Генерация акустико-гравитационных волн различными источниками на поверхности Земли

В. Е. Куницын, Б. Ю. Крысанов, А. М. Воронцов^а

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, физический факультет, кафедра физики атмосферы. Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2. E-mail: ^a am.vorontsov@physics.msu.ru

Статья поступила 08.06.2015, подписана в печать 29.07.2015.

Проведен анализ закономерностей в распространении акустических и внутренних гравитационных волн для случая стратифицированной атмосферы с учетом диссипации, используя разработанную численную модель генерации и распространения акустико-гравитационных волн в атмосфере Земли. Исследованы характеристики возмущений от различных классов источников на поверхности Земли, таких как землетрясения, взрывы, сейши, температурный нагрев и волны цунами.

Ключевые слова: ионосфера, акустико-гравитационные волны, возмущения поверхности Земли, уравнения Эйлера.

УДК: 551.509.33. РАСS: 94.20.-у.

Введение

Земная атмосфера и ионосфера являются чувствительными индикаторами различного рода возмущений поверхности Земли или океана как природного, так и антропогенного происхождения. К естественным источникам возмущения относятся прежде всего землетрясения, цунами, геомагнитная активность, сейши и т.п., а к искусственным - различные химические и ядерные взрывы, запуски космических ракет. Основным механизмом распространения возмущения в атмосферу от таких источников являются акустико-гравитационные волны (АГВ). Из-за сильного уменьшения плотности земной атмосферы с высотой эти волны, по мере распространения вверх, усиливаются и приводят к значительным возмущениям верхней атмосферы и ионосферы. Так, для некоторых наземных источников коэффициент усиления амплитуды волн на ионосферных высотах достигает четырех порядков [1]. Регистрация таких ионосферных возмущений в больших пространственных областях проводится с использованием современных методов исследования верхней атмосферы, таких как спутниковая радиотомография либо некогерентное рассеяние радиоволн.

В настоящее время ведутся активные работы по исследованию возмущений верхней атмосферы, возникающих за несколько часов или даже дней перед крупными землетрясениями [2]. Согласно одной из гипотез [3], в области подготовки землетрясения вблизи поверхности Земли генерируются АГВ, вызванные предразломными процессами и распространяющиеся до ионосферных высот, которые и формируют ионосферные предвестники землетрясения [4].

Обобщая приведенный выше пример, можно сказать, что изучение различных ионосферных событий, при условиях их правильной трактовки и понимания механизмов их формирования, зачастую позволяет получить текущую или прогнозную картину поверхностных или объемных возмущений. И здесь наименее изученным является вопрос именно о механизме переноса акустической энергии от источников на поверхности Земли в околоземное пространство, что связано с недостаточным развитием теории распространения АГВ в реальной атмосфере. Кроме того, для полноценного анализа ионосферных событий необходимо иметь достоверные сведения об основных параметрах ионосферного отклика на поверхностные возмущения, таких как амплитуда, форма, период, фазовая и групповая скорости перемещения волнового пакета, а также угловые характеристики волнового вектора. Стоит отметить, что в литературе имеется большой разброс как в данных основных параметров АГВ, вызванных различными поверхностными возмущении, так и в понимании механизма формирования АГВ. К таким механизмам различные авторы относят генерацию инфразвуковых волн [1], генерацию внутренних гравитационных волн [5], вихревые движения нейтрального компонента атмосферы, возбуждаемые после прохождения акустического импульса [6], генерацию ударно-акустических волн [7] и т.д.

Таким образом, весьма актуальной становится задача о моделировании откликов верхней атмосферы на различные источники возмущений подземной, наземной или приповерхностной природы, позволяющая оценить основные параметры таких откликов и понять механизмы их формирования. Цель настоящей работы — численное моделирование генерации и распространения волн АГВ для разных классов поверхностных источников в двумерной нелинейной диссипативной сжимаемой атмосфере, анализ полученных данных и выявление закономерностей в распространении таких волн.

1. Постановка задачи и численная модель ее решения

При анализе генерации и распространения АГВ исходной является система уравнений геофизической гидродинамики в эйлеровой форме [8], учитывающая стратификацию атмосферы, зональный ветер, диссипативные эффекты и нелинейность:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho \boldsymbol{v}) = 0,$$

$$\rho \left(\frac{\partial \boldsymbol{v}}{\partial t} + (\boldsymbol{v}, \nabla)\boldsymbol{v}\right) = -\nabla p + \rho \boldsymbol{g} + \boldsymbol{F}_{d},$$

$$\rho \left(\frac{\partial(c_{\boldsymbol{v}}T)}{\partial t} + (\boldsymbol{v}, \nabla)(c_{\boldsymbol{v}}T)\right) = -p(\nabla, \boldsymbol{v}) + Q_{d},$$

$$p = \frac{\rho}{m_{0}}RT.$$
(1)

Первое уравнение — уравнение неразрывности, второе — уравнение сохранения количества движения (уравнение Навье-Стокса), третье — уравнение сохранения энергии, и, наконец, последнее уравнение состояния идеального газа. Для таких быстрых движений несущественна сила Кориолиса, поэтому мы пренебрегаем ею. Здесь ρ — плотность, T — температура, p — давление, v — скорость движения частиц среды в волне, g — ускорение свободного падения, F_d — сила вязкости, Q_d теплота, поглощенная из-за диссипации волны, c_v удельная теплоемкость газа при постоянном объеме, m_0 — относительная молекулярная масса воздуха, R — универсальная газовая постоянная, оператор $\nabla = \partial/\partial \mathbf{r}$, а \mathbf{r} — пространственная координата.

Отметим, что основу уравнений геофизической гидродинамики (1) составляет уравнение Навье-Стокса, которое применимо к атмосфере до высот 500-600 км. Исследуемые возмущения атмосферы, как правило, регистрируются именно до этих высот, следовательно, данное уравнение может быть использовано для решения поставленных задач.

Внутренние гравитационные волны (ВГВ) — наиболее интенсивная часть спектра АГВ. Основные механизмы диссипации ВГВ в верхней атмосфере это, прежде всего, молекулярная вязкость, теплопроводность и ионное торможение. Учитывая эти механизмы, сила **F**_d была взята в форме Рэлея $\boldsymbol{F}_d = -\alpha \boldsymbol{v}$. Здесь α — коэффициент сопротивления, значение которого на разных высотах соответствует разным механизмам диссипации. В литературе нет точных данных по значениям и характеру изменения α с высотой, и вообще до конца не ясно, какие механизмы на каких высотах доминируют в диссипации АГВ. Было предположено [9], что $\chi = \alpha / \rho$ постоянно, а коэффициент сопротивления χ был выбран в результате тестирования модели при различных значениях этого параметра. Кроме того, поскольку для затухания энергии таких больших волновых движений этим диссипативным механизмам требуется время порядка нескольких дней [10], в уравнении для температуры диссипативный член можно положить равным нулю: $Q_d = 0$.

Для численного интегрирования системы (1) удобно величины плотности, давления и температуры разложить на две части — стационарную и возмущенную и переписать уравнения в терминах таких возмущений. Кроме того, полученная система уравнений должна быть приведена к безразмерному виду. Итоговая система уравнений, пригодная для численного интегрирования приведена, например, в [9].

Будем рассматривать полученную систему уравнений в двумерной геометрии и искать ее решение в некоторой прямоугольной области, считая кривизну Земли не влияющей на дальнейшие результаты. Введем двумерную декартову систему координат Oxz такую, что ось Oz направлена вертикально вверх, а ось Ox направлена горизонтально. В этой системе координат $\mathbf{r} = (x, z)$ и $\mathbf{v} = (u, w)$, где u (соответственно w) — горизонтальная (соответственно вертикальная) компонента скорости частиц среды.

Для решения системы уравнений необходимо задать начальные и граничные условия. Начальные условия для скорости, возмущений плотности, давления и температуры выбираются нулевыми. Для граничных условий на нижней границе области моделирования будем считать, что рассматриваемая величина (скорость либо температура) в приземном слое атмосферы равна соответствующей величине на поверхности Земли. Это граничное условие обеспечивает передачу возмущения от поверхностного источника в атмосферу. Для остальных переменных будем полагать, что они непрерывны при переходе через поверхность нижней границы. На верхней и боковых границах были применены обычные граничные условия для обеспечения ухода волн через эти стенки без заметного отражения. Для численного расчета был использован метод корректирующих потоков FCT (Flux Corrected Transport) второго порядка точности по времени и по пространственным переменным [11].

