

МОСКОВСКИЙ ОРДЕНА ЛЕНИНА, ОРДЕНА ОКТЯБРЬСКОЙ  
РЕВОЛЮЦИИ, ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ им. М.В. ЛОМОНОСОВА

---

ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

На правах рукописи  
УДК 550.388.2+551.509.33

**Сураев Сергей Николаевич**

**ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ  
АКУСТИКО-ГРАВИТАЦИОННЫХ ВОЛН В ВЕРХНЕЙ  
АТМОСФЕРЕ, ГЕНЕРИРОВАННЫХ РАЗЛИЧНЫМИ  
ПОВЕРХНОСТНЫМИ ИСТОЧНИКАМИ**

Специальность 25.00.29 – физика атмосферы и гидросферы

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Москва 2007 г.

Работа выполнена на кафедре физики атмосферы физического факультета  
Московского Государственного Университета им. М.В. Ломоносова

*Научный руководитель:*  
доктор физико-математических наук,  
профессор

КУНИЦЫН Вячеслав Евгеньевич

*Официальные оппоненты:*

доктор физико-математических наук,  
профессор  
КАЛИНИН Юрий Кириллович

доктор физико-математических наук,  
СЕМЕНОВ Анатолий Иванович

*Ведущая организация:*

Институт динамики геосфер РАН

Защита диссертации состоится «13» декабря 2007 г.  
в \_\_\_\_ часов на заседании Диссертационного совета Д501.001.63  
при МГУ им. М.В. Ломоносова по адресу: 119992 Москва, Ленинские горы,  
физический факультет, аудитория \_\_\_\_\_

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке физического факультета МГУ.

Автореферат разослан «    »                      2007 г.

Ученый секретарь  
Диссертационного совета Д501.001.63  
кандидат физ.-мат. наук

В.Б. СМИРНОВ

**Актуальность.** Процессы, происходящие в атмосфере нашей планеты, оказывают существенное влияние на жизнедеятельность человека. Однако если в нижней атмосфере разнообразные погодные и климатические явления исследуются уже достаточно длительное время, то к процессам, происходящим в верхней атмосфере, обратились относительно недавно, хотя их влияние на человеческую деятельность может быть не менее значительно. Так наблюдаемые в верхней атмосфере магнитные бури оказывают воздействие на функционирование космических и наземных технологических систем, а на распространение радиоволн существенно влияют параметры ионосферы. В свою очередь, динамические процессы естественного и искусственного происхождения, развивающиеся на Земле и в нижней атмосфере, могут изменять структуру и динамику явлений верхней атмосферы.

Таким образом, земная атмосфера и ионосфера является чувствительным индикатором воздействия от разного рода природных и антропогенных поверхностных источников. К этим источникам относятся, прежде всего, землетрясения, вулканы, сильные подземные и наземные взрывы, волны цунами и др. Основным механизмом распространения возмущения от таких источников в верхнюю атмосферу являются акустико-гравитационные волны (АГВ). Из-за резкого спада плотности атмосферы с высотой, эти волны по мере распространения вверх усиливаются по амплитуде и приводят к сильным возмущениям в верхней атмосфере.

Анализ и изучение отклика атмосферы на различные антропогенные и природные поверхностные источники имеет большое значение для развития физики атмосферы [1-3]. Ряд теоретических и экспериментальных задач, связанных с АГВ, был рассмотрен в циклах работ [4-6]. Кроме того, в последнее время активно ведутся исследования по изучению АГВ, которые иногда регистрируются до и после землетрясений [7-8].

В последние годы резкое увеличение возможностей современных компьютеров и развитие численных методов вычислительной гидродинамики открыли новые возможности в исследовании физики атмосферы, такие как изучение генерации и распространения атмосферных волн с помощью численного решения нелинейных уравнений геофизической гидродинамики. Представленная работа посвящена моделированию генерации и распространения АГВ в верхней атмосфере, генерированных наземными поверхностными источниками разнообразной природы.

### **Цели работы:**

- Усовершенствование численного метода и алгоритма решения двумерной задачи генерации АГВ в верхней атмосфере и включение поверхностных источников разнообразной природы в модель.

- Моделирование генерации и распространения АГВ на больших пространственных областях для исследуемых типов поверхностных источников, получение общих закономерностей изменения характеристик возмущения от параметров источника, сопоставление модельных результатов с экспериментальными данными.

### **Задачи работы:**

- Модернизация и доработка численного метода решения задачи двумерного моделирования генерации и распространения АГВ на большие горизонтальные и вертикальные расстояния на основе системы уравнений с учетом предложенных граничных условий и способов задания различных источников.

- Моделирование волнообразных возмущений в верхней атмосфере для различных типов поверхностных источников: длиннопериодные колебания поверхности земли, импульсные колебания поверхности земли во время землетрясений и взрывов, длиннопериодные колебания водной поверхности – сейши, температурный нагрев приземного слоя атмосферы, движение волны цунами.

- Моделирование генерации и распространения АГВ для различных характеристик фоновой атмосферы.

- Моделирование генерации и распространения АГВ для различных характеристик источника, таких как период, амплитуда, пространственный масштаб, форма импульса.

- Сопоставление результатов моделирования с экспериментальными данными

### **Научная новизна результатов:**

- Усовершенствован численный метод решения двумерной системы уравнений геофизической гидродинамики, на основе которой построена модель распространения АГВ в стратифицированной атмосфере с учетом нелинейных и диссипативных эффектов. Предложены граничные условия и способы задания различных источников в модели, что позволило осуществить моделирование генерации и распространения АГВ на больших пространственных областях и для поверхностных источников разнообразной природы.

- Проведено моделирование генерации и распространения возмущений в верхней атмосфере от разного типа поверхностных источников: сильных землетрясений и взрывов, длиннопериодных колебаний земной поверхности,

длиннопериодных колебаний водной поверхности больших масштабов (сейши), температурного нагрева поверхностного слоя атмосферы, волн цунами. Впервые осуществлено моделирование АГВ от таких источников как сейши, температурный нагрев приземного слоя атмосферы, волн цунами в стратифицированной диссипативной атмосфере и установлена принципиальная возможность и условия возбуждения этими источниками АГВ. Получены пространственные распределения возмущений горизонтальной и вертикальной скорости  $u$  и  $w$  гидродинамических частиц, возмущений температуры  $T$  и плотности  $\rho$ , а также вертикальные, горизонтальные профили и временные зависимости характеристик возмущения.

- Впервые получены общие пространственно-временные закономерности изменения характеристик АГВ (отдельно для акустических и внутренних гравитационных волн) в верхней атмосфере в зависимости от параметров поверхностного источника, таких как амплитуда, период, пространственный масштаб и форма импульса. Получены зависимости амплитуды максимального отклика  $u$ ,  $w$ ,  $T$ ,  $\rho$  в зависимости от высоты для различных горизонтальных расстояний от источника. Построены кривые чувствительности нейтральной атмосферы на различных расстояниях и высотах от источника и для различных периодов источника.

- Впервые установлены закономерности изменения периода, амплитуды, длины волны и других характеристик возбуждаемых акустических и внутренних гравитационных волн в зависимости от параметров фоновой атмосферы и расстояния от эпицентра источника.

**Научная и практическая ценность работы.** После осуществления модернизации разработанного на кафедре физики атмосферы [9] численного метода решения задачи генерации и распространения АГВ в стратифицированной диссипативной атмосфере значительно повысилась численная устойчивость метода, появились новые возможности по расчёту возмущений от длиннопериодных колебательных источников на больших пространственных областях и длительных временных промежутках (до 10 часов). Благодаря совершенствованию численного метода стало возможно моделирование возмущений от наземных источников, где варьируется не только вертикальная колебательная скорость, но и вертикальное смещение и температура. Для различных известных и предполагаемых поверхностных источников возбуждения АГВ в верхней атмосфере были предложены модельные функции задания источника на нижней границе области моделирования. Все это позволило нам впервые промоделировать температурные приповерхностные источники, имитирующие нагрев поверхностного слоя атмосферы, длиннопериодные колебания водной

поверхности, называемые сейшами, а также такое мощное природное явление, как цунами. Полученные численные данные об амплитудах и характеристиках длиннопериодных колебаний земной поверхности могут быть использованы для изучения и идентификации возмущений в ионосфере, наблюдаемых до и после землетрясений. Полученные модельные данные могут также быть использованы для объяснения некоторых предвестников сейсмических явлений и исследования гипотез выхода литосферных газов и генерации инфразвуковых волн в период подготовки землетрясения. Полученные пространственно-временные зависимости характеристик возмущения от параметров источника, а также установленные закономерности между ними могут быть использованы в дальнейшем для постановки и интерпретации экспериментов по наблюдению атмосферных и ионосферных возмущений, генерированных поверхностными источниками разнообразной природы.

**Апробация работы.** Представленные результаты докладывались на X Всероссийской школе-семинаре «Волновые явления в неоднородных средах» (Москва, 2006), Международном симпозиуме «Атмосферная радиация» МСАР-2006 (Санкт-Петербург, 2006), конференции «Оптика атмосферы и океана» (Томск, 2006) и 36-ой научной ассамблеи COSPAR 2006. По теме диссертации опубликовано 6 работ в отечественных и зарубежных изданиях.

#### **Защищаемые положения:**

1. Модернизированный численный метод решения системы нелинейных уравнений гидродинамики и граничные условия, описывающие распространение АГВ в двумерной сжимаемой диссипативной стратифицированной атмосфере. Способы задания источников в модели и пространственно-временные функции представления поверхностных источников разнообразной природы, описывающие генерацию АГВ в атмосфере.

2. Общие закономерности распространения двумерных акустических и внутренних гравитационных волн от исследуемых поверхностных источников в верхней атмосфере с фоновым температурным профилем, имеющим мезопаузу. Результаты моделирования пространственных и временных распределений возмущений вертикальной  $w$  и горизонтальной  $u$  колебательной скорости гидродинамических частиц, плотности  $\rho$ , температуры  $T$  при прохождении АГВ, генерированных исследуемыми типами поверхностных источников.

3. Результаты расчетов высотных профилей максимальных по времени значений температуры  $T$ , вертикальной  $w$  и горизонтальной  $u$  скоростей гидродинамических частиц. Результаты расчетов максимального отклика

нейтральной атмосферы для различных периодов источников и для различных расстояний от источника.

4. Пространственно-временные закономерности изменения характеристик возмущения в зависимости от периода, амплитуды, формы импульса и пространственного масштаба поверхностного источника

5. Закономерности изменения периода и амплитуды акустических и внутренних гравитационных волн в зависимости от параметров фоновой атмосферы и расстояния от эпицентра источника.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка цитируемой литературы. Работа содержит 143 страницы текста, 55 рисунков, 2 таблицы.

### **Краткое содержание работы.**

**Во введении** сформулирована проблема изучения акустико-гравитационных волн в верхней атмосфере, описана актуальность исследований в этом направлении в настоящее время. Рассмотрены цели и задачи работы, показана научная новизна работы и представлены защищаемые положения.

**В первой главе** представлен подробный анализ проблемы изучения акустико-гравитационных волн в верхней атмосфере, а также связанных с ними явлений перемещающихся ионосферных возмущений (ПИВ) на основе представленных в современной литературе теоретических и экспериментальных работ по данной тематике.

*В Первом параграфе* описывается взаимосвязь явления акустико-гравитационных волн с другими природными и антропогенными процессами, происходящими в нижней и верхней атмосфере. Показаны основные процессы, способствующие распространению АГВ на большие расстояния и увеличению их амплитуды в верхней атмосфере. Представлены основные проблемы в изучении данного типа волновых явлений, главная из которых заключается в скудности данных об амплитуде, форме, скорости, периоде и других характеристиках волновых пакетов АГВ [3]. Отсутствует и понимание конкретных механизмов формирования этих возмущений в связи с недостаточным развитием теории распространения АГВ в реальной атмосфере [2-3].

*Во Втором параграфе* представлен систематизированный обзор общих закономерностей распространения и основных спектральных характеристик

внутренних гравитационных волн (ВГВ), которые часто являются наиболее энергетической частью АГВ [10]. Указаны основные механизмы диссипации ВГВ в верхней атмосфере, к которым относятся, прежде всего, молекулярная вязкость, теплопроводность и ионное торможение. Описаны основные природные источники формирования ВГВ, расположенные в самой атмосфере: циклоны, холодные фронты, струйные течения и др [11].

В *третьем параграфе* дан краткий обзор теории распространения АГВ в атмосфере, разработка которой началась с 1960-х годов с работы [12]. Описаны основные научные достижения в этой области, сделанные в последнее время [10,11]. Описаны основные различия в характеристиках и условиях распространения акустических (АВ) и гравитационных волн, которые соответствуют двум основным частям спектра АГВ. Перечислены и описаны основные доказательства существования АГВ в атмосфере Земли.

В *четвертом параграфе* представлены экспериментальные результаты исследования ВГВ и связанных с ними явлений ПИВ. Указаны основные параметры наблюдаемых ионосферных возмущений, дана современная интерпретация наблюдаемых свойств ПИВ, указано что их распространение локализовано в основном на высотах около 100 км и связано с формированием на этих высотах волновода [13]. Затрагивается вопрос различных современных методов детектирования подобных возмущений [14].

В *пятом параграфе* описываются особенности и основные характеристики ионосферных возмущений, генерированных именно поверхностными приземными источниками. К ним, прежде всего, относятся сильные химические и ядерные взрывы, землетрясения, извержения вулканов и др. Описываются многие крупные эксперименты по исследованию возникающих АГВ после крупных взрывов [15,2,1] и землетрясений [3].

В *шестом параграфе* дается классификация всех возможных источников АГВ [10] и представляется обзор отдельных немногочисленных теоретических работ в области изучения и моделирования АГВ от таких источников [16-17]. Дается теоретическая интерпретация механизмов генерации АГВ поверхностными источниками в этих работах, приводятся основные результаты. Однако недостатком практически всех представленных теоретических работ является исследование распространения АГВ либо только в изотермической атмосфере, либо отдельно для акустической и гравитационной составляющей спектра возмущения.

**В второй главе** рассматривается численная модель генерации и распространения АГВ в двумерной атмосфере, описывается численный метод решения задачи а также представляются и обосновываются различные способы задания источников.



В *Первом параграфе* на основе системы нелинейных уравнений гидродинамики в Эйлеровой форме строится система уравнений в частных производных, удовлетворяющая требованиям представленной задачи для двумерной, плоскопараллельной, сжимаемой атмосферы с учетом диссипации, нелинейности и зонального ветра [9,18]:

$$\left[ \begin{array}{l}
 \frac{\partial \rho'}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x}[(\rho_0 + \rho')u] - \frac{\partial}{\partial z}[(\rho_0 + \rho')w] - U_0 \frac{\partial \rho'}{\partial x} \\
 \frac{\partial u}{\partial t} = -u \frac{\partial u}{\partial x} - U_0 \frac{\partial u}{\partial x} - w \frac{\partial u}{\partial z} - w \frac{\partial U_0}{\partial z} - A_1 \frac{1}{\rho_0 + \rho'} \frac{\partial p'}{\partial x} - A_2 \chi u \\
 \frac{\partial w}{\partial t} = -u \frac{\partial w}{\partial x} - U_0 \frac{\partial w}{\partial x} - w \frac{\partial w}{\partial z} - A_1 \frac{1}{\rho_0 + \rho'} \frac{\partial p'}{\partial z} - A_2 \chi w - A_3 g(z) \frac{\rho'}{\rho_0 + \rho'} \\
 \frac{\partial T'}{\partial t} = -\left( u \frac{\partial T'}{\partial x} + U_0 \frac{\partial T'}{\partial x} + w \frac{\partial (T_0 + T')}{\partial z} \right) - A_4 \left( \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) - A_5 \left( \frac{\partial^2 T'}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T'}{\partial z^2} \right) \\
 p' = (\rho_0 T' + \rho' T_0 + \rho' T') / m_0(z)
 \end{array} \right. \quad (1)$$

где ось  $z$  направлена вертикально вверх, а ось  $x$  направлена горизонтально и проходит через эпицентр поверхностного возмущения,  $u$  и  $w$  компоненты скорости движения частиц атмосферы в направлениях осей  $x$  и  $z$  соответственно.  $A_1, A_2, A_3, A_4, A_5$  – безразмерные постоянные. Первое уравнение – это уравнение неразрывности, второе и третье – уравнения Навье-Стокса, четвертое – уравнение сохранения энергии, и, последнее – это уравнение состояния идеального газа.  $\rho$  – плотность,  $T$  – температура,  $p$  – давление,  $m_0$  – относительная молекулярная масса воздуха,  $U_0$  – компонента скорости зонального ветра вдоль оси  $x$ . Индексами «'» и «0» обозначаются возмущенные и невозмущенные части термодинамических параметров, соответственно. Учет сил вязкости и ионного торможения взят в форме Релея  $F^d = -\alpha \bar{v}$ ,  $\chi = \alpha / \rho$ . Т.е. в связи с экспоненциальным уменьшением плотности с высотой, коэффициент трения с высотой растет. Здесь  $\alpha(z)$  – коэффициент вязкости, значение которого на разных высотах соответствует разным механизмам диссипации. Граничные условия задавались на четырех границах: двух горизонтальных и двух вертикальных. Так для плотности и температуры на нижней границе предполагалась непрерывность. Фоновые профили плотности и температуры атмосферы брались из модели MSISE-90.

Модельные расчеты для различных профилей фонового зонального ветра показали слабую зависимость характеристик получаемых возмущений от параметра  $U_0$ . К такому же выводу при моделировании распространения АГВ пришли, например, в [17].

Во *Втором параграфе* описывается модернизированный численный метод решения задачи. Особенностью данной задачи является присутствие в решении одновременно и медленных и быстрых волновых движений с сильно меняющимися амплитудами, длительные временные промежутки расчета и одновременно малый шаг по времени (не более 0.1 с), большие пространственные масштабы разностной сетки, нелинейность решаемой задачи. Все это приводит к очень длительному по времени расчёту задачи даже на современных персональных компьютерах.

Численный расчет осуществлялся с помощью явного конечно-разностного метода Flux Corrected Transport [19]. Принцип метода заключается в том, что для обеспечения устойчивости решения сначала вводится так называемая искусственная диффузия, а потом при помощи коэффициентов антидиффузии минимизируется численная диффузия. Система уравнений (1) была расщеплена на две системы уравнений для координатных направлений  $x$  и  $z$ , каждая из которых решалась попеременно на отдельном временном шаге.

В *Третьем параграфе* подробно рассматривается представление каждого исследуемого источника в модели. Все источники задавались на нижней границе области моделирования. Для задания каждого источника использовалась своя модельная функция, которая соответствует природе предполагаемого явления.

Землетрясения, взрывы и длиннопериодные колебания земной поверхности представлялись функцией :

$$w = w_m \cos\left(\frac{2\pi(t-t_0)}{T}\right) \cdot f(x), \quad t_0 \leq t \leq t_0 + nT \quad (2)$$

Здесь,  $w_m$  - амплитуда возмущения в единицах скорости вертикального смещения,  $t_0$  - момент начала возмущения,  $T$  - период колебания,  $f(x)$  - пространственная форма импульса, которая в простейшем случае представлялась в виде  $f(x) = \exp\left(-\left(\frac{x-x_c}{Dx}\right)^2\right)$ , где  $x_c$  - горизонтальная координата эпицентра источника. Естественно, что и для землетрясений, и для взрывов, и для длиннопериодных колебаний поверхности земли пространственная форма импульса  $f(x)$ , период колебаний  $T$ , амплитуда вертикальной скорости  $w_m$  имели свои характерные диапазоны возможных значений.

На больших озерах и водохранилищах давно известны такие широкомасштабные природные явления как длиннопериодные колебания

водной поверхности, называемые сейшами. Сейши представляют собой стоячие волны с большим периодом, возникающие в относительно замкнутых водоемах в основном благодаря ветровому нагону воды [20]. Исходя из особенностей этого природного явления для его включения в задачу была выбрана следующая модельная функция:

$$z = z_m f(t) \cdot \cos\left(\pi\left(\frac{x - x_c}{Dx}\right)\right), \quad t_0 \leq t \leq t_0 + nT, (x - x_c) \leq Dx, \quad (3)$$

где  $T$  – период источника,  $z_m$  - амплитуда вертикального смещения водной поверхности у берегов водохранилища, а функция  $f(t)$  в простейшем случае представляется в виде  $f(t) = \sin\left(\frac{2\pi(t - t_0)}{T}\right)$ , однако на самом деле в экспериментах наблюдалась достаточно сложная и сильно изрезанная временная функция  $f(t)$ .

К возможным источникам генерации АГВ относятся и такие явления, как температурные инверсии в нижней части атмосферы, извержения вулканов, возмущение набегающего потока воздуха крупными «теплыми» мегаполисами, солнечное нагревание и фотодиссоциация в тропосфере [21]. В качестве температурного источника задавалась следующая функция:

$$T = T_m \sin^2\left(\frac{2\pi(t - t_0)}{T}\right) \cdot f(x), \quad t_0 \leq t \leq t_0 + nT, \quad (4)$$

где  $T_m$  - характеризует амплитуду возмущения в температурных единицах,  $f(x)$  - форму импульса,  $T$  – период источника.

И, наконец, явление, которое, как уже было отмечено отдельными авторами, способно вызывать ПИВ значительной интенсивности в верхней атмосфере – это движущиеся волны цунами:

$$z = z_m f(x) \cdot \cos\left(2\pi\left(\frac{x - V_u \cdot t}{\lambda}\right)\right), \quad (x - V_u \cdot t) \leq \lambda, \quad (5)$$

$z_m$  - амплитуда вертикального смещения водной поверхности,  $V_u$  - горизонтальная скорость волны цунами,  $\lambda$  - пространственный масштаб или длина одиночной волны. Функция  $f(x)$  – функция вертикального смещения водной поверхности от координаты  $x$ . Функция задавалась таким образом, что в ней учитывались все этапы развития цунами, начиная от возникновения цунами в открытом океане и заканчивая выходом волны на берег.

**В третьей главе** описываются результаты моделирования возмущений для различных фоновых характеристик атмосферы. Представлены результаты апробации модели, полученные для простейших источников в однородной атмосфере. Показываются общие для всех источников этапы распространения возмущения в стратифицированной диссипативной атмосфере. Исследуется влияние температурной стратификации на характеристики возбуждаемых АГВ.

В *Первом параграфе* представлены результаты апробации модели на простейших импульсных источниках для фоновой атмосферы с однородным распределением характеристик. Использование данного приближения позволило нам получить результаты, которые с достаточной степенью точности соответствуют некоторым примерам моделирования генерации акустических и гравитационных волн в изотермической и однородной атмосфере, описанным в литературе [16].

В однородной атмосфере наблюдалась устойчивая область возмущения непосредственно над источником, с характерным спаданием амплитуды возмущения с высотой. В области над источником практически не наблюдалось волн с частотами, отличными от частоты источника. Дискретный спектр волн наблюдался лишь тогда, когда появлялась стратификация по высоте и происходил захват волн между областями с сильными плотностными и температурными градиентами или земной поверхностью. При удалении в горизонтальном направлении от вертикальной оси над источником наблюдалось расплывание пакета излучаемых волн, сопровождающееся увеличением периода и резким уменьшением амплитуды.

Моделирование на пространственных областях до 1000 км по высоте показало, что на картину возмущения, расположенную в основном на высотах 0-450 км влияет картина фоновой атмосферы на этих же высотах, а структура атмосферы выше 450-500 км влияние не оказывает. Это позволило нам в дальнейшем ограничить область моделирования по высоте 500 километрами.

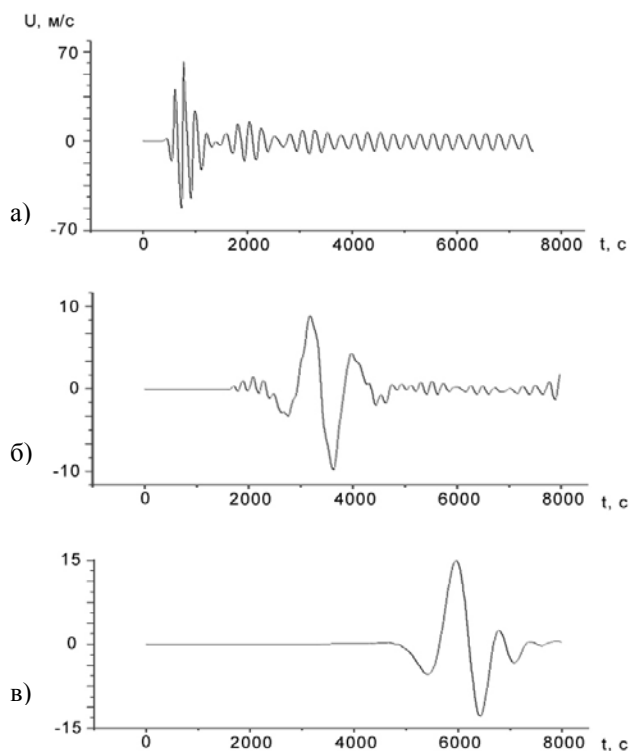
Во *Втором параграфе* описываются основные пространственно-временные закономерности генерации и распространения АГВ от поверхностного источника в стратифицированной диссипативной атмосфере. Область моделирования составляла 4000 км по горизонтали и 500 км по вертикали, шаг по времени равнялся 0.1 с, шаг по пространственной сетке 5 км в обоих направлениях. Моделирование производилось для атмосферы с реалистичским профилем температуры с наличием мезопаузы на высоте ~100 км и для различных сезонов года. Были определены следующие этапы распространения возмущения от поверхностного источника в верхнюю атмосферу:

1) Формирование над эпицентром источника в течение первых 1000-1500 с на высотах 100-120 км и выше устойчивой картины акустического возмущения,

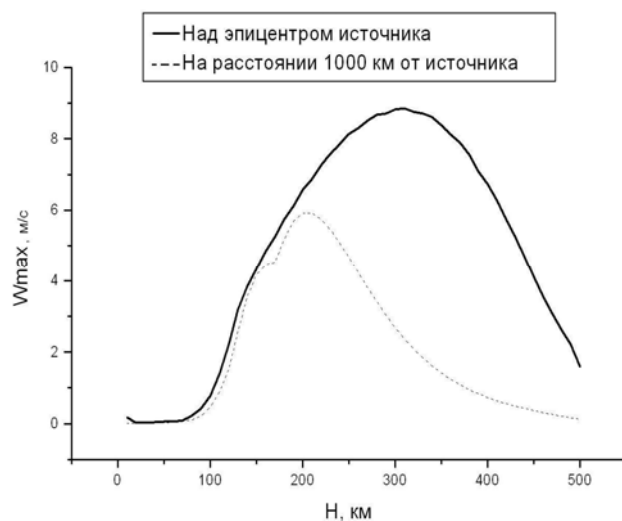
масштабы которого зависели от характеристик источника и в среднем составляли не более 1000 км по горизонтали и 400 км по вертикали.

2) Наблюдалось постепенное отделение от области акустического возмущения над источником и расхождение в противоположных горизонтальных направлениях пакетов ВГВ (протяженностью от 2 до нескольких десятков длин волн). Процесс отделения пакетов ВГВ от акустического возмущения происходил в среднем через несколько десятков минут после начала действия источника. ВГВ захватывались в волноводный канал, образуемый градиентами плотности и температуры на высотах мезопаузы и выше, и распространялись в горизонтальных направлениях от источника с небольшим наклоном вниз.

3) В течение нескольких часов после начала действия приземного источника над эпицентром наблюдалась практически неподвижная и стабильная в границах область акустического возмущения. Продолжалось движение ВГВ в горизонтальных направлениях с относительно небольшим затуханием. Расчёты показали возможность их обнаружения на горизонтальных расстояниях до несколько тысяч километров от эпицентра.



**рис.1.** Зависимость амплитуды возмущения горизонтальной скорости  $u$  от времени на высоте 200 км на горизонтальном расстоянии от эпицентра землетрясения: а) 200 км, б) 950 км в) 1700 км.



**рис.2.** Зависимости максимальной по времени вертикальной скорости частиц  $w$  над источником и в области расположенной на горизонтальном расстоянии 1000 км от источника.

С удалением от источника для всех исследуемых фоновых профилей атмосферы наблюдался рост периода и длины волны гравитационных волн, связанный с наклонным распространением ВГВ с большими периодами. АВ благодаря быстрому затуханию на горизонтальном удалении более 1000 км практически не наблюдались (рис.1). Максимальные амплитуды вертикальной, горизонтальной скорости АВ, а также возмущений температуры в области непосредственно над источником наблюдались на высотах 250-350 км. На значительном горизонтальном удалении от источника, где преобладали в основном ВГВ, максимумы  $u$ ,  $w$ ,  $T$  смещались в сторону мезопаузы на высоты  $\sim$  150-200 км (рис.2).

В *Третьем параграфе* описываются исследования влияния поведения температурного профиля на уровне мезопаузы на характеристики АГВ. Установлены закономерности изменения периода и амплитуды ВГВ в зависимости от «глубины» и «ширины» мезопаузы. Подтверждены экспериментальные данные, свидетельствующие об уменьшении амплитуды АГВ в летний период, по сравнению с зимним периодом, когда мезопауза имеет меньшую глубину [22].

Сопоставление результатов моделирования с экспериментальными данными показало качественное совпадение свойств моделируемых АГВ и характеристик наблюдаемых ПИВ для исследуемых источников в реальной атмосфере.

**В четвертой главе** анализируются параметры отклика атмосферы в зависимости от изменения периода, амплитуды, пространственного масштаба и формы импульса поверхностного источника.

В *Первом параграфе* определяются основные закономерности в пространственно-временной картине распространении АГВ, которые проявляются при увеличении периода источника в диапазоне от 1 с и до 3000 с. Были определены 3 характерных диапазона изменения периода источника при которых картина возмущения в верхней атмосфере имела свои характерные особенности:

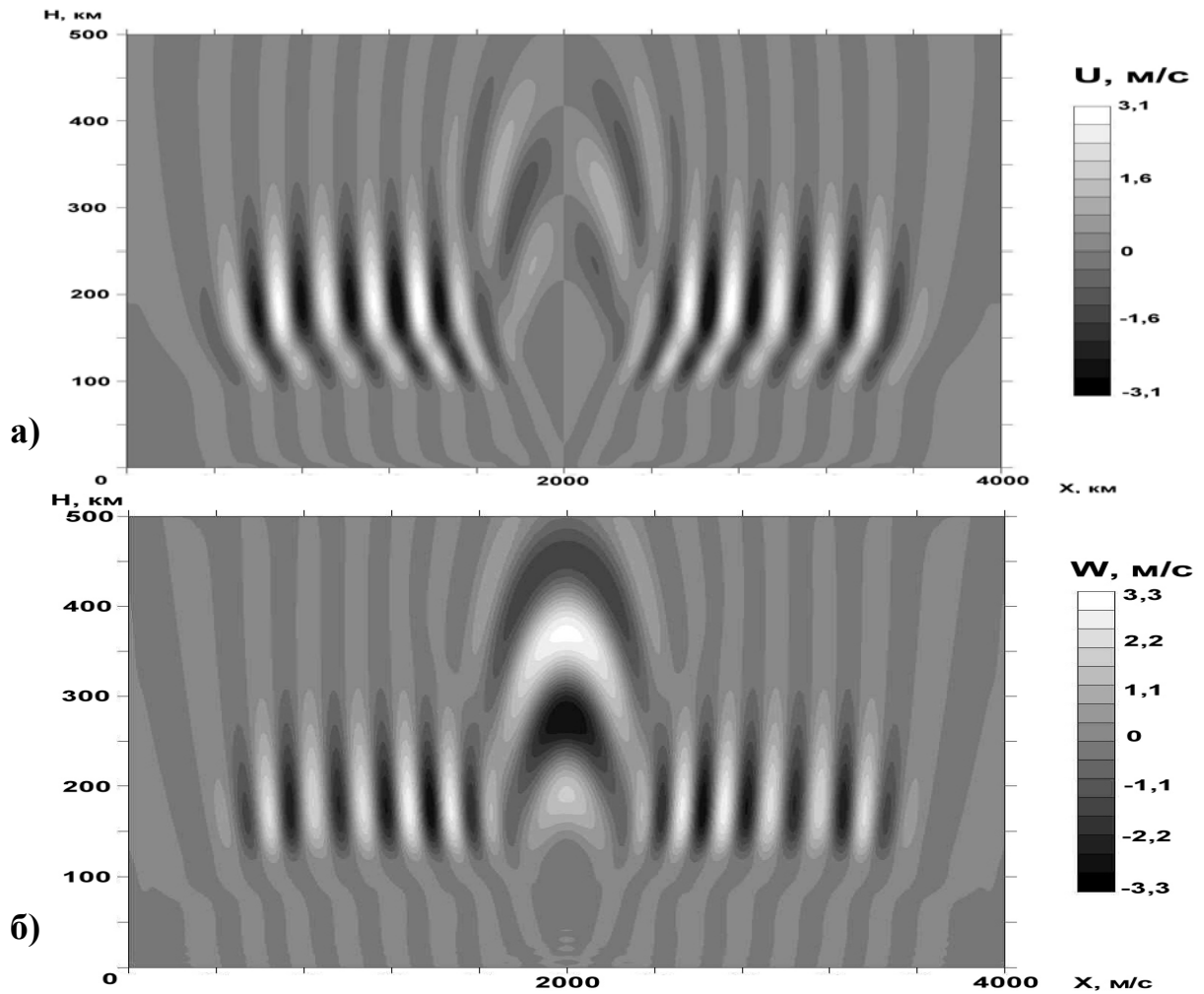
1. Для периодов источника  $T < 300-400$  с основная энергия возмущения была сосредоточена в акустическом диапазоне. Над эпицентром источника формировалась устойчивая неподвижная область акустического возмущения с большими амплитудами АВ и горизонтальными масштабами до 1000-1500 км. Пакеты волн ВГВ имели относительно небольшие амплитуды (до 1 м/с) и пространственные размеры по сравнению с акустическим возмущением. Длина пакета составляла 1-2 длины волны ВГВ.

2. В диапазоне периодов источника  $T \sim 700-1200$  с наблюдалась «резонансная» картина с резким усилением амплитуд ВГВ вплоть до нескольких десятков м/с, увеличением их пространственных размеров как по высоте, так и по длине. Протяженность пакета волн ВГВ составляла несколько десятков и даже сотен длин волн. По высоте ВГВ простирались от 100 до 450 км. По амплитуде  $u$ ,  $w$ ,  $T$  ВГВ были сравнимы по величине, либо превышали соответствующие амплитуды АВ в области над источником (рис.3).

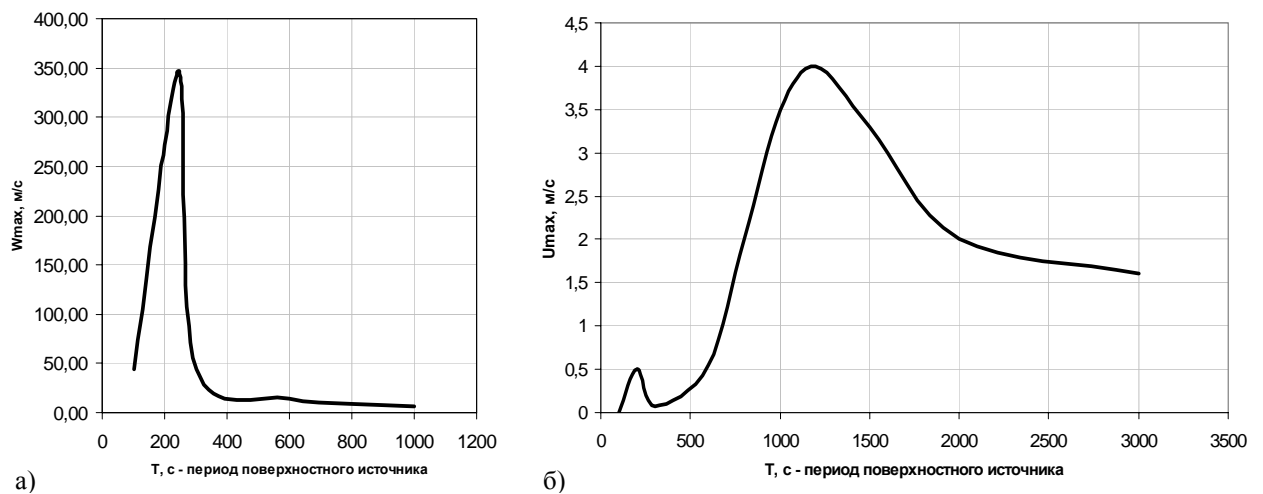
3. При периодах источника  $T > 1200-1400$  с генерация гравитационных волн также происходила достаточно эффективно, однако амплитуды этих волн были все же значительно меньше, чем при периоде источника  $T \sim 700-1200$  с и составляли в среднем не более нескольких м/с. Длина пакета ВГВ сокращалась до 2-5 длин волн. Акустический купол над источником имел незначительные размеры, а амплитуды АВ были, как правило, значительно меньше, чем у ВГВ.

Были установлены следующие особенности возмущения при изменении периода источника. С увеличением периода поверхностного источника периоды АВ и ВГВ сначала увеличивались, после чего, достигая максимума при периодах источника 200-250 с для АВ и 700-1200 с для ВГВ, наблюдалась стабилизация периодов АВ и ВГВ на максимальных значениях.

Чувствительность атмосферы в горизонтальном и вертикальном направлениях изменялась по-разному, причем её характер отличался для компонент скорости и температуры. Так если над источником наибольший отклик атмосферы достигался на частоте источника приблизительно равной частоте Ваясья-Бранта ( $T \sim 230-250$  с), то на горизонтальном удалении от источника максимум амплитуд смещался в область низких частот  $T \sim 1000-1200$  с (на удалении 1000 км от источника). Причем если над источником максимальный отклик располагался, как правило, на высотах 250-300 км, то при смещении от источника по горизонтали максимальный отклик смещался в сторону оси волноводного канала 100-150 км. В результате, как показано на рис.4, кривые чувствительности имели максимум при двух периодах источника. Усиление амплитуд возмущения в верхней атмосфере по сравнению со значениями тех же величин у поверхности земли составляло  $10^3 - 10^4$  раз. Данное значение коэффициента усиления на ионосферных высотах описывалось многими авторами [10,11].



**рис.3.** Пространственное распределение горизонтальной  $u$  (а) и вертикальной  $w$  (б) скорости частиц в момент времени  $t=6000$ с после начала возмущения. Функция источника типа (2),  $w_m = 0,01$  м/с,  $Dx=100$  км,  $T=800$  с.

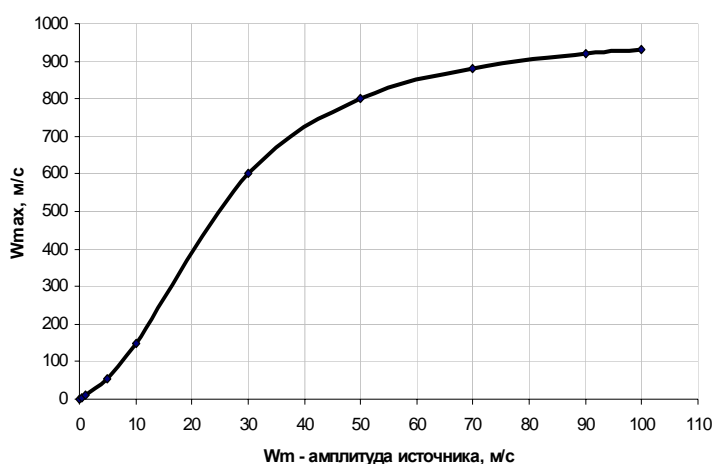


**рис.4.** Зависимость максимального во времени значения вертикальной скорости  $w$  (а) непосредственно над источником и горизонтальной скорости  $u$  (б) на расстоянии 1000 км от периода поверхностного источника



Во *Втором параграфе* представлены результаты изучения влияния амплитуды, пространственного масштаба и формы импульса источника на период, длину волны и амплитуду АВ и ВГВ. Представлены результаты для двух различных источников: температурный нагрев приземного слоя атмосферы – диапазон изменения амплитуды  $T_m=0.1-5$  К, источник, моделирующий землетрясения и взрывы - диапазон изменения амплитуды  $w_m=0.01-100$  м/с.

С увеличением амплитуды источника, наблюдалась тенденция увеличения амплитуды температуры  $T$ , горизонтальной и вертикальной компонент скорости  $u$  и  $w$  гидродинамических частиц. Особенно значительное увеличение амплитуды наблюдалось в области над источником для вертикальной



**рис.5.** Зависимость максимальной амплитуды вертикальной скорости  $w$  возмущения над источником от амплитуды источника, моделирующего взрыв, над источником

компоненты скорости, которая является основной для акустических волн. Нелинейность задачи при увеличении амплитуды проявлялась в ограничении роста амплитуды возмущения при сверх больших амплитудах источника (рис.5). Кроме того, при исследовании источника, моделирующего сильный взрыв, амплитуды вертикальной скорости у поверхности земли для которого могли достигать сотен м/с, появляются сильно нелинейные N-образные волны или ударно-акустические волны (УАВ). Данный тип волн, распространяющий от сильных взрывов вверх от источника был описан, например [15].

Моделирование также показало, что имеется однозначная зависимость амплитуды возмущения и от пространственного масштаба источника. В целом увеличение пространственного масштаба приводит к росту возмущений температуры, плотности, горизонтальной и вертикальной компонент скоростей частиц на ионосферных высотах. Однако эта зависимость, как правило, намного слабее, чем зависимости амплитуды возмущения от периода источника и от амплитуды источника. Во всех случаях наблюдалась отчетливая картина «насыщения» амплитуды ВГВ при пространственном масштабе источника, как правило, более  $Dx \sim 200$  км.

При увеличении пространственных масштабов источников в верхней атмосфере возрастают и горизонтальные длины гравитационных волн. Для температурного источника сравнительные оценки периодов ВГВ показали, что увеличение пространственного масштаба источника на 100 км приводит к увеличению горизонтальной длины волны гравитационных волн на 150-180 км. При увеличении пространственного масштаба источник начинает эффективно генерировать в основном ВГВ, а акустические волны либо исчезают вовсе, либо имеют стабильно малые амплитуды (не превышающие долей м/с при  $Dx > 200$  км).

Сильного влияния формы импульса источника на характеристики АГВ отмечено не было.

**В пятой главе** подробно рассматриваются пространственно-временные картины возмущения в верхней атмосфере для различных типов поверхностных источников

В *Первом параграфе* рассматривается источник, задаваемый уравнением (2), и описывающий колебания земной поверхности перед и во время землетрясений, а также во время взрывов. Параметры возмущений от таких источников наиболее подробно описаны в литературе [15, 6, 1-3]. Землетрясения и взрывы имели пространственный масштаб  $Dx$  до 100 км, амплитуду  $w_m$  до 10 м/с, и период  $T$  не более 1-2с. Длиннопериодные колебания земной поверхности -  $Dx$  до 400 км, период  $T=100-10000$  с, амплитуда  $w_m$  задавалась так, чтобы амплитуда смещения поверхности не превышала 1 м [7,8] для любого исследуемого периода. Была установлена принципиальная возможность генерации АГВ такими источниками.

Для землетрясений и взрывов спектр возмущения был сосредоточен в основном в акустическом диапазоне, а само возмущения располагалось над источником. Амплитуды вертикальной скорости частиц АВ над источником после мощных взрывов могли достигать нескольких сотен м/с. ВГВ имели слабо выраженный характер, их периоды равнялись  $T \sim 750-900$  с.

Для длиннопериодных колебаний земной поверхности максимально возможные амплитуды горизонтальной и вертикальной скорости частиц для АВ составили не более 20-30 м/с, для ВГВ - 10-20 м/с. Возмущение в основном состояло из гравитационных волн с периодами  $T > 1000$  с, которые распространялись без значительного затухания на расстояния в несколько тысяч километров. Эти данные позволяют утверждать о том, что для возможного обнаружения надежных сигнальных признаков землетрясений необходимо исследовать ионосферные высоты на больших горизонтальных расстояниях от источника [7,8].

Сравнительный анализ показал также, что амплитуда генерированных гравитационных волн в случае слабого длиннопериодного источника больше, чем в случае сильного короткопериодного.

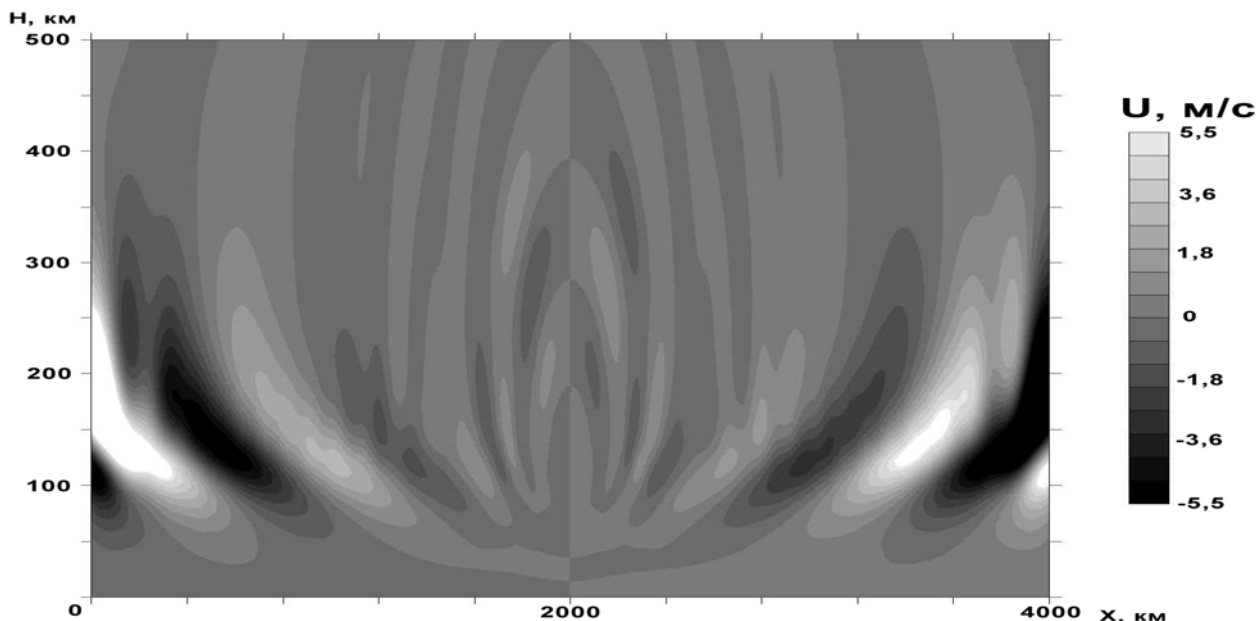
Во *Втором параграфе* рассматривается источник, который задавался функцией (3) и моделировал сейши. Параметры источника в этом случае были следующие:  $Dx \sim 80-500$  км, период  $T \sim 30$  мин.-5 ч., амплитуда соответствовала поднятию воды у берегов водохранилища на  $z_m \sim 0,3-3$  м [20]. Моделирование показало, что сейши способны генерировать в основном длиннопериодные АГВ в атмосферу, однако их амплитуды сравнительно невелики. Амплитуды вертикальной и горизонтальной скорости частиц в ВГВ, которые возбуждались модельными источниками, соответствующими сейшам на озерах Женева, Байкал, Мичиган, не превышали, как правило, 1 м/с.

Волны ВГВ распространялись в виде нескольких последовательных пакетов, идущих друг за другом от источника с задержкой 1,5-2 часа. Горизонтальная фазовая скорость гравитационных волн лежала в пределах 280-300 м/с. Период наблюдаемых ВГВ  $T \sim 900-1500$  с, длина волны  $\lambda = 320-450$  км.

В *Третьем параграфе* представлены результаты моделирования возмущений, вызванных температурным нагревом приземного слоя атмосферы (4). В литературе имеется крайне мало данных по измерению локальной температуры на больших пространственных ограниченных областях. Отдельные исследования, проводимые в сейсмически активных регионах, показали определенную тенденцию к увеличению амплитуды температурных флуктуаций перед землетрясениями. Увеличение могло достигать нескольких градусов. В связи с этим параметры температурного источника выбирались следующие:  $Dx \sim 20-400$  км,  $T_m \sim 0.1-5$  К,  $T \sim 500$  с-3.5 ч. В результате проведенных исследований установлена принципиальная возможность генерации таким источником АГВ в верхней атмосфере.

В возмущении, создаваемым температурным источником, гравитационные волны имели значительно большие амплитуды и пространственные размеры, чем акустические волны, которые были выражены в данном случае крайне слабо (рис.6). Температурный источник с амплитудой в несколько градусов Кельвина при определенных условиях эффективно генерировал гравитационные волны с амплитудами возмущений  $u$  и  $w$  до нескольких десятков м/с, амплитудами возмущений температуры  $T$  до нескольких десятков градусов. Сравнительный анализ показал, что приблизительно одинаковые по амплитудам гравитационные волны могут создаваться температурным источником с амплитудой  $T_m = 0,25$  К и длиннопериодными колебаниями земной поверхности с амплитудой смещения поверхности 16 метров и периодом  $T = 1000$  с. Периоды гравитационных волн, возбуждаемых таким источником, лежали в широких

пределах: от  $T=300-400$ с вблизи эпицентра источника до  $T=1100-1900$ с на горизонтальном удалении 1000-1500 км. Горизонтальная фазовая скорость ВГВ составила 300-310 м/с, длина волны  $\lambda$  более 450-500 км.



**рис.6.** Пространственное распределение горизонтальной скорости частиц  $u$  в момент времени  $t=6000$ с после начала возмущения. Функция источника типа (4) – температурный источник,  $T_m = 1$  К,  $Dx=20$  км,  $T=3000$  с.

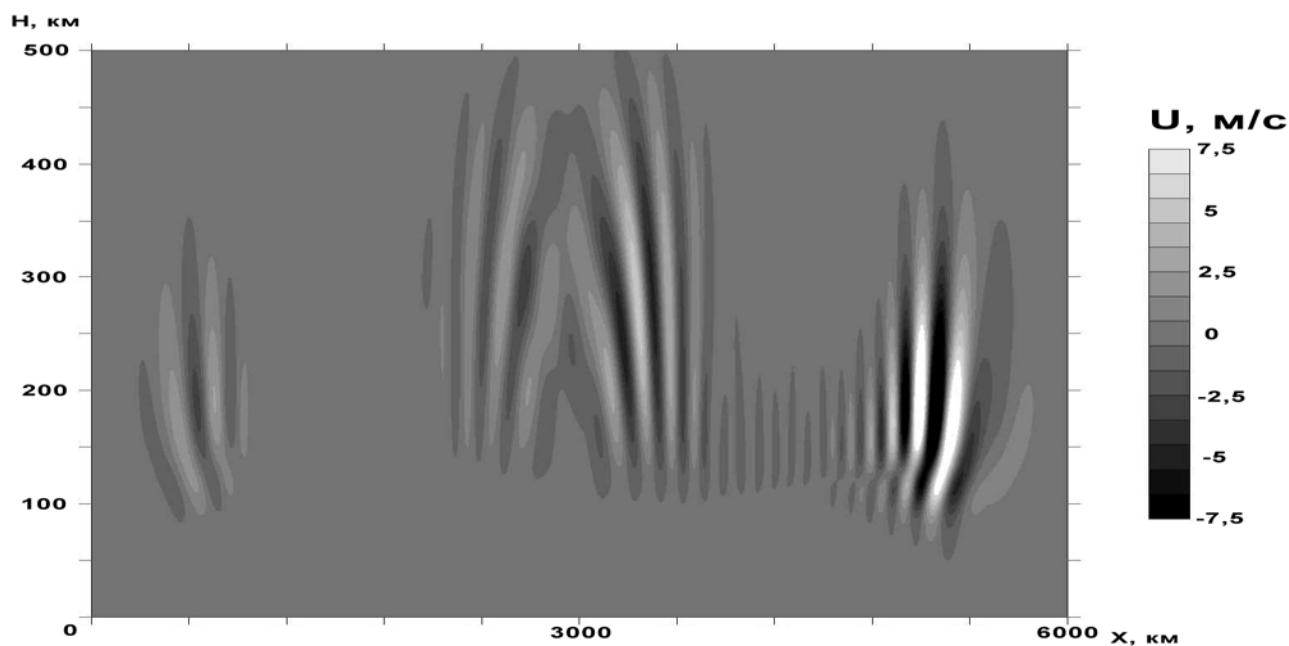
В *Четвертом параграфе* представлены результаты моделирования АГВ, генерированных движением волны цунами в открытом океане и выходом волны на берег с резким увеличением высоты волны и укрупнением её профиля. На основе представленных в литературе данных [23] были выбраны следующие характеристики цунами: скорость  $V_u \sim 100-500$  м/с,  $\lambda \sim 100-200$  км, амплитуда смещения в открытом океане  $z_m = 0,5-1$  м, амплитуда смещения на берегу  $z_m = 5-10$  м.

Моделирование показало, что цунами возбуждают в атмосфере как движущиеся акