвлет-анализа рассчитанных значений температуры вблизи нижней границы численной модели (высота — 1 км, $x = 500$ км). Штриховыми линиями показано время прохождения утреннего солнечного терминатора и основной фазы солнечного затмения.

зованы распределения атмосферных параметров, заданные по эмпирической модели MSIS [16].

Для определения частотных характеристик вариаций, полученных в расчетах моделируемых параметров, применялся вейвлет-анализ. Методы вейвлет-анализа широко применяются для обработки и анализа нестационарных во времени и неоднородных в пространстве сигналов [17]. Результаты такого анализа позволяют получить информацию о распределении энергии в спектре сигнала и времени появления различных частотных составляющих. Коэффициенты вейвлет-преобразования вычисляются следующим образом:

$$W(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt, \quad (3)$$

где $f(t)$ — вариации моделируемых параметров, t — время; $\psi(\lambda) = e^{i\pi\lambda} e^{-\lambda^2/2}$ — выбранный анализирующий вейвлет Морле; a и b — параметры масштаба и сдвига вейвлета. Вейвлет Морле удобен для анализа коротких пугов волн, которые, предположительно, должны проявляться в атмосфере в периоды действия локализованных во времени источников.

На рис. 1 представлены результаты вейвлет-анализа возмущений температуры непосредственно вблизи нижней границы численной модели, на высоте 1 км, в точке с координатой $x = 1500$ км. Частотные характеристики вариаций на этой высоте отражают вариации параметров на нижней границе модели. Вертикальными штриховыми линиями на рис. 1 показаны времена прохождения солнечного терминатора, начала и конца затмения в точке $x = 1500$ км. Видно, что во время прохождения солнечного терминатора, включая периоды после начала затмения и перед его окончанием, на нижней границе численной модели отчетливо проявляется усиление волновой активности в диапазоне акустико-гравитационных волн с периодами в 2–4 мин и внутренних гравитационных волн

(ВГВ) с периодами ~ 10 мин. Согласно теоретическим представлениям, такие волны должны быстро и практически вертикально распространяться в верхнюю атмосферу.

На рис. 2 показаны возмущения значений температуры на высоте 94 км в точках с горизонтальной координатой $x = 500, 1000$ и 1500 км. Как видно из этого рисунка, в нижней термосфере амплитудные характеристики возмущений температуры весьма незначительны, однако отчетливо прослеживается их повышение при прохождении утреннего терминатора. Эти возмущения появились за ~ 30 мин перед прохождением терминатора и продолжались в течение ~ 1 ч после его прохождения. В период с 9 до 11 ч местного времени возмущения температуры проявляются в точках с координатами $x = 1000$ и 1500 км. При этом возмущения раньше появляются в точке $x = 1500$ км и позднее — в точках с $x = 1000$ и 500 км. Похожие возмущения отмечаются и после начала солнечного затмения в период 14–15 ч. Ранний всплеск возмущений отмечается в точке с $x = 1500$ км через полчаса после начала затмения. В точках с координатами $x = 1000$ и 500 км начало увеличения амплитуды возмущений смещается ближе к окончанию затмения ($x = 1000$ км) и совпадает с временем его окончания при $x = 500$ км. После окончания затмения (в 16–17 ч) над точкой с координатой $x = 500$ км отмечается повышение амплитуд возмущений. С ростом x оно смещается к более позднему времени. В следующий период (в 18–19 ч) также отмечается повышение амплитуды возмущений, которое появляется над точкой с $x = 1500$ км и смещается с течением времени к точкам с меньшими значениями x .

Таким образом, на высотах нижней термосферы в периоды прохождения солнечного терминатора и затмения возникают возмущения параметров преимущественно с малыми периодами (4–20 мин). При этом возникают как “стационарные” возмущения, непосредственно связанные с временем

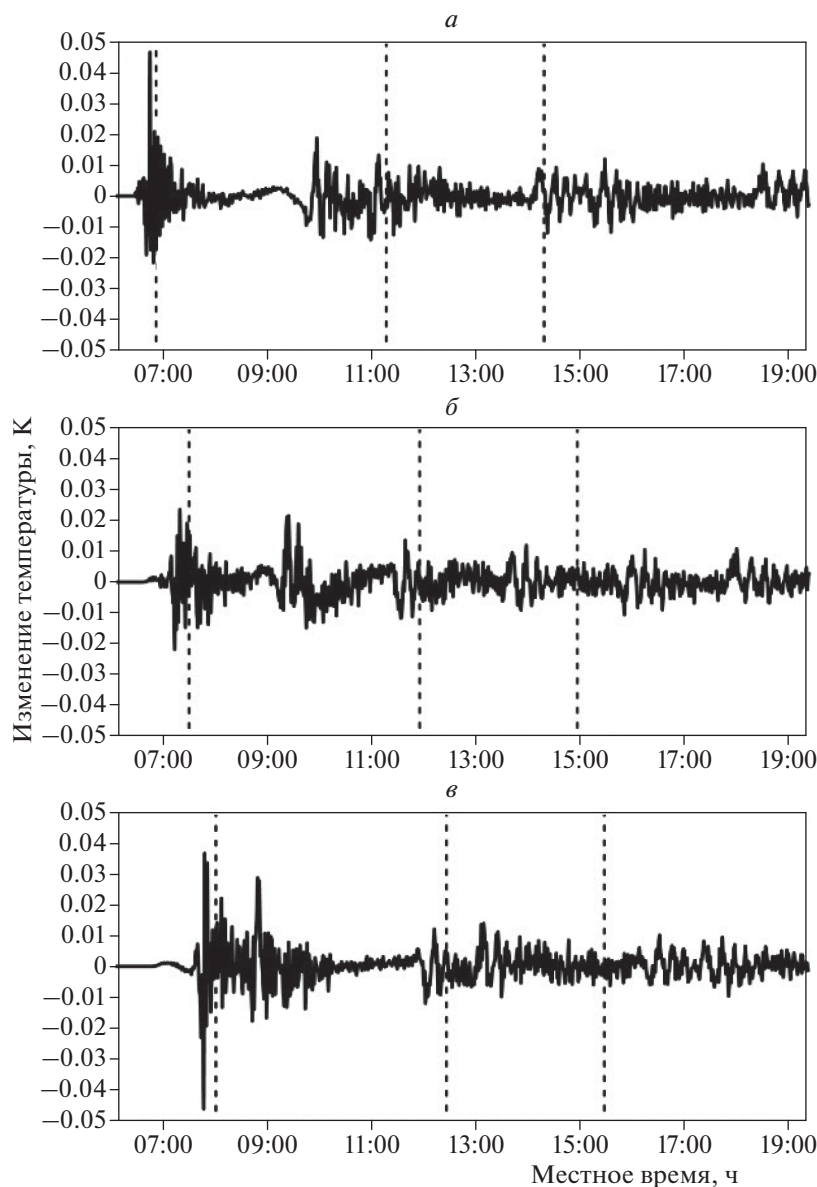


Рис. 2. Возмущение температуры на высоте 94 км в точках с горизонтальной координатой $x = 500$ км, (а), 1000 км (б) и 1500 км (в). Вертикальными линиями отмечены моменты прохождения солнечного терминатора, начала и конца солнечного затмения.

прохождения терминатора и затмения, так и “перемещающиеся” возмущения, распространяющиеся как в сторону движения источника возмущений (6–9 и 16–17 ч), так и в противоположном направлении (9–15 ч).

На высотах верхней термосферы возмущения температуры носят более сложный характер (рис. 3). Главная особенность временной изменчивости температуры состоит в появлении достаточно продолжительных возмущений с периодами ~50 мин. Эти возмущения появляются за полчаса-час перед прохождением солнечного терминатора и сохраняются до окончания солнечного затмения. После прохождения терминатора и до начала

солнечного затмения отмечаются максимальные возмущения температуры, причем время их появления над различными точками вдоль горизонтальной оси увеличивается с уменьшением горизонтальной координаты и, следовательно, возмущения распространяются в противоположном направлении по отношению к направлению смещения области солнечного терминатора и солнечного затмения. В период прохождения солнечного затмения сохраняется такая же тенденция. В точке с координатой $x = 1500$ км повышение амплитуды возмущений начинается за полчаса до начала затмения и достигает максимума с его началом. В точках с координатами $x = 500$ и 1000 км время достиже-

ния максимальных амплитуд возмущений смещается соответственно на 1 ч и 30 мин относительно начала затмения. Быстрые осцилляции возмущений с малыми периодами (5–15 мин) отмечаются в течение всего периода моделирования. Однако заметный вклад в динамику возмущений отмечается только после окончания солнечного затмения.