2. Модели поверхностных источников возмущения

В работе проведены численные исследования атмосферных возмущений от поверхностных источников различной природы, математические модели которых приводятся ниже. Каждый из источников задается в виде возмущения границы раздела Земля-атмосфера, имеет уникальный набор параметров для настройки его характеристик и моделирует реальные природные или антропогенные явления, способные формировать АГВ в верхней атмосфере.

Рассмотрим источник, моделирующий короткои длиннопериодные колебания земной поверхности, характерные для таких явлений, как подземные взрывы и неглубокие землетрясения в первом и сейсмогравитационные колебания во втором случае. Тогда в некотором приближении вертикальное смещение поверхности Земли h(x, z=0, t) можно представить в виде локальной функции f(x), задающей форму импульса и в простейшем случае имеющей вид гауссоиды, умноженной на периодическую функцию, зависящей только от времени и определяющей временную динамику возмущения. Производная по времени от такого смещения будет определять вертикальную скорость w движения гидродинамических частиц границы Земля–атмосфера. Таким образом, для описания землетрясений, взрывов и длиннопериодных колебаний земной поверхности можно задать следующее граничное значение для вертикальной скорости:

$$w(x, z=0, t) = \frac{\partial h(x, z=0, t)}{\partial t} =$$
$$= w_0 \cos\left(\frac{2\pi}{P}(t-t_0)\right) f(x), \quad t_0 \le t \le t_0 + nP,$$

оставляя при этом другие термодинамические параметры невозмущенными на нижней границе области моделирования. Здесь w_0 характеризует амплитуду возмущения, t₀ — момент начала возмущения, P период колебания, а *п* здесь и далее обозначает натуральное число. Для землетрясений и взрывов период колебаний Р будет достаточно небольшим порядка долей секунды (P < 1 с), а амплитуда колебания w₀, наоборот, будет достаточно большой — 1-100 м/с в эпицентре источника [6]. Для длиннопериодных колебаний земной поверхности период возможных колебаний составляет от 10 с до нескольких часов, а амплитуда колебаний w_0 не превышает 1 м/с [2, 4]. Пространственная ширина импульса f(x) характеризуется продольным масштабом возмущения D_x , так что в случае гауссиана имеем $f(x) = \exp(-(x - x_c)^2/D_x^2)$ (здесь и далее через *x*_c обозначается координата центра импульса).

Другим важным примером наземного источника, порождающего возмущения в верхней атмосфере, являются сейши — длиннопериодные колебания водной поверхности, возникающие в относительно замкнутых водоемах. В основном сейши возникают благодаря ветровому нагону воды в определенной части озера или залива и представляют собой колебания с амплитудами уровня воды у берегов водоема от нескольких миллиметров до нескольких метров и с периодами от нескольких минут до нескольких десятков часов [12]. Как правило, данный период тем больше, чем больше площадь и пространственные масштабы замкнутой водной поверхности. В составе сейш различают несколько мод колебаний, однако, как показали исследования, подавляющая часть энергии колебаний приходится на первую моду.

Будем полагать, что вертикальное смещение поверхности водоема, соответствующее первой моде сейш, представляется в виде

$$h(x, z=0, t) = h_0 g(t) \cos\left(\frac{\pi}{D_x}(x - x_c)\right),$$

$$t_0 \leqslant t \leqslant t_0 + nP, \quad |x - x_c| \leqslant D_x,$$

где h_0 — амплитуда смещения, D_x — характерный продольный масштаб возмущения, а функция g(t), определяющая временную динамику возмущения, в простейшем случае представляется в виде синусоидального колебания $g(t) = \sin(2\pi(t-t_0)/P)$. На границах отрезка $|x - x_c| \leq D_x$ функция h имеет разрывы, которые необходимо сгладить, используя, например, сшивание этой функции с В-сплайнами третьего порядка, обеспечивающими равенство полученной функции и ее производной нулю в точках новой границы носителя возмущения.

