

УДК 551.509.33

## МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ АКУСТИКО-ГРАВИТАЦИОННЫХ ВОЛН В АТМОСФЕРЕ ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ ПОВЕРХНОСТНЫХ ИСТОЧНИКОВ

В. Е. Куницын, С. Н. Сураев, Р. Р. Ахмедов

(кафедра атмосферы)

E-mail: kunitsyn@phys.msu.su

**На основе разработанной модели и численного алгоритма решения уравнений гидродинамики, описывающих распространение акустико-гравитационных волн, проведено исследование характерных особенностей в поведении волн в верхней атмосфере в зависимости от параметров возбуждающего источника, расположенного на поверхности Земли.**

### Введение

Исследование ионосферного отклика на возмущения, возникающие при импульсном воздействии на земную атмосферу, является одной из важных задач современной физики атмосферы [1, 2]. Источниками импульсного возмущения являются ядерные испытания, промышленные взрывы, стартующие ракеты, землетрясения, извержения вулканов, ураганы, грозы, струйные течения. Большой интерес к этой проблеме обусловлен тем, что такие события можно трактовать как активные эксперименты в атмосфере Земли и использовать их для решения целого ряда задач физики ионосферы, ионосферного распространения радиоволн, физики атмосферных волн и т. д. [3].

При землетрясениях и взрывах значительная часть энергии преобразуется в акустическую. При этом генерирующиеся в атмосфере акустико-гравитационные волны (АГВ) распространяются с нарастанием амплитуды до больших высот, где они могут приводить в движение плазму ионосферы вследствие столкновительного взаимодействия нейтральных и заряженных частиц. Современные методы исследования верхней атмосферы, такие как радиотомография и некогерентное рассеяние, позволяют регистрировать АГВ в ионосфере на больших пространственных областях [4].

Несмотря на большое количество экспериментальных данных [5], на сегодняшний день существует очень мало работ, где были сделаны попытки с теоретических позиций объяснить наблюдаемые возмущения в атмосфере и ионосфере от наземных и атмосферных источников [6, 7].

Настоящая работа посвящена численному моделированию генерации и распространения волн АГВ для различных типов поверхностных наземных источников в двумерной земной атмосфере, а также анализу полученных характеристик АГВ в зависимости от параметров поверхностного возмущения.

### Численная модель

Разработанная численная модель распространения акустико-гравитационных волн в двумерной сжимаемой атмосфере учитывает стратификацию атмосферы, диссипативные эффекты и нелинейность. В модели волны генерируются вертикальными импульсными движениями земной поверхности. Модель распространения АГВ строилась на основе системы уравнений гидродинамики в эйлеровой форме [2, 8]:

$$\begin{cases} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho \mathbf{v}) = 0, \\ \rho \left( \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + (\mathbf{v}, \nabla) \mathbf{v} \right) = -\nabla p + \rho \mathbf{g} + \mathbf{F}^d, \\ \rho \left( \frac{\partial (c_v T)}{\partial t} + (\mathbf{v}, \nabla)(c_v T) \right) = -p(\nabla, \mathbf{v}) + Q^d, \\ p = \frac{\rho}{m_0} RT. \end{cases} \quad (1)$$

В этой системе первое уравнение — уравнение неразрывности, второе — уравнение сохранения количества движения, третье — уравнение сохранения энергии и последнее — уравнение состояния идеального газа. Здесь  $\rho$  — плотность;  $T$  — температура;  $p$  — давление;  $\mathbf{v}$  — скорость движения частиц среды;  $\mathbf{g}$  — ускорение свободного падения;  $\mathbf{F}^d$  — сила вязкости;  $Q^d$  — теплота, поглощенная из-за диссипации волны;  $c_v$  — удельная теплота газа при постоянном объеме;  $m_0$  — относительная молекулярная масса воздуха;  $R$  — универсальная газовая постоянная, оператор  $\nabla = \frac{\partial}{\partial \mathbf{r}}$ .