Результаты численных расчетов показывают, что возмущения приземной атмосферы в период прохождения солнечного терминатора и солнечного затмения вызывают возмущения параметров верхней атмосферы. В нижней термосфере (рис. 2) преимущественно отмечаются вариации параметров среды с малыми периодами ~4–10 мин. Наряду с возмущениями, появляющимися в период прохождения солнечного терминатора и затмения, отмечается появление перемещающихся возмущений, распространяющихся как в направлении движения области терминатора и затмения, так и в противоположном направлении. В верхней термосфере (рис. 3) появляются распространяющиеся возмущения с периодами ~50 мин. Направление распространения таких возмущений противоположно направлению движения области солнечного терминатора и затмения.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБУЖДЕНИЕ

Спектральный анализ возмущений температуры термосферы в период моделирования показал, что частотные спектры в различных точках вдоль области интегрирования весьма схожи между собой на периодах до 20 мин. При этом проявляются вариации с периодами АГВ (менее 4 мин) и короткопериодные ВГВ (более 8–10 мин). Как видно из рис. 2, 3, вариации с малыми периодами проявляются непосредственно во время прохождения солнечного терминатора и затмения. В теоретических исследованиях отмечается [17, 18], что волны этого частотного диапазона распространяются практически вертикально, чем и объясняется сходное их проявление в вариациях температуры в различных точках вдоль горизонтальной оси области интегрирования. Для волн с периодами более 20 мин в спектрах вариаций проявляются значительные различия в амплитудах гармоник, что объясняется более сложным характером распространения таких волн в атмосфере. На рис. 4 показаны результаты вейвлет-анализа вариаций температуры в течение периода моделирования. Как видно из рис. 4, время появления вариаций с периодами ~4–20 мин в различных точках вдоль области интегрирования отчетливо совпадает с временами прохождения солнечного терминатора, началом и окончанием затмения. Это, очевидно, обусловлено вертикальным распространением волн этого частотного диапазона. В работе [19] было показано, что волны с периодом меньше периода Вайсяля–Брента в верхней атмосфере могут за-

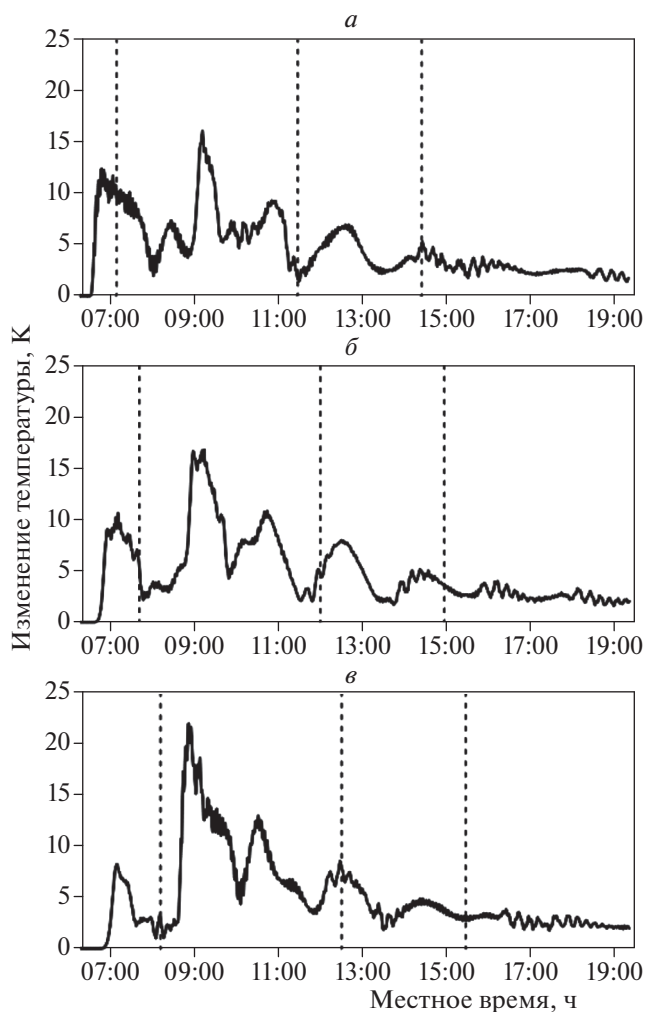


Рис. 3. То же, что и на рис. 2, на высоте 293 км.

хватываться в волновод на высотах термосферы и распространяться практически горизонтально. На рис. 4 волноводный характер распространения волн прослеживается для вариаций с периодами в 8–10 мин. При этом составляющие вариаций распространяются как в сторону движения области солнечного терминатора, так и в противоположном направлении. На высотах верхней атмосферы отмечается появление возмущений с периодами ~50 мин. В теоретических исследованиях [20–22] было показано, что диссипация АГВ приводит к значительным изменениям состояния термосферы, проявляющимся в возникновении локальных областей нагрева термосферы над источниками АГВ. Высота, до которой АГВ могут проникать в термосферу, зависит от их периода. Результаты расчетов показывают, что продолжительность периода повышения активности короткопериодных составляющих вариаций термосферы составляет ~1 ч (рис. 4). Следовательно, можно предположить, что появление вариаций с периодами ~50 мин в термосфере определяется процессами диссипа-

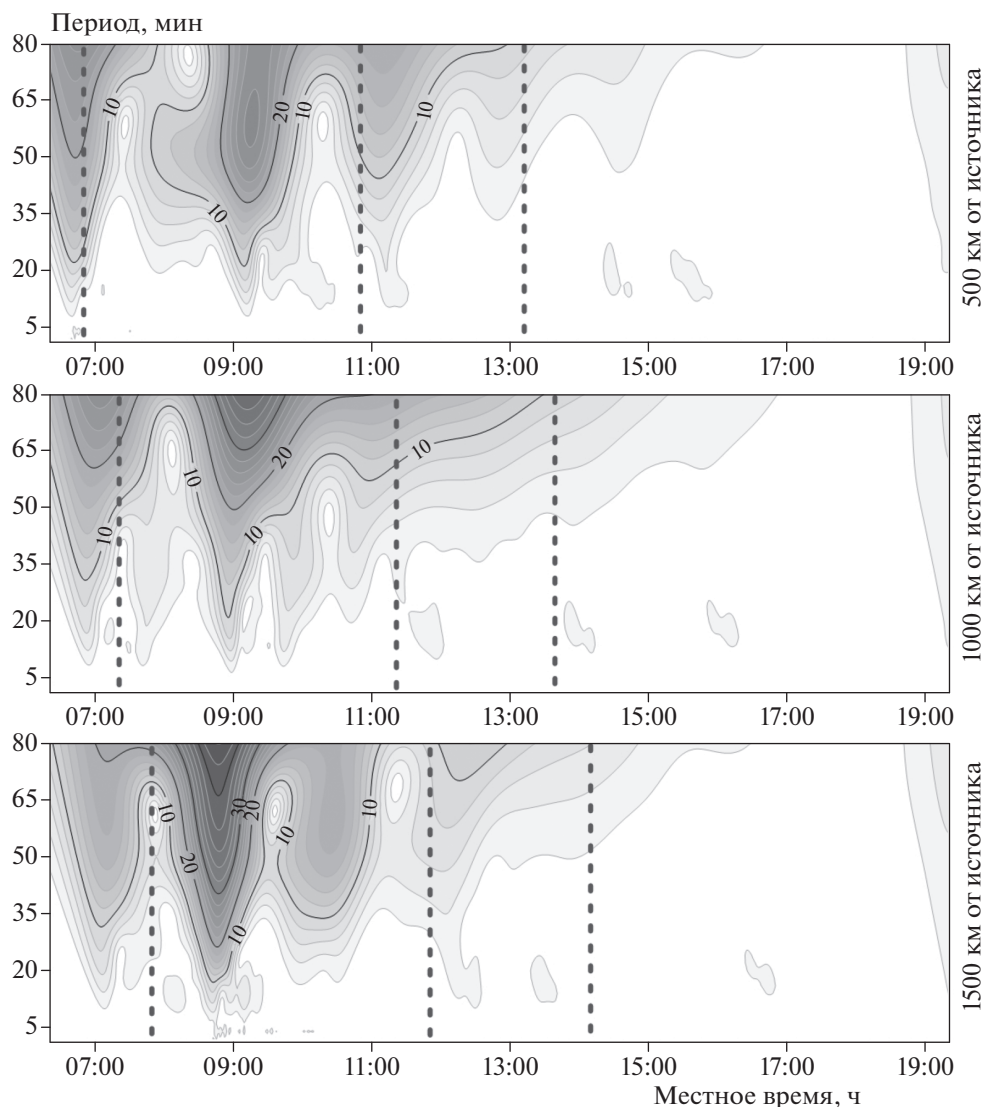


Рис. 4. Результат вейвлет-анализа возмущений температуры на высоте 293 км.

ции коротких волн в термосфере. Важная особенность таких возмущений состоит в том, что направление их смещения противоположно направлению движения области терминатора и солнечного затмения.

Таким образом, акустико-гравитационные волны, распространяющиеся из нижней атмосферы в периоды прохождения солнечного терминатора и солнечного затмения, формируют возмущения на высотах термосферы. Частотные характеристики возмущений термосферы определяются как АГВ, распространяющимися из нижней атмосферы, так и волнами, возбуждаемыми непосредственно в термосфере вследствие диссипации волн, пришедших из нижней атмосферы. Временная изменчивость параметров термосферы формируется вследствие суперпозиции различных составляющих вариаций, распространяющихся в противоположных направлениях. Это приводит к существенному

усложнению временной изменчивости параметров термосферы после прохождения основных источников возмущений — солнечного терминатора и затмения (см. рис. 3).

Из проведенных расчетов следует, что при солнечных затмениях волновая активность в инфразвуковом диапазоне волн с периодами в 3–5 мин и внутренних гравитационных волн с периодами до 60–80 мин усиливается. Вместе с тем в наблюдениях динамики ионосферы в период солнечного затмения в 20.03.2015 отмечено появление распространяющихся возмущений с характерным периодом ~50 мин [23]. Эти возмущения в регионе, ограниченном 44–50° с.ш. и 13–19° в.д., близком к положению ст. Калининград, распространялись в юго-восточном направлении, противоположном по отношению к движению области солнечного затмения, а в долготном секторе 2–8° з.д. направление их распространения совпадало с направле-

нием движения области затмения. Причиной такой реакции ионосферы могут быть процессы в термосфере, развивающиеся в период прохождения солнечного затмения. В работе [24] показано, что резкое уменьшение потоков солнечного излучения приводит к возникновению обширной области пониженных давления и температуры в термосфере и к развитию циркуляционных процессов. Вследствие этого ионосферная реакция на прохождение затмения будет зависеть от положения пункта наблюдения относительно этой области.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты численного эксперимента по моделированию возмущений параметров термосферы вследствие АГВ, возбуждаемых в нижней атмосфере в периоды прохождения солнечного терминатора и солнечного затмения 20 марта 2015 года, показали, что:

1) в нижней атмосфере в период солнечного затмения усиливаются процессы генерации АГВ с периодами 4–10 мин;

2) такие АГВ, распространяясь практически вертикально, достигают высот термосферы и вследствие процессов диссипации волн возбуждают крупномасштабные возмущения с характерным периодом ~50 мин, распространяющиеся в противоположном направлении по отношению к направлению перемещения области терминатора солнечного затмения;

3) характерные особенности термосферных возмущений, вызываемых солнечным затмением, подтверждаются результатами экспериментальных исследований динамики ионосферы.

Заметим также, что комплексное исследование воздействия АГВ и ВГВ на ионосферу Земли способствует решению глобальной проблемы — поиска путей прогнозирования землетрясений, включая определение момента наступления, возможных координат и их энергии. Исследователями обнаружен ряд природных явлений, которые можно рассматривать в качестве их предвестников. К ним относятся, например, изменения, происходящие в ионосфере Земли вследствие выбросов радиоактивного радона в областях сжатия и его последующего распада с образованием быстрых α -частиц [25]. Ударная ионизация атмосферных молекул азота и кислорода этими частицами может приводить к заметному увеличению концентрации электронов на высотах 80–110 км над поверхностью Земли, где в основном происходит задержка сигналов GPS и возникают ошибки позиционирования систем спутниковой навигации [26–29].

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема 0082-2019-0017, регистрационный номер № АААА-А19-119010990034-5).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Григорьев Г.И. // Изв. вузов. Радиофизика. 1999. Т. 42. № 1. С. 3.
2. Kshevetskii S.P. // Nonlin. Proc. Geophys. 2001. V. 8. № 1–2. P. 37.
3. Hickey M.P., Schubert G., Walterscheid R.L. // J. Geophys. Res. Space Phys. 2001. V. 106. № A10. P. 21543.
4. Fritts D.C., Alexander M.J. // Rev. Geophys. 2003. V. 41. № 1. 1003.
5. Ахмедов Р.Р., Куницын В.Е. // Геомагнетизм и аэронавигация. 2004. Т. 44. № 1. С. 105.
6. Kurdyeva Y.A., Kshevetskii S., Gavrilov N.M. et al. // Pure Appl. Geophys. 2018. V. 175. № 10. P. 3639.
7. Kurdyeva Y., Kulichkov S., Kshevetskii S. et al. // Ann. Geophys. 2019. V. 37. № 3. P. 447.
8. Кшевецкий С.П. // Журн. вычисл. математики и мат. физ. 2001. Т. 41. № 2. С. 295.
9. Кшевецкий С.П. // Там же. № 11. С. 1777.
10. Gavrilov N.M., Kshevetskii S.P. // Earth Planet. Space. 2014. V. 66. № 1. P. 88.
11. Karpov I.V., Kshevetskii S.P. // J. Atmos. Sol.-Terr. Phys. 2017. V. 164. P. 89.
12. Кшевецкий С.П., Куличков С.Н. // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2015. Т. 51. № 1. С. 52.
13. Карпов И.В., Кшевецкий С.П. // Геомагнетизм и аэронавигация. 2014. Т. 54. № 4. С. 553.
14. Петрухин Н.С., Пелиновский Е.Н., Бацына Е.К. // Письма в ЖЭТФ. 2011. Т. 93. № 10. С. 625.
15. Drobzheva Y.V., Krasnov V.M. // J. Atmos. Sol.-Terr. Phys. 2006. V. 68. № 3–5. P. 578.
16. Борчевкина О.П., Карпов И.В., Карпов А.И. // Хим. физика. 2017. Т. 36. № 12. С. 51.
17. Picone J.M., Hedin A.E., Drob D.P. et al. // J. Geophys. Res. Space Phys. 2002. V. 107. № A12. 1468.
18. Астафьева Н.М. // УФН. 1996. Т. 166. № 11. С. 1145.
19. Hickey M.P., Walterscheid R.L., Schubert G. // J. Geophys. Res. Space Phys. 2011. V. 116. № A12. A12326.
20. Карпов И.В., Кшевецкий С.П., Борчевкина О.П. и др. // Хим. физика. 2016. Т. 35. № 1. С. 59.
21. Vadas S.L., Liu H.-L. // J. Geophys. Res. Space Phys. 2009. V. 114. № A10. A10310.
22. Черногор Л.Ф. // Геомагнетизм и аэронавигация. 2012. Т. 52. № 6. С. 807.
23. Panasenkov S.V., Otsuka Y., van de Kamp M. et al. // J. Atmos. Sol.-Terr. Phys. 2019. V. 191. 105051.
24. Бессараб Ф.С., Кореньков Ю.Н., Клименко В.В. и др. // Геомагнетизм и аэронавигация. 2002. Т. 42. № 5. С. 676.
25. Audi G., Wapstra A.H., Thibault C. // Nucl. Phys. A. 2003. V. 729. № 1. P. 337.
26. Голубков Г.В., Манжелей М.И., Карпов И.В. // Хим. физика. 2011. Т. 30. № 5. С. 55.
27. Голубков Г.В., Голубков М.Г., Манжелей М.И. // Хим. физика. 2014. Т. 33. № 2. С. 64.
28. Голубков Г.В., Манжелей М.И., Берлин А.А. и др. // Хим. физика. 2016. Т. 35. № 1. С. 5.
29. Kuverova V.V., Adamson S.O., Berlin A.A. et al. // Adv. Space Res. 2019. V. 64. № 10. P. 1876.