Еще к одному важному классу источников генерации АГВ необходимо отнести температурные инверсии в нижней части атмосферы, извержения вулканов, возмущение набегающего потока воздуха крупными «теплыми» мегаполисами, солнечное нагревание и фотодиссоциацию в тропосфере [13]. Все эти явления имеют одну общую характерную особенность — они связаны с локальным изменением температуры у поверхности Земли. Кроме того, известно, что при сейсмогравитационных колебаниях в фазе сжатия у поверхности Земли могут возникать вариации температуры вследствие выброса в атмосферу литосферных газов. Это явление наблюдалось при метеорологических измерениях в Средней Азии за несколько часов (иногда суток) перед рядом сильных землетрясений. Спутниковые наблюдения за поверхностью Земли в сейсмоопасных регионах также фиксируют локальное увеличение температуры в районе эпицентра сильных землетрясений [4] за несколько дней до главного толчка.

Таким образом, актуальна задача о моделировании откликов верхней атмосферы от таких температурных источников. В качестве предполагаемого источника на нижней границе задавалась следующая температурная функция:

$$T(x, z=0, t) = T_0 \sin^2 \left(\frac{2\pi}{P}(t-t_0)\right) f(x),$$

$$t_0 \le t \le t_0 + nP,$$

где T_0 характеризует амплитуду возмущения в температурных единицах, а f(x) — форма импульса. Функция f(x) бралась в виде f(x) = $= \exp(-(x - x_c)^2/D_x^2)$, так что при $D_x = 20-100$ км эта функция приближенно описывает большинство указанных температурных источников. Периоды этих явлений очень разнообразны и по грубой оценке могут составлять от десятков минут до десятков часов.

Такое опасное и мощное природное явление, как цунами, является объектом исследования ученых уже достаточно длительное время. К настоящему моменту по этой тематике накоплен внушительный и разносторонний материал [14], который позволяет утверждать, что цунами являются едва ли не сильнейшим приземным источником возмущений в верхней атмосфере. В нашей работе будем полагать, что вертикальное смещение поверхности океана, соответствующее распространению волны цунами, представляется в виде

$$h(x, z=0, t) = h_0 g(t) \exp(-(x - vt)^2/\lambda^2),$$

где h_0 — высота волны цунами, v — горизонтальная скорость распространения волны, λ — пространственный масштаб или длина одиночной волны. Функция g(t) — временная функция задания амплитуды волны цунами, или, с учетом постоянства скорости распространения волны в предлагаемой модели, амплитуда вертикального смещения водной поверхности в зависимости от продольной координаты. Данная функция описывает развитие волны цунами начиная от процесса ее зарождения в открытом океане и заканчивая выходом на побережье.

3. Результаты численного моделирования

Моделирование проводилось с использованием специально разработанного программного обеспечения [9], осуществляющего численный расчет системы уравнений (1) на основе метода корректирующих потоков FCT [11] на равномерной ортогональной сетке с шагами 5 км по горизонтальной координате и высоте и шагом 0.1 с по времени. Размер области моделирования по горизонтали составлял порядка 6000 км (размер зависел от источника возмущения) и 500 км по высоте. Диапазон расчетов по времени составлял до 50000 с (около 14 ч). Численные исследования генерации и распространения АГВ проводились для приведенных выше поверхностных источников и для таких их параметров, для которых данные наблюдений подтверждают возможность возбуждения ими сильных возмущений в верхней атмосфере. А именно рассматривались: землетрясения и взрывы с продольным пространственным масштабом D_x до 100 км, амплитудой w₀ до 10 м/с и периодом P < 1-2 с; крупномасштабные длиннопериодные колебания земной поверхности с пространственным масштабом D_x до 800 км, периодом $P = 100 - 10\,000$ с и амплитудой смещения *h*₀ < 1 м; поверхностные длиннопериодные колебания на воде — сейши с амплитудой смещения поверхности $h_0 = 0.3 - 3$ м и характерным периодом P = 1 - 3 ч; температурный нагрев приземного слоя атмосферы с масштабом D_x до 100 км и амплитудой $T_0 = 0.1-5$ K; волны цунами с масштабом $\lambda = 100 - 200$ км, амплитудой смещения в открытом океане $h_0 = 0.01 - 1$ м, амплитудой смещения на берегу $h_0 = 5 - 10$ м и скоростью v = 200 - 300 м/с. Были использованы профили фоновой температуры, плотности, молекулярной массы реальной атмосферы, взятые из модели MSIS-90 для всех четырех сезонов года.

Анализ полученных результатов показал принципиальную возможность генерации АГВ в атмосфере для исследуемых типов поверхностных источников и фоновых профилей атмосферы. Были определены следующие общие закономерности в распространении возмущения в верхней атмосфере для всех типов источников: формирование над эпицентром поверхностного источника, на высотах мезопаузы и выше, устойчивой картины акустического возмущения, масштабы которого зависели от характеристик источника и в среднем составляли порядка 1000 км по горизонтали и 400 км по вертикали; формирование пакетов ВГВ протяженностью от двух до нескольких десятков длин волн, которые захватывались в волноводный канал на высотах выше мезопаузы и распространялись в горизонтальных направлениях от источника с наклоном вниз (рис. 1). При дальнейшем распространении волн наблюдалось увеличение периода и длин волн ВГВ с расстоянием. На дистанции 2000 км от центра источника увеличение периода составляло в среднем 120-150 с по сравнению со значением периода гравитационных волн над эпицентром источника.

По своим основным характеристикам волны, полученные при моделировании, принадлежали как акустическому, так и гравитационному спектру АГВ. Периоды акустических волн (АВ) составляли около 170-290 с, периоды ВГВ — 750-1500 с. Причем при распространении АВ вверх в первые 1000 с после начала возмущения период наблюдаемых волн составлял около 170 - 200 с, а после достижения волнами потолка высот 400-500 км и формирования устойчивой картины акустического возмущения над источником период АВ увеличивался до 220-290 с. Групповая скорость акустических волн варьировалась от 340 до 600 м/с в зависимости от высоты, внутренние гравитационные волны имели скорости в диапазоне 250-310 м/с, которые незначительно увеличивались с расстоянием. Горизонтальные длины волн ВГВ составляли 250-280 км, горизонтальные длины волн АВ — 170-200 км. Максимальные амплитуды горизонтальной и вертикальной скорости АВ, а также возмущений температуры в области непосредственно над источником наблюдались на высотах 250-350 км (рис. 2, а). На горизонтальном удалении 1000 км от источника, где преобладали в основном гравитационные волны, максимумы соответствующих величин смещались в сторону мезопаузы на высоты 150-200 км (рис. 2, б). Средние значения амплитуд горизонтальной и вертикальной скорости и температуры возмущения на высоте максимального отклика превышали те же значения у поверхности Земли в 300-400 раз. Максимальное усиление амплитуды вертикальной скорости w и температуры Т в области непосредственно над источником для всех типов источников составляло 4000-6000 и 2000-3000 раз соответственно.

Рассмотрим теперь особенности получаемых возмущений для различных типов источников.

В случае землетрясений и взрывов спектр возмущения был сосредоточен в основном в акустическом диапазоне, а само возмущение располагалось над источником (рис. 1, *a*). Амплитуды вертикальной



Рис. 1. Пространственные распределения горизонтальной скорости и гидродинамических частиц в момент времени t = 5500 с после начала возмущения для импульсного (*a*) и длиннопериодного (*б*) источника, дающие приближенно одинаковые по амплитудам возмущения верхней атмосферы



Рис. 2. Сравнительные зависимости максимальных значений вертикальной скорости *w* над источником (*a*) и горизонтальной скорости *u* на расстоянии 1000 км от источника (*б*) для импульсного (сплошная линия) и длиннопериодного источника (штриховая линия)

скорости частиц AB над источником после взрывов могли достигать нескольких сотен метров в секунду. Гравитационные волны имели слабо выраженный характер, их периоды равнялись $P \sim 750-900$ с.

Для длиннопериодных колебаний земной поверхности максимально возможные амплитуды горизонтальной и вертикальной скорости частиц для AB составляли не более 20–30 м/с, для ВГВ — 10–30 м/с. Возмущение в основном состояло из гравитационных волн с периодами P > 1000 с, которые распространялись без значительного затухания на расстояния в несколько тысяч километров (рис. 1, δ). Сравнительный анализ показывает, что амплитуда наблюдаемых в численном эксперименте ВГВ в слу-



Рис. 3. Пространственные распределения горизонтальной скорости u (*a*) и вертикальной скорости w (*б*) гидродинамических частиц при t = 5600 с для источника, моделирующего сейши с амплитудой $h_0 = 2$ м, периодом $P = 10\,000$ с и пространственным масштабом $D_x = 300$ км

чае слабого длиннопериодного источника больше, чем в случае сильного короткопериодного. Таким образом, данные моделирования дают возможность установить приближенные характеристики возмущения, формируемого длиннопериодными колебаниями земной поверхности в период подготовки землетрясения. Кроме того, численные расчеты позволяют утверждать, что для возможного обнаружения надежных сигнальных признаков землетрясений необходимо исследовать ионосферные возмущения на больших горизонтальных расстояниях от источника [4].

Обратимся теперь к моделированию сейш. Вычисления показали, что сейши способны генерировать в атмосферу в основном длиннопериодные АГВ (рис. 3). Амплитуды вертикальной и горизонтальной скорости частиц в ВГВ, которые возбуждались модельными источниками, соответствующими сейшам на озерах Женева, Байкал и Мичиган [12], не превышали, как правило, 1 м/с. В этом случае волны ВГВ распространялись в виде нескольких последовательных пакетов, идущих друг за другом от источника с задержкой 1.5–2 ч. Горизонтальная фазовая скорость ВГВ лежала в пределах 280–300 м/с, период наблюдаемых ВГВ $P \sim 900-1500$ с, длина волны $\lambda \sim 320-450$ км.

В возмущении, создаваемом температурным источником, ВГВ имели достаточно большие амплитуды ($u, w \sim 30-50$ м/с) и пространственные размеры, в то время как АВ были выражены слабо (рис. 4, *a*). По сравнению с откликами атмосферы на остальные рассматриваемые источники возмущение от температурного источника имело наибольшие амплитуды горизонтальной и вертикальной скорости частиц u и w, а также температуры T (рис. 4, *б*). Сравнительный анализ показал, что приближенно одинаковые по амплитудам ВГВ формируются как температурным источником с амплитудой $T_m = 0.25$ K, так и длиннопериодными колебаниями земной поверхности с амплитудой смещения поверхности порядка десятка метров и периодом около 10000 с.

Моделированию возмущений верхней атмосферы, вызванных цунами, посвящена отдельная статья авторов [15], где подробно рассмотрен ионосферный отклик на прохождение волны цунами, порожденной разрушительным землетрясением Тохоку 2011 г. В настоящей работе для описания волны цунами был рассмотрен более сложный источник, вид которого приведен в предыдущем параграфе, а также рассмотрен больший диапазон изменения параметров v, h_0 и λ , однако общие выводы [15] были подтверждены. Именно распространение вол



Рис. 4. Пространственное распределение горизонтальной скорости *и* (*a*) и возмущения температуры *T* (*б*) при *t* = 6000 с для температурного источника с амплитудой 1 К и пространственным масштабом *D_x* = 20 км. Период источника *P* = 3000 с



Рис. 5. Пространственное распределение вертикальной компоненты скорости *w* частиц атмосферы спустя 7 ч после возникновения волны цунами. Местоположение волны цунами отмечено вертикальной линией

ны цунами сопровождается возбуждением в верхней атмосфере АГВ, часть которых опережают саму волну цунами, т.е. образуют предвестник (рис. 5). При распространении волны цунами в открытом океане отклик атмосферы представлял собой возмущение, расположенное в основном на высотах в диапазоне 100–300 км. Длина волн ВГВ, опережающих цунами, составляла $\lambda \sim 140-180$ км с периодом в диапазоне от 100 до 150 с. Длина пакета со-

ставляла около 500–1000 км, т.е. 3–5 длин волн. В дополнение к расчетам в [15] было показано, что существенный вклад в итоговое возмущение оказывает продвижение волны цунами по шельфу, когда происходит резкое нарастание амплитуды цунами, иногда достигающее 30–40 м. Полученные данные позволяют утверждать, что амплитуды горизонтальной и вертикальной скорости АГВ достигают 40–60 м/с на высотах максимального отклика атмосферы 200–250 км. Амплитуды возмущения температуры, полученные в расчетах, не превышали значений 10–12 К.

В заключение отметим, что было осуществлено сравнение полученных результатов с результатами экспериментальных и теоретических работ в тех случаях, где подобные исследования проводились. В целом отмечалось достаточно хорошее совпадение характеристик ионосферных возмущений, наблюдаемых после крупных землетрясений [7], химических и ядерных взрывов [6], а также после прохождения волн цунами [3, 16], с представленными результатами численного расчета откликов верхней атмосферы от соответствующих модельных источников.

Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ (грант № 14-17-00637).

Список литературы

- Calais E., Minster J.B. // Physics of Earth and Planetary Interiors. 1998. 105. P. 167.
- 2. Линьков Е.М., Петрова Л.Н., Осипов К.С. // Докл. АН СССР. 1990. **313**, № 3.
- Makela J.J., Lognonné P., Hébert H. et al. // Geophys. Res. Lett. 2011. 38.

- 4. Липеровский В.А., Похотелов О.А., Шалимов С.Л. Ионосферные предвестники землетрясений. М., 1992.
- 5. Francis S.H. // J. Atmos. Terr. Phys. 1975. 37. P. 1011.
- 6. Андреева Е.С., Гохберг М.Б., Куницын В.Е. и др. // Космич. исслед. 2001. **39**, № 1. С. 13.
- 7. Afraimovich E.L., Perevalova N.P., Plotnikov A.V. et al. // Ann. Geophysicae. 2001. **19**. P. 395.
- 8. *Григорьев Г.И.* // Изв. вузов. Радиофизика. 1999. **XLII**, № 1. С. 3.
- 9. Ахмедов Р.Р., Куницын В.Е. // Геомагнетизм и аэрономия. 44. № 1. С. 105.
- 10. Pitteway M., Hines C. // Can. J. Phys. 1963. 41. P. 1935.
- 11. Оран Э., Борис Дж. Численное моделирование реагирующих потоков. М., 1990.
- 12. Wuest A., Farmer D.M. Encyclopedia of Science & Technology. Seishe, 2003
- Sauli P., Boska J. // J. Atmos. Sol.-Terr. Phys. 2001.
 63. P. 945.
- 14. Левин Б.В., Носов М.А. Физика цунами. М., 2005.
- Куницын В.Е., Воронцов А.М. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 2014. № 3. С. 62. (Kunitsyn V.E., Vorontsov А.М. // Moscow University Phys. Bull. 2014. 69, N 3. P. 263.)
- Artru J., Ducic V., Kanamori H. et al. // Geophys. J. Int. 2005. 160. P. 840.

Acoustic-gravity waves in the Earth's atmosphere generated by surface sources

V. E. Kunitsyn, B. Yu. Krysanov, A. M. Vorontsov^a

Department of Physics of Atmosphere, Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia.

E-mail: ^a am.vorontsov@physics.msu.ru.

The generation of acoustic-gravity waves and their propagation in the Earth's atmosphere is analyzed numerically on the basis of a computer model of the stratified atmosphere with dissipation. Atmospheric and ionospheric wavelike disturbances from different surface sources such as earthquakes, explosions, seiches, temperature heating, and tsunamis are studied.

Keywords: ionosphere, acoustic-gravity waves, Earth's surface perturbations, Euler's equations. PACS: 94.20.-y. *Received 8 June 2015*.

English version: Moscow University Physics Bulletin 6(2015).

Сведения об авторах

- 1. Куницын Вячеслав Евгеньевич доктор физ.-мат. наук, профессор.
- 2. Крысанов Борис Юрьевич ведущий инженер; e-mail: krysanov_b@mail.ru.
- 3. Воронцов Артём Михайлович канд. физ.-мат. наук, науч. сотрудник; e-mail: am.vorontsov@physics.msu.ru.