

УДК 551.511.3, 551.511.31, 551.511.61

ВЕРТИКАЛЬНОЕ РАСПРОСТРАНЕНИЕ АКУСТИКО-ГРАВИТАЦИОННЫХ ВОЛН ОТ АТМОСФЕРНЫХ ФРОНТОВ В ВЕРХНЮЮ АТМОСФЕРУ

© 2019 г. Ю. А. Курдюева^{1,2*}, С. Н. Куличков^{3,4}, С. П. Кшевецкий¹,
О. П. Борчевкина^{1,2}, Е. В. Голикова³

¹Балтийский государственный университет им. И. Канта
236041, Калининград, ул. Ал. Невского 14

²Калининградский филиал, Институт земного магнетизма,
ионосферы и распространения радиоволн РАН
236010, Калининград, Пионерская ул. 61

³Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН
119017, Москва, Пыжевский пер., 3

⁴Московский Государственный Университет им. М.В. Ломоносова
физический факультет

119991, Москва, ГСП-1, Ленинские горы, 1, стр. 2

E-mail: yakurdyeva@gmail.com*

Поступила в редакцию 04.12.2018 г.

Принята к печати 03.04.2019 г.

Из данных экспериментальных наблюдений вариаций атмосферного давления на поверхности Земли, зарегистрированных на сети из 4-х микробарографов, расположенных в московском регионе, при прохождении атмосферного фронта, построены эмпирические аппроксимации колебаний поля атмосферного давления. Полученные аппроксимирующие функции использованы в качестве нижнего граничного условия для численного расчета распространения акустико-гравитационных волн в верхнюю атмосферу от источника в нижней тропосфере. Даны оценки амплитуды температурных возмущений в верхней атмосфере, вызванных акустико-гравитационными волнами от атмосферного фронта. Полученные оценки для амплитуды температурных возмущений принимают значения около 170 К. В то время как амплитуда температурных возмущений в верхней атмосфере, вызываемых фоновыми вариациями давления на поверхности Земли, оценена в 4–5 К.

Ключевые слова: атмосфера, численное моделирование, акустико-гравитационные волны, верхняя атмосфера.

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0002-35155543-12>

1. ВВЕДЕНИЕ

Экспериментальные исследования показывают, что изменение параметров верхней атмосферы и ионосферы часто связано с метеорологическими явлениями (ураганы, шквалы, смерчи, грозы, атмосферные фронты и др.) [1]. Согласно современным представлениям, метеорологические явления порождают акустико-гравитационные волны (АГВ), которые, достигая верхней атмосферы и ионосферы и диссипируя, могут изменять состояние среды [2]. В нижней атмосфере АГВ могут генерироваться мезомасштабной турбулентностью [3, 4], атмосферными фронтами, струйными потоками [5, 6] с макси-

мумом эффективности на высотах 9–12 км [7]. Атмосферная конвекция, энергетически подпитываемая нагревом-охлаждением газа при фазовых переходах воды, также часто порождает атмосферные волны [1, 2, 8–11]. Диссипация волн, достигших верхней атмосферы, влияет на ее тепловой баланс. Эти волны также могут вызывать струйные течения в атмосфере. Атмосферные волны, достигающие высот ионосферы через несколько часов после начала их генерации влияют на движение плазмы в ионосфере и, как следствие, на распространение радиоволн.

Численное моделирование распространения АГВ является эффективным инструментом

изучения динамических процессов в атмосфере. Для сопоставления результатов численного эксперимента с реальными событиями в верхней атмосфере необходимо в качестве источников атмосферных волн использовать данные реальных наблюдений флуктуаций атмосферного давления в нижней тропосфере. Это позволит построить полуэмпирические модели самих источников и исследовать их влияние на динамические процессы в верхней атмосфере.

При расчете волн от метеорологических источников, одна из сложностей заключается в том, что эти источники очень разнообразны, обладают сложной пространственной, эволюционирующей во времени структурой. Имеющейся экспериментальной информации обычно недостаточно для реалистичного детального описания таких источников волн. В то время как совершенно очевидно, что неопределенность в параметрах источников волн влияет на точность и надежность получаемых результатов.

Известно, что фазовые переходы в атмосфере, сопровождающиеся выделением/поглощением тепла при образовании и эволюции облаков изменяют атмосферное давление. Вариации атмосферного давления от метеорологических процессов, регистрируются микробарографами. Зарегистрированные волновые формы вариаций атмосферного давления можно использовать для построения моделей источников АГВ, распространяющихся в верхние слои атмосферы.

Математическое исследование задачи о распространении акустико-гравитационных волн от вариаций плотности и температуры на поверхности Земли показало, что волновая картина однозначно определяется переменным давлением на поверхности Земли, но не зависит от

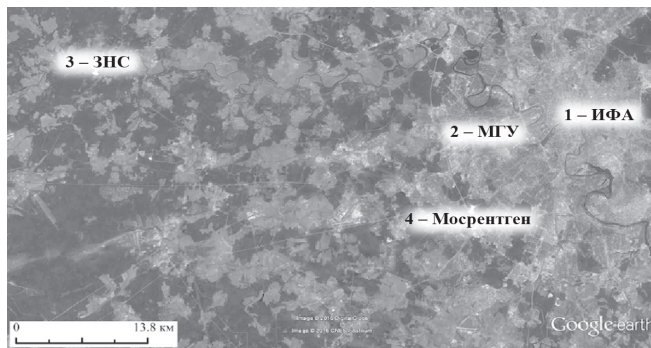


Рис. 1. Расположение микробарографов в Московском регионе.