В результате решения дисперсионного уравнения в составе АГВ выделяют чисто акустические волны (АВ)  $\omega > \omega_a$  ( $\omega_a$  — частота акустического обрезания) и внутренние гравитационные волны (ВГВ)  $\omega < \omega_g$  ( $\omega_g$  — частота Бранта–Вяйсяля) [9]. Принципиальное отличие ВГВ от звуковых волн

заключается в том, что в последних колебания воздуха являются чисто продольными, а в случае ВГВ имеется поперечная, сдвиговая составляющая.

Внутренние гравитационные волны — наиболее интенсивная часть спектра АГВ. Для этих волн ниже термопаузы диссипативные механизмы следующие: молекулярная вязкость, теплопроводность и взаимодействия с фоновой турбулентностью атмосферы [8]. Молекулярная вязкость и теплопроводность не могут значительно влиять на импульс и энергию гравитационных волн, так как для затухания таких больших волновых движений требуется время порядка нескольких дней. Однако модель строится для процессов, которые протекают в течение нескольких часов. Поэтому учитывается только влияние турбулентной вязкости до высоты термопаузы. Выше основную роль играет другой механизм — ионное торможение. Таким образом, после объединения двух различных сил — вязкости и ионного торможения — в силу  $F^d$ , которая взята в форме Рэлея, получается  $F^d = -\alpha v$ . Здесь  $\alpha$  — коэффициент вязкости, значение которого на разных высотах соответствует разным силам. Для простоты используется среднее значение  $\alpha$ , которое меняется с высотой, так что отношение данного коэффициента к плотности остается постоянным:  $\alpha/\rho = \text{const}$ . Влияние эффекта диссипативных механизмов на энергию волны не учитывается, потому что значительная потеря энергии крупномасштабного ВГВ из-за этих сил занимает время порядка нескольких дней. Таким образом, мы пренебрегаем слагаемым  $Q^d$  в системе уравнений (1).

Для численного решения системы (1) необходимы два граничных условия: на поверхности Земли и на верхней границе. Для плотности и температуры на нижней границе предполагалась непрерывность, а для скорости — условия равенства со скоростью движения поверхности Земли. На верхней границе значения искоемых величин были найдены с помощью экстраполяции второго порядка, т.е. предполагалось, что градиент величин должен быть постоянным поперек границы, что позволяет волне уйти через верхнюю границу расчетной области. В первом приближении вертикальное смещение поверхности Земли можно представить по времени — в синусоидальной форме, по пространству — функцией Гаусса. Производная от функции вертикального смещения даст нам скорость движения источника возмущения. Таким образом, для описания наземного источника была выбрана следующая функция:

$$w = w_m \sin\left(\frac{2\pi(t - t_0)}{T}\right) \exp\left(-\left(\frac{x - x_c}{Dx}\right)^2\right), \quad (2)$$

$$t_0 \leq t \leq t_0 + nT.$$

Здесь  $w_m$  — амплитуда скорости вертикального смещения земной поверхности,  $t_0$  — момент начала возмущения,  $T$  — период колебания,  $x_c$  —

горизонтальная координата эпицентра источника,  $Dx$  — гауссовский масштаб, характеризующий протяженность источника. Для численного решения был использован метод корректирующих потоков FCT (Flux Corrected Transport) [10] второго порядка точности по времени и по пространству.

### Результаты численного моделирования

Для моделирования использовалось разработанное в нашей лаборатории программное обеспечение, с помощью которого производился численный расчет по модели на равномерной сетке с шагом 5 км по высоте и горизонтали и 0.1 с по времени. Область моделирования составляла по высоте 500–1000 км, а по горизонтали 4000 км. Диапазон расчетов по времени составлял до 200 000 с (более 25 ч). Центр возбуждающей функции располагался в точке  $x = 2000$  км,  $z = 0$  км.

Диапазон изменения периода возбуждающей функции  $T$  составлял от 1 до 4000 с, амплитуды функции  $w_m$  — от 0.001 до 10 м/с, пространственного масштаба функции  $Dx$  — от 10 до 1000 км.

Для задания параметров атмосферы использовались реальные январские профили фоновой температуры и плотности, взятые из модели атмосферы MSIS (<http://nssdc.gsfc.nasa.gov/space/model/models/msis.html>). Такой выбор объясняется тем, что, как показали наблюдения, в зимний период складываются наиболее благоприятные условия для распространения ВГВ на значительные расстояния. Коэффициент сопротивления был выбран так, что увеличивался экспоненциально с высотой.

Модель была опробована на классических случаях изотермической и стратифицированной атмосферы [11].

Полученные результаты показали устойчивую генерацию АГВ в атмосфере для всех исследуемых типов импульсных источников. В каждом случае процесс формирования возмущения в верхней атмосфере состоял из нескольких последовательных этапов:

1. От источника вверх поднимался широкий спектр волн со скоростью звука. Амплитуда волн росла с высотой, в связи с тем что плотность атмосферы падала. На высотах 300–400 км увеличение амплитуды достигало 50–300 раз по сравнению со значениями у поверхности Земли.

2. Возмущение достигало высот 450–500 км, однако на высоте 100–120 км (в районе мезопаузы) и выше сильный рост амплитуды в целом прекращался. Формировалась устойчивая во времени область акустического возмущения прямо над эпицентром источника и наблюдалось отделение от нее и расхождение в противоположных горизонтальных направлениях (с небольшим уклоном вниз) возмущений, представляющих ВГВ (рис. 1).