деталей поведения температуры и плотности на поверхности Земли [12]. В [12] предложена численная модель распространения волн от вариации давления на поверхности Земли. В случае изотермической атмосферы задача о распространении волн от вариаций давления, заданных на нижней границе, решается аналитически. Тестовое сравнение численных и аналитических решений показало, что модель [12] дает очень хорошее численное решение, коррелирующее с результатами аналитических расчетов. Надежность численных расчетов подтверждается также в [13–16].

В [10, 11, 17] отмечается, что метеоисточники возбуждают сравнительно короткопериодные акустико-гравитационные волны. Пространственно-временная картина и спектр рассчитанного волнового процесса хорошо согласуются с наблюдениями. Тем не менее, амплитуды начальных АГВ, используемые при численных расчетах достаточно сложно оценить вследствие недостатка детальной информации о тропосферных источниках [18]. Оценка амплитуд атмосферных волн, распространяющихся от тропосферных источников в верхнюю атмосферу необходима не только для изучения самих волн, но и для исследования влияния этих волн на различных высотных уровнях в верхней атмосфере.

2. АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ О ВОЛНОВЫХ ВАРИАЦИЯХ АТМОСФЕРНОГО ДАВЛЕНИЯ

Для численного моделирования распространения АГВ нами были использованы данные наблюдений вариаций атмосферного давления, полученные на 4 микробарографах, ИФА им. А. М. Обухова РАН, и расположенных в московском регионе (пункты ИФА, МГУ, поселок завода Мосрентген и Звенигородская научная станция ИФА им. А. М. Обухова РАН на рис. 1 [19]), в 2016 г. Вариации атмосферного давления регистрируются в диапазоне частот от 10^{-4} Гц до 3 Гц.

Данные за год были обработаны и выделены случаи, когда амплитуда вариации давления существенно превышала фоновые. Так, например, амплитуда вариаций давления в отдельные моменты 17–18 июля 2016 г. превышала среднюю в 30 раз. Данные вариаций давления за эти дни и были выбраны нами для выполнения численных расчетов.

Ниже будут приведены результаты расчетов распространения атмосферных волн от приземных источников, волновые профили и амплитуды которых получены из данных реального эксперимента. Такие расчеты в существующей литературе ранее не проводились.

Для моделирования источника АГВ нами был выбран случай экстремальных вариаций приземного атмосферного давления, что объясняется необходимостью оценки диапазона амплитуд генерируемых волн. Проведение численных расчетов для случаев экстремальных значений амплитуд колебаний давления на земной поверхности позволяет пренебречь постоянно существующими в атмосфере фоновыми волновыми колебаниями, вызванными другими разнообразными источниками волн. Это повышает надежность расчетов. На рис. 2 показаны графики вариаций давления, регистрируемых четырьмя микробарографами 17–18 июля 2016 г.

Временные коэффициенты для пересчета показаний микробарографов ИФА и МГУ в единицы давления высчитывались при помощи измерительного инфразвукового микрофона. Микробарографы устанавливались рядом с микрофоном, оба датчика синхронно регистрировали сигнал в течение 1.5 суток. На основе полученных данных были получены спектры показаний обоих приборов и посчитаны временные коэффициенты.

Микробарограф станции Мосрентген сравнивался с микробарометром ИФА аналогичным образом. Однако для него полностью получить коэффициент не удалось. Тем не менее, нижнюю границу его рабочего диапазона удалось снизить примерно до $3 \cdot 10^{-3}$ Гц. Вероятно, с этим связана несколько заниженная барограмма для станции Мосрентген на рис. 2в, так как на частотах меньших $3 \cdot 10^{-3}$ Гц он может существенно занижать.

Коэффициенты для Звенигородской станции получены таким же образом. Полученные на нем вариации согласуются с данными ИФА. Необходимо принимать во внимание, что ЗНС находится на значительном удалении (рис. 1) от остальных (более 50 км), поэтому детали барограмм могут отличаться. Сама барограмма выглядит более плавной вследствие недостатка данных, так как микробарограф работал с некоторыми перебоями. На общую картину и дальнейшие расчеты эти особенности на фоне экстремального события не влияют.

Начало отсчетов сигналов, изображенных на рис. 2, соответствует 17 июля 5 ч утра (UT). Видно, что экстремальные колебания давления наблюдаются в районе от полуночи до 12 ч (UT) 18 июля 2016 г. Зона экстремального изменения атмосферного давления выделена прямоугольной областью. Максимальные значения амплитуды колебаний атмосферного давления наблюдаются после часа ночи.

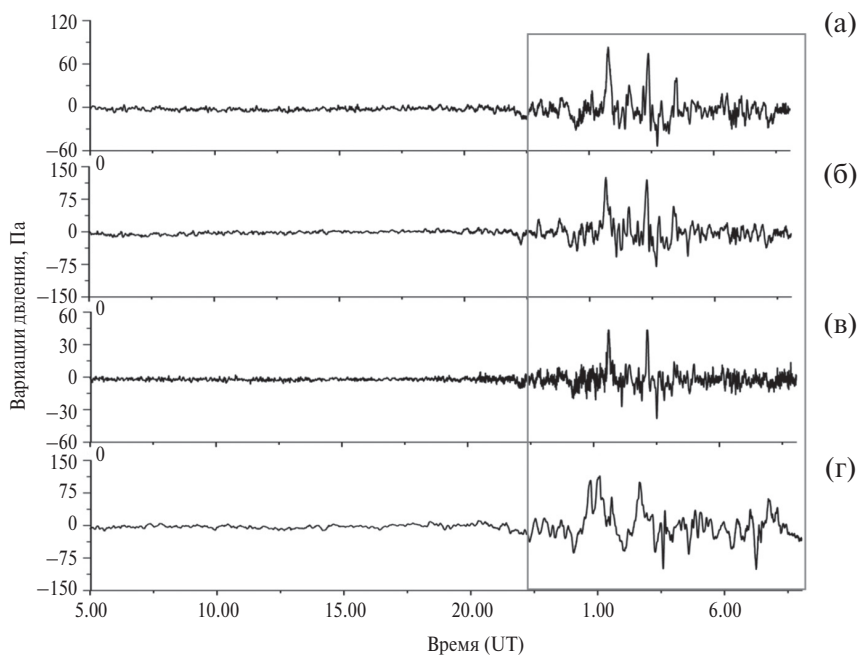


Рис. 2. Изменение давления на 4 станциях в г. Москве и окрестностях 17 июля 2016 г.: (а) — ИФА, (б) — МГУ, (в) — Мосрентген, (г) — ЗНС.

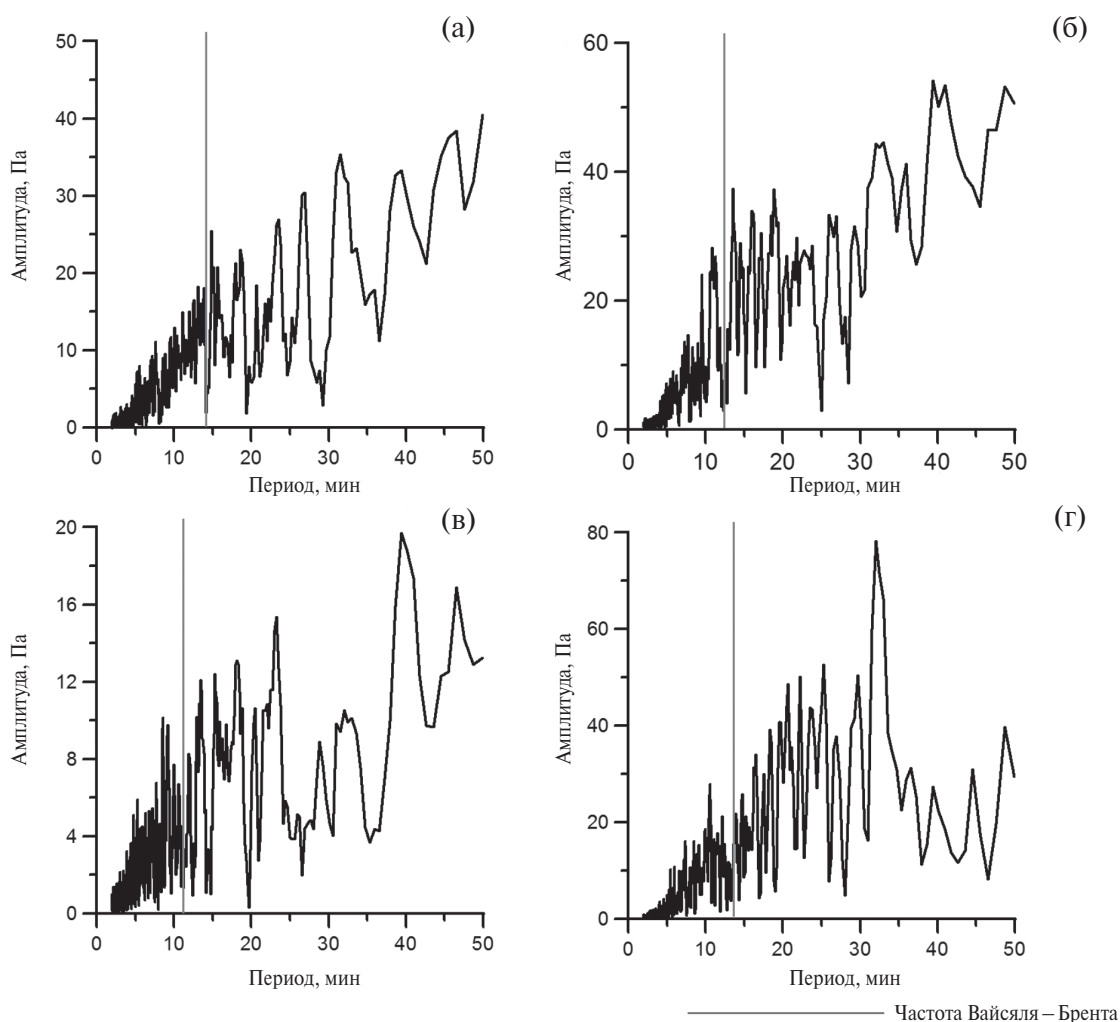


Рис. 3. Частотный спектр для вариаций давления для 4 станций в г. Москве и окрестностях 17 июля 2016 г.: (а) — ИФА, (б) — МГУ, (в) — Мосрентген, (г) — ЗНС.

Полученные частотные спектры (рис. 3) вариаций давления показывают, что в эксперименте наблюдаются колебания с частотами характерными как для инфразвука, так и для внутренних гравитационных волн. Можно заметить существенные различия в спектрах для станций Мосрентген и ЗНС. Это объясняется описанными выше особенностями записи и обработки данных на самих микробарографах. Спектры объединяет появление высокоамплитудных колебаний на периодах свыше 30 мин.

Для анализа региональной метеорологической обстановки в нижней атмосфере в исследуемый период использовались данные наблюдений, доступные в базе данных MERRA-2 [20]. На рис. 4 показаны карты приземного давления для 18 июля 2016 г., полученные по результатам анализа архива данных реанализа. Звездочкой

отмечен город Москва ($55^{\circ}45'$ с.ш. $37^{\circ}37'$ в.д.). Данные от MERRA-2 предоставляются на одной и той же горизонтальной сетке. Эта сетка имеет 576 точек в продольном направлении и 361 пункт в широтном направлении, что соответствует разрешению $0.625^{\circ} \times 0.5^{\circ}$.

Из рис. 4 видно, что изменение атмосферного давления связано с распространением области пониженного давления в циклоне, по мере его прохождения в направлении Москвы и Московской области. Известно, что приход циклонов сопровождается интенсивным образованием облаков [21]. Таким образом, вариации давления, полученные на микробарографах, вероятно, могут быть ассоциированы с наблюдаемыми метеоявлениями. Другие, схожие по выделению энергии источники волн, вероятно, можно исключить из рассмотрения.

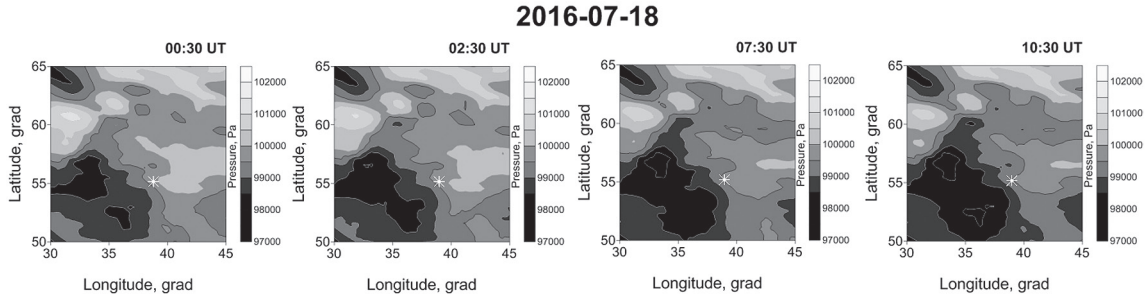


Рис. 4. Данные наблюдений, доступные в базе данных MERRA-2 [20], о приземном давлении для 18 июля 2016 г.

3. ВЫБОР МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ ЧИСЛЕННЫХ РАСЧЕТОВ

Для моделирования распространения волн от вариаций давления вблизи земной поверхности нами использована трехмерная суперкомпьютерная модель «AtmoSym» [20], разработанная С.П. Кшевевским и Н.М. Гавриловым [13–16, 23]. Модель использует параллельные вычисления [24]. Эта модель позволяет решать задачи распространения волн от различных начальных возмущений и источников волн в диапазоне высот 0–500 км над территорией с горизонтальным масштабом до нескольких тысяч километров. Модель адаптирована для решения задач о распространении волн от вариации давления на поверхности Земли в [13].

Численная модель «AtmoSym» основана на решении системы нелинейных гидродинамических уравнений (1):

$$\begin{aligned}
 & \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial \rho u}{\partial x} + \frac{\partial \rho v}{\partial y} + \frac{\partial \rho w}{\partial z} = 0, \\
 & \frac{\partial \rho u}{\partial t} + \frac{\partial \rho u^2}{\partial x} + \frac{\partial \rho uv}{\partial y} + \frac{\partial \rho uw}{\partial z} + 2w_z v = \\
 & = -\frac{\partial p}{\partial x} + \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right) \zeta(z) u + \frac{\partial}{\partial z} \zeta(z) \frac{\partial u}{\partial z}, \\
 & \frac{\partial \rho v}{\partial t} + \frac{\partial \rho uv}{\partial x} + \frac{\partial \rho v^2}{\partial y} + \frac{\partial \rho vw}{\partial z} + 2w_z u = \\
 & = -\frac{\partial p}{\partial y} + \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right) \zeta(z) v + \frac{\partial}{\partial z} \zeta(z) \frac{\partial v}{\partial z}, \\
 & \frac{\partial \rho w}{\partial t} + \frac{\partial \rho uw}{\partial x} + \frac{\partial \rho vw}{\partial y} + \frac{\partial \rho w^2}{\partial z} = \\
 & = -\frac{\partial p}{\partial z} - \rho g + \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right) \zeta(z) w + \frac{\partial}{\partial z} \zeta(z) \frac{\partial w}{\partial z},
 \end{aligned} \tag{1}$$

$$\frac{1}{\gamma - 1} \left(\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial \rho u}{\partial x} + \frac{\partial \rho v}{\partial y} + \frac{\partial \rho w}{\partial z} \right) = -p \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) +$$

$$+ \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right) \kappa(z) T + \frac{\partial}{\partial z} \kappa(z) \frac{\partial (T)}{\partial z} + Q_{visc} + Q_0(z),$$

$$\begin{aligned}
 Q_{visc} = \zeta(z) \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \right. \\
 \left. + \left(\frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 \right],
 \end{aligned}$$

$$Q_0(z) = \frac{-d}{dz} \kappa(z) \frac{dT_0(z)}{dz}, P = \frac{\rho RT}{\mu},$$

где t — время; x, y, z и u, v, w — координаты и компоненты скорости соответственно; p, ρ, T — давление, плотность и температура; R — универсальная газовая постоянная; μ — молекулярный вес; g — ускорение свободного падения; γ — постоянная адиабаты; ζ и κ — коэффициенты вязкости и теплопроводности; $T_0(z)$ — фоновый профиль температуры, берущийся из модели NRLMSISE-00 [25].

Зависимости параметров среды (коэффициентов вязкости и теплопроводности, фоновых плотности, температуры и давления) от высоты, берутся из эмпирической модели атмосферы NRLMSISE-00 [25]. Расчетная сетка по вертикали неравномерная и оптимальная сетка строится программой исходя из реальной стратификации среды.

Постановка нелинейной задачи о генерации волн от вариаций давления на нижней границе выглядит следующим образом. Распространение волн описывается системой уравнений (1).

Условия на горизонтальных границах области выбраны периодическими:

$$\begin{aligned} u(x = L_x, y, z, t) &= u(x = 0, y, z, t), \\ u(x, y = L_y, z, t) &= u(x, y = 0, z, t), \\ v(x = L_x, y, z, t) &= v(x = 0, y, z, t), \\ v(x, y = L_y, z, t) &= v(x, y = 0, z, t), \\ w(x = L_x, y, z, t) &= w(x = 0, y, z, t), \\ w(x, y = L_y, z, t) &= w(x, y = 0, z, t), \\ p(x = L_x, y, z, t) &= p(x = 0, y, z, t), \\ p(x, y = L_y, z, t) &= p(x, y = 0, z, t), \\ \rho(x = L_x, y, z, t) &= \rho(x = 0, y, z, t), \\ \rho(x, y = L_y, z, t) &= \rho(x, y = 0, z, t), \\ T(x = L_x, y, z, t) &= T(x = 0, y, z, t), \\ T(x, y = L_y, z, t) &= T(x, y = 0, z, t). \end{aligned} \quad (2)$$

Периодические граничные условия имеют тот недостаток, что в такой задаче волна, выходящая, например, через правую границу расчетной области заходит через левую. Однако при этом путь, пройденный волной от источника, плавно растет и амплитуда распространяющейся волны постепенно падает вследствие сферической, а на больших временах цилиндрической расходимости. Поэтому при достаточно больших размерах расчетной области, влияние конечности расчетной области, на интересующие нас характеристики волн, такие как амплитуда, характерные частоты волн, пространственные масштабы, не сильное. Размер расчетной области в горизонтальной плоскости подбирается экспериментально, и в данных расчетах он был равен 1020×1020 км.

Начальные условия

$$\begin{aligned} u(x, y, z, t = 0) &= 0, \quad v(x, y, z, t = 0) = 0, \\ w(x, y, z, t = 0), \quad \rho(x, y, z, t = 0) &= \rho_0(z), \\ T(x, y, z, t = 0) &= T_0(z), \end{aligned} \quad (3)$$

соответствуют отсутствию волн в начальный момент времени, поскольку нас интересуют только волны, созданные колебаниями давления на нижней границе расчетной области.

Верхние граничные условия традиционны для моделей термосферы. Верхняя граница $h = 500$ км. Условия на нижней границе имеют особый вид:

$$\frac{\partial T}{\partial z}(x, y, z = h, t) = 0, \quad \frac{\partial u}{\partial z}(x, y, z = h, t) = 0,$$

$$\frac{\partial v}{\partial z}(x, y, z = h, t) = 0, \quad w(x, y, z = h, t) = 0,$$

$$u(x, y, z = 0, t) = 0, \quad v(x, y, z = 0, t) = 0,$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial w(x, y, z = 0, t)}{\partial z} &= 0, \quad T(x, y, z = 0, t) = T_0(0), \\ P(x, y, z = 0, t) &= P_0(0) + f_p(x, y, t), \end{aligned} \quad (4)$$

где $f_p(x, y, t)$ — функция, определяемая эмпирически на основе экспериментальных наблюдений и описывающая волновые вариации поля давления а $P_0(0)$ — давление на поверхности Земли.

4. АППРОКСИМАЦИЯ ВАРИАЦИЙ ПОЛЯ ДАВЛЕНИЯ В ОКРЕСТНОСТИ РАСПОЛОЖЕНИЯ МИКРОБАРОГРАФОВ

В численных расчетах распределение поля давления в окрестности каждого из 4 микробарографов аппроксимируется функцией:

$$f_{p,i}(x, y, t) = \exp\left(-\left(\frac{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2}{\lambda^2}\right)\right) \times q_i(t+t_0). \quad (5)$$

Здесь параметр λ характеризует эффективную ширину вводимого граничного источника, значения (x_i, y_i) задают координаты микробарографа с номером i , а функции $q_i(t)$ описывают поведение волновой добавки к фоновому давлению на i -ом микробарографе, и строятся на основе интерполяции оцифрованных с 12-секундным шагом данных колебания атмосферного давления. Параметр λ определяется эмпирически, на основе исследования корреляции показаний микробарографов, в зависимости от расстояния между ними. Если микробарографы расположены достаточно часто, то расчеты не критичны к значению параметра λ . Параметр t_0 введен в (5) для обозначения момента времени, предшествующего времени появления максимальной амплитуды колебаний давления. В нашем случае $t_0 = 72000$ с, что соответствует 17 июля 2016 г., 20 ч местного времени.

Результирующее поле вариаций атмосферного давления получается суммированием этих отдельных полей $f_{p,i}(x, y, t)$, соответствующих вариациям давления в окрестности каждого микробарографа:

$$\begin{aligned} f_p(x, y, t) &= \\ &= \sum_{i=1}^4 f_{p,i}(x, y, t) \cdot \eta(t) \cdot \left(1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right)\right). \end{aligned} \quad (6)$$

Однако, если в любой из точек земной поверхности результат суммирования гауссовых функций

$$\exp\left(-\left(\frac{(x-x_i)^2+(y-y_i)^2}{\lambda^2}\right)\right),$$

описывающих пространственное распределения поля давления в окрестности каждого микробарографа, превышает единицу, то в этой точке функция $f_p(x, y, t)$

из (6) делится на $\exp\left(-\left(\frac{(x-x_i)^2+(y-y_i)^2}{\lambda^2}\right)\right)$, где

суммирование производится по всем микробарографам сети наблюдений. Это связано с тем, что в этом случае вводимые в окрестности каждого микробарографа аппроксимирующие поля $f_{p,i}(x, y, t)$ перекрываются.

Функция Хевисайда $\eta(t)$ в (6) введена, чтобы включить источник при $t = 0$, а множитель $\left(1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right)\right)$ введен, чтобы убрать переходные эффекты, обусловленные резким включением источника; $\tau = 300$ с.

5. РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ВОЛН ОТ ВАРИАЦИЙ АТМОСФЕРНОГО ДАВЛЕНИЯ

На рис. 5а показано поле температуры и вертикальной скорости через 10 мин после «включения» источника. Здесь амплитуды волн пока еще не достаточно значительны. Волны генерируются совокупностью четырех граничных источников, и вблизи источников волновое поле несимметрично. Однако, по мере удаления волн от поверхности Земли, генерируемые различными источниками волны интерферируют таким образом, что волновое поле приобретает вид волнового поля от единого точечного источника. Это, вероятно, объясняется тем, что центры введенных источников $f_{p,i}(x, y, t)$ на нижней границе, соответствующих различным микробарографам, находятся близко друг к другу; расстояние между источниками в среднем порядка 15 км и не превышает 60 км. В то время как радиус кривизны волнового фронта в расчетах на рис. 5а, около 150 км, что значительно больше расстояния между отдельными источниками. Поэтому совокупность отдельных источников проявляет себя на значительном расстоянии как единый точечный источник. По характеру волновой картины можно предположить, что источник расположен в атмосфере,

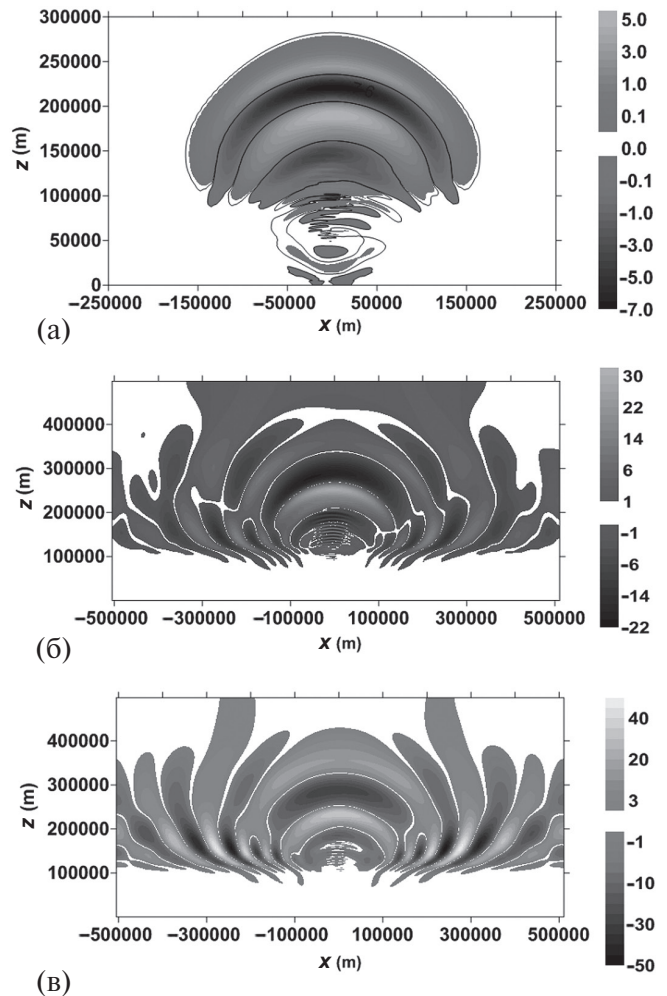


Рис. 5. Сечение плоскостью $x = 0$ поля температуры при (а) $t = 10$ мин, (б) $t = 43$ мин, (в) $t = 58$ мин.

на некоторой высоте над поверхностью Земли. Мы наблюдаем на всех временах, обозначенных на рис. 5, в основном, акустические волны, внутренние гравитационные волны значительно более медленные, и за это время не могли преодолеть значительные расстояния.

На рис. 5б показано волновое поле через 43 мин и на рис. 5в через 58 мин после включения граничного источника соответственно.

Волновая картина становится развитой, но она, как и на предыдущем рисунке, формируется преимущественно акустическими волнами, распространяющимися от источника на поверхности Земли. Мы видим, что в данном случае волновая картина симметрична и волны распространяются как бы от точечного источника. Это наблюдение полезно, поскольку подсказывает возможность заменить источник волн со сложной пространственной структурой на точечный и значительно сократить объем

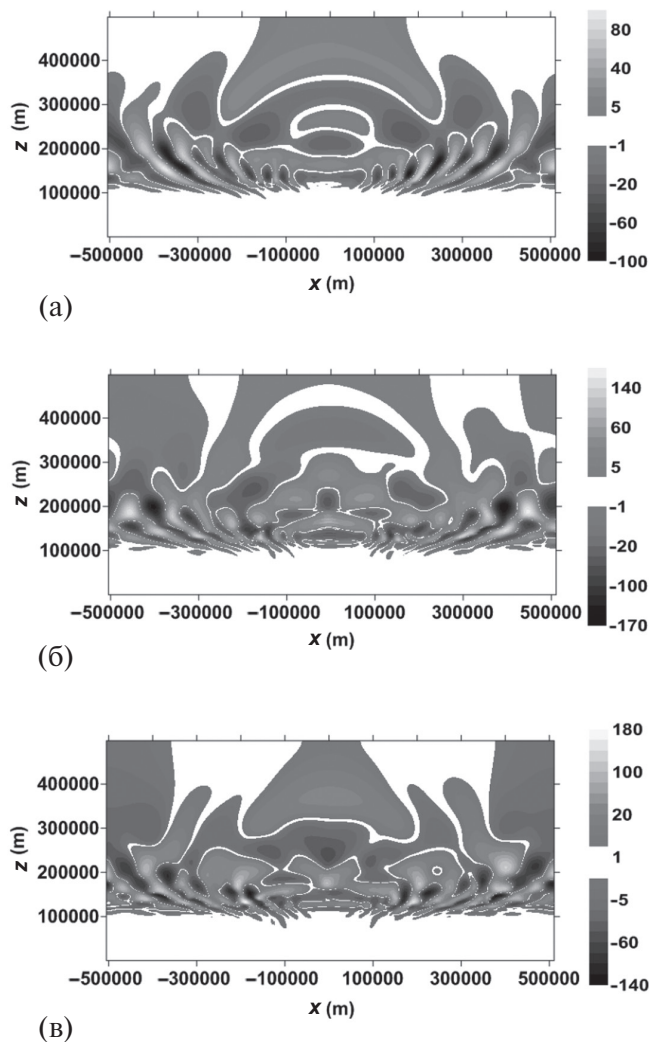


Рис. 6. Сечение плоскостью $x = 0$ поля температуры при (а) $t = 1$ ч 51 мин, (б) $t = 2$ ч 21 мин, (в) $t = 2$ ч 41 мин.

вычислений, переходя от использования трехмерной модели к значительно более экономичной трехмерной центрально-симметричной модели.

Из рис. 5 видно, что в течение первого часа амплитуда волновых колебаний температуры постепенно растет и достигает 40 К.

Здесь значительного влияния конечности расчетной области не чувствуется, поскольку амплитуда вновь приходящих волн растет, в то время как ранее возникшие волны постепенно затухают.

На рис. 6 показано поле возмущений температуры через 1 ч 51 мин, 2 ч 21 мин, 2 ч 41 мин после включения источника. Мы видим, что амплитуда волновых колебаний температуры сначала растет до значений превышающих 170 К, но затем несколько падает, затем стабилизиру-

ется в районе значений 140 К. Возникшие волны имеют существенно различные масштабы. У возмущения наибольшего масштаба размер полуволны равен примерно 600 км, у возмущения малых масштабов около 50 км. Основной нагрев среды волнами имеет место на высотах 100–200 км, при этом горизонтальная структура возмущения на этих высотах очень изменчива. Нагрев среды существенен также на высотах выше 300 км, на расстояниях по горизонтали до 250–300 км над центром источника.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Таким образом, для оценки амплитуды волновых возмущений в верхней атмосфере, вызываемых экспериментально наблюдаемыми волновыми колебаниями давления на земной поверхности, обработаны данные волновых вариаций давления за 2016 г. в Московском регионе.

Для проведения расчетов выбран экстремальный случай, когда колебания атмосферного давления в 30 раз превосходили среднестатистические, что имело место 17 июля 2016 г., примерно с 20 ч до 23 ч местного времени, и было связано с приближением циклона.

По данным измерений на 4 микробарографов аппроксимировано поле вариаций давления в окрестности этих микробарографов. Затем решена трехмерная гидродинамическая начально-краевая задача и вычислено волновое поле в верхней атмосфере от наблюдаемых приземных вариаций атмосферного давления.

Показано, что амплитуда возбуждаемых в верхней атмосфере температурных волновых возмущений сначала постепенно растет до значений T превышающих $T = 170$ К, потом несколько падает и стабилизируется в районе значений температурных возмущений $T = 140$ К. Поскольку время произведенных расчетов не превышает 3 ч, то волновые возмущения в верхней атмосфере можно отнести к инфразвуковым волнам и сравнительно высокочастотным внутренним гравитационным волнам (за время расчетов низкочастотные внутренние гравитационные волны не успевают распространиться до высот более 120 км). Сравнение рассмотренного случая экстремальных колебаний давления со среднестатистическими волновыми колебаниями давления на поверхности Земли дают оценку амплитуды типичных колебаний температуры T , обусловленных распространением инфразвуковых волн снизу, примерно как $T = 4$ –5 К.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ, проекты № 17-05-00574 (разделы 1–3,6), 18-05-00184 (раздел 5) и 18-05-00576 (разделы 2, 4).

Работа выполнена с использованием оборудования Центра коллективного пользования сверхвысокопроизводительными вычислительными ресурсами МГУ им. М. В. Ломоносова.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Blanc E., Farges T., Pichon A. Le et al.* Ten year observations of gravity waves from thunderstorms in western Africa // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2014. V. 119. P. 6409–6418.
2. *Pierce A.D., Coroniti S.C.* A mechanism for the generation of acoustic-gravity waves during thunder-storm formation // *Nature*. 1966. V. 210. P. 1209–1210.
3. *Fritts D.C., Alexander M.J.* Gravity wave dynamics and effects in the middle atmosphere // *Rev. Geophys.* 2003. V. 41. № 1. P. 1003.
4. *Fritts D.C., Vadas S.L., Mean K. et al.* Wan and variable forcing of the middle atmosphere by gravity waves // *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.* 2006. V. 68. P. 247–265.
5. *Ploogonven R., Snyder Ch.* Inertial Gravity Waves Spontaneously Generated by Jets and Fronts. Part I: Different Baroclinic Life Cycles // *J. of the Atmospheric Sciences*. 2007. V. 64. P. 2502–2520.
6. *Plougouven R., Zhang F.* Internal gravity waves from atmospheric jets and fronts // *Rev. Geophys.* 2014. V. 52. P. 1–37.
7. *Medvedev A.S., Gavrilov N.M.* The nonlinear mechanism of gravity wave generation by meteorological motions in the atmosphere // *J. Atmos. Terr. Phys.* 1995. V. 57. P. 1221–31.
8. *Balachandran N.K.* Gravity waves from thunderstorms // *Monthly weather review*. 1980. V. 108. P. 804–816.
9. *Alexander M., May P., Beres J.* Gravity waves generated by convection in the Darwin area during the Darwin Area Wave Experiment // *J. Geophys. research*. 2004. V. 109. P. 1–11.
10. *Miller D. V.* Thunderstorm induced gravity waves as a potential hazard to commercial aircraft // Presented at the American Meteorological Society 79th Annual conference, American Meteorological Society. 1999.
11. *Fovell R., Durran D., Holton J.R.* Numerical simulation of convectively generated stratospheric gravity waves // *J. of the Atmospheric Sciences*. 1992. V. 49(16). P. 1427–42.
12. *Kurdyeva Y.A., Kshevetskii S.P., Gavrilov N.M. et al.* Correct Boundary Conditions for the High-Resolution Model of Nonlinear Acoustic-Gravity Waves Forced by Atmospheric Pressure Variations // *Pure Appl. Geophys.* 2018. V. 175. P. 3639–3652. doi: 10.1007/s00024-018-1906-x
13. *Kshevetskii S.P.* Numerical simulation of nonlinear internal gravity waves // *Comp.Math. Math.Phys.* 2001c. V. 41. P. 1777–1791.
14. *Kshevetskii S.P.* Modeling of propagation of internal gravity waves in gases // *Comput. Math.Math. Phys.* 2001a. V. 41 (2). P. 273–288.
15. *Kshevetskii S.P.* Internal gravity waves in nonexponentially density-stratified fluids // *Comp. Math. Math. Phys.* 2002. V. 42(10). P. 1510–1521.
16. *Kshevetskii S.P.* Analytical and numerical investigation of nonlinear internal gravity waves // *Nonlinear Process. Geophys.* 2001b. V. 8. P 37–53.
17. *Snively J.B., Pasko V.B.* Breaking of thunderstorm-generated gravity waves as a source of short-period ducted waves at mesopause altitudes // *Geophys. Res. Lett.* 2003. V. 30(24). P. 2254. doi: 10.1029/2003GL018436
18. *Кшевецкий С.П., Куличков С.Н.* Влияние внутренних гравитационных волн от конвективных облаков на атмосферное давление и пространственное распределение возмущений температуры // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана*. 2015. Т. 51. № 1. С. 52–59.
19. *Куличков С.Н., Цыбульская Н.Д., Чунчузов И.П. и др.* Некоторые результаты регистрации внутренних гравитационных волн от атмосферных фронтов в московском регионе // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана*. 2017. Т. 53. № 4. С. 455–469.
20. Access to GES DISC data requires all users to be registered with the Earthdata, 2018. <https://disc.gsfc.nasa.gov/> (Accessed 1 August 2018).
21. *Погосян Х.П.* Циклоны. Л.: Гидрометеиздат, 1976. 148 с.
22. *AtmoSym Model of Atmospheric Processes*, 2016. <http://atmos.kantiana.ru/> (Accessed 20 October 2018).
23. *Kshevetskii S.P., Gavrilov N.M.* Vertical propagation, breaking, and effects of nonlinear gravity waves in the atmosphere // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2005. V. 67. P. 1014–1030.
24. *Воеводин Вл.В., Жуматий С.А. и др.* Практика суперкомпьютера «Ломоносов» // *Открытые системы*. — Москва: Издательский дом «Открытые системы». 2012. № 7. С. 36–39.
25. *Picone J.M., Hedin A.E., Drob D.P., Aikin A.C.* NRLMSISE-00 Empirical model of the atmosphere: statistical comparisons and scientific Issues // *J. Geophys. Res.* 2002. V. 107(A12). P. 1468. doi: 10.1029/2002JA009430

Vertical Propagation Acoustic-gravity Waves from Atmospheric Fronts into the upper Atmosphere

Y. A. Kurdyayeva^{1,2*}, S. N. Kulichkov^{3,4}, S. P. Kshevetskii³, O. P. Borchevkina^{1,2},
E. V. Golikova³

¹*Immanuel Kant Baltic Federal University*

A. Nevskogo Street, 14, Kaliningrad, 236041, Russia

²*KB Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation, Russian Academy of Science
Pionerskaya Street, 61, Kaliningrad, 236016, Russia*

³*Obukhov Institute of Atmospheric Physics, Russian Academy of Science
Pyzhevsky Avenue, 3, Moscow, 119017, Russia*

⁴*Moscow State University, Faculty of Physics*

Leninskiye gory, d. 1, str. 2, Moscow, 119991, Russia

**e-mail: yakurdyayeva@gmail.com, spkshev@gmail.com*

Received: 14.12.2018

Accepted: 03.04.2019

Using experimental observations of atmospheric pressure variations on the Earth's surface recorded with a network of 4 microbarographs located in the Moscow region during the passage of an atmospheric front, empirical approximations of oscillations of atmospheric pressure field were constructed. The obtained approximating functions were used as the lower boundary condition for the numerical simulation of acoustic-gravity wave propagation to the upper atmosphere from the source in the lower troposphere. Estimates of the amplitude of temperature disturbances in the upper atmosphere caused by iacoustic-gravity waves from the atmospheric front are given. The obtained estimates for the temperature disturbance amplitude take values around 170 K. The amplitude of temperature disturbances in the upper atmosphere, caused by background variations of pressure on the Earth's surface, is estimated at 4-5 K.

Keywords: atmosphere, numerical simulation, acoustic-gravity waves, upper atmosphere.