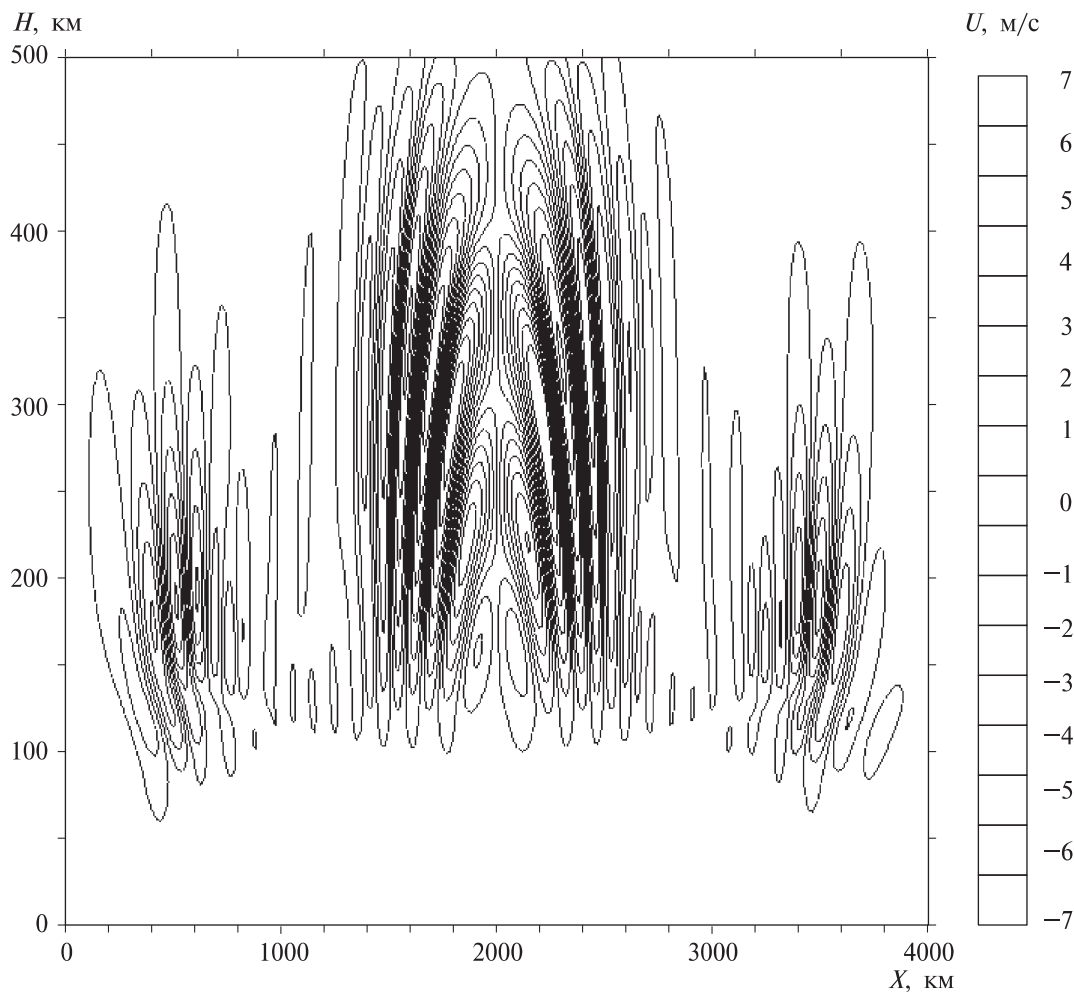


Рис. 1. Пространственное распределение горизонтальной скорости  $U(h-x)$ . Параметры поверхностного источника — период  $T = 1$  с, продолжительность действия 100 с, амплитуда  $w_m = 0.1$  м/с, пространственный масштаб  $Dx = 20$  км

3. В течение нескольких часов над эпицентром наблюдалась практически неподвижная и стабильная в границах область акустического возмущения. ВГВ продолжали двигаться в горизонтальных направлениях с относительно небольшим затуханием. Расчеты показали возможность их обнаружения на горизонтальных расстояниях до нескольких тысяч километров от эпицентра.

На рис. 1 приведено пространственное распределение горизонтальной скорости частиц атмосферы в момент времени  $t = 5000$  с после начала возмущения. Данная картина соответствует второму этапу возмущения.

Наблюдаемая картина формировалась благодаря тому, что траектории распространения акустических волн и ВГВ различны. Волны ВГВ захватываются в волноводный канал, где они способны распространяться с незначительным затуханием. Волновод образуется благодаря минимуму температуры в области мезопаузы. ВГВ распространяются с разными скоростями в горизонтальных направлениях, в результате чего формируются движущиеся пакеты волн.

В целом максимум амплитуд вертикальной и горизонтальной скорости наблюдался на высотах 250–350 км. Конкретное значение максимума и его высоты сильно зависело от параметров возбуждающего источника. Дальнейшему увеличению амплитуды с высотой препятствовало геометрическое расхождение волн и усиление диссипативных эффектов, таких, как ионное торможение.

На рис. 2 и 3 представлены зависимости горизонтальной и вертикальной скоростей  $U$  и  $W$  от времени. На них отчетливо выделяются два вида колебаний — мелкомасштабные осцилляции с периодами 200–250 с (АВ) и крупномасштабные осцилляции с периодами 1000–1500 с (ВГВ).

Как видно из рис. 2, с увеличением периода возбуждающей функции в результирующем возмущении начинали доминировать крупномасштабные осцилляции. Данные осцилляции представляли собой ВГВ с периодами более 1000 с. Они распространялись в горизонтальном направлении и, проходя через точку наблюдения  $x = 3000$  км,  $z = 250$  км, вызывали крупномасштабные, длиннопериодные колебания, которые были видны на фоне более мел-

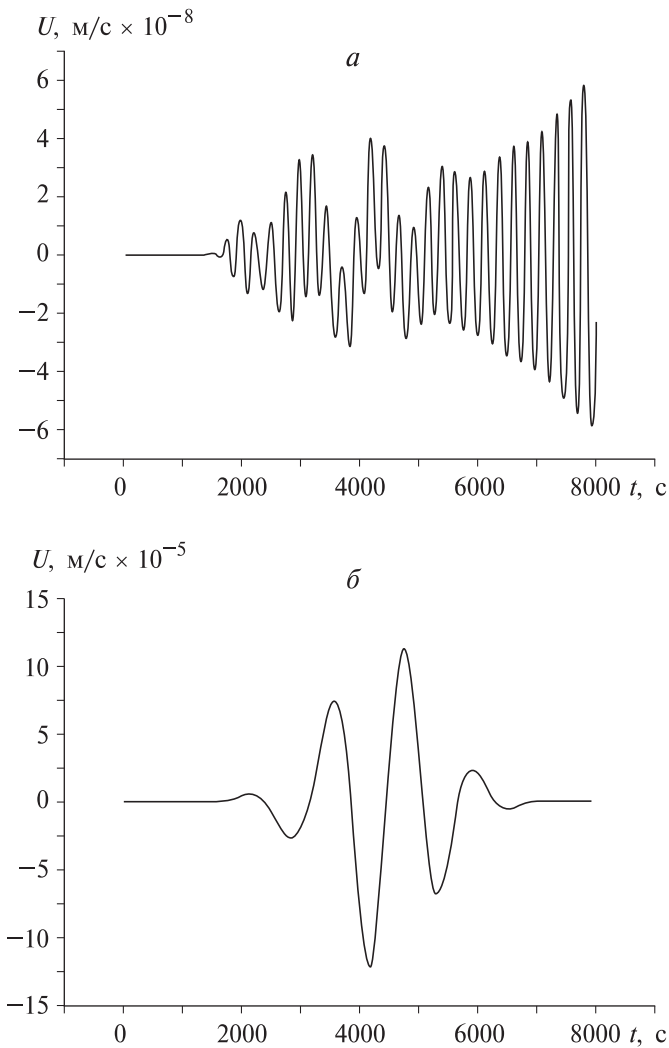


Рис. 2. Зависимость амплитуды горизонтальной скорости  $U$  от времени в фиксированной точке с координатами ( $x = 3000$  км,  $250$  км) для поверхностных источников с периодами  $T = 10$  с (а) и  $1000$  с (б)

комасштабных, короткопериодных — акустических волн. Групповая скорость акустических волн, полученная при моделировании, варьировалась от  $340$  до  $600$  м/с в зависимости от высоты, внутренние гравитационные волны имели скорости порядка  $200$ – $300$  м/с.

Максимальная амплитуда возбуждаемых ВГВ на всем пути распространения имела однозначную зависимость от периода возбуждающей функции в исследуемом диапазоне температур  $T = 10$ – $1000$  с. С увеличением периода максимальная амплитуда ВГВ увеличивалась (рис. 2).

Было исследовано поведение волн и для широкого диапазона амплитуд возбуждающей функции  $\omega_m$  от  $0.001$  до  $10$  м/с (рис. 3). С увеличением амплитуды возбуждающей функции амплитуды горизонтальной и вертикальной скоростей также непрерывно росли. Кроме того, при малых амплитудах возбуждения ( $A < 0.01$  м/с) в исследуемой

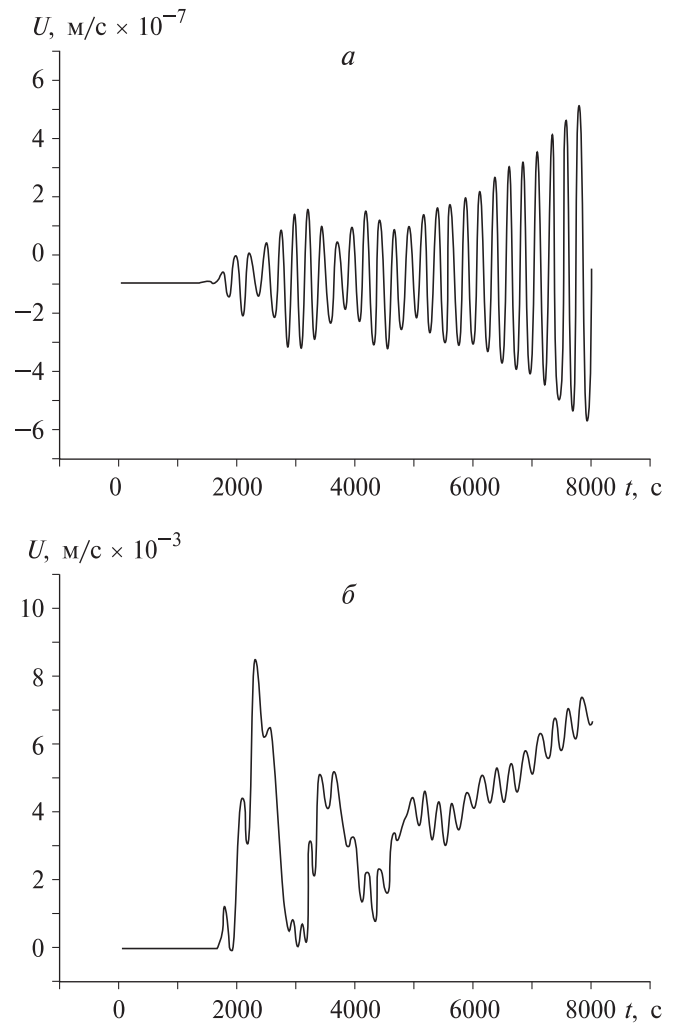


Рис. 3. Зависимости амплитуды горизонтальной скорости  $U$  от времени в фиксированной точке с координатами ( $x = 3000$  км,  $250$  км) для поверхностных источников с амплитудами  $\omega_m = 0.001$  м/с (а) и  $1$  м/с (б)

области в АГВ преобладала в основном акустическая составляющая (с периодами  $\sim 200$  с), при больших амплитудах ( $A > 1$  м/с) доминировали волны ВГВ.

Таким образом, с увеличением периода возбуждающей функции или ее амплитуды эффективность генерации ВГВ в верхней атмосфере возрастает. Рост амплитуды возбуждающей волны или ее периода проявляется в результирующем возмущении в виде более сильного затухания акустической компоненты волны по сравнению с ВГВ.

Полученные результаты хорошо согласуются с современными экспериментальными данными по наблюдениям распространения акустических и внутренних гравитационных волн от приземных источников, описанных, например, в [1] или [3]. Модель воспроизводит основные этапы возмущения атмосферы импульсными источниками и хорошо согласуется со значениями параметров волн, полученных в ходе этих экспериментов.

**Литература**

1. Calais E., Minster J.B. // Physics of Earth and Planetary Interiors. 1998. **105**. P. 167.
2. Francis S.H. // J. Atm. Terr. Phys. 1975. **37**. P. 1011.
3. Перцев Н.Н., Шалимов С.Л. // Геомагнетизм и аэрономия. 1996. **36**. С. 111.
4. Данилов А.Д., Казимировский Э.С., Вергасова Г.В., Хачикян Г.Я. Метеорологические эффекты в ионосфере. Л., 1987.
5. Fitzgerald T.J. // J. Atm. Sol.-Terr. Phys. 1997. **59**, N 7. P. 829.
6. Afraimovich E.L., Perevalova N.P., Plotnikov A.V., Uralov A.M. // Ann. Geophys. 2001. **19**. P. 395.
7. Андреева Е.С., Куницын В.Е. и др. // Космические исследования. 2001. **39**, № 1. С. 13.
8. Госсард Э., Хук У. Волны в атмосфере. М., 1978.
9. Григорьев Г.И. // Изв. вузов. Радиофизика. 1999. **XLII**, № 1. С. 3.
10. Оран Э., Борис Дж. Численное моделирование реагирующих потоков. М., 1990.
11. Ахмедов Р.Р., Куницын В.Е. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 2003. № 3. С. 38 (Moscow University Phys. Bull. 2003. N 3. P. 49).

Поступила в редакцию  
24.11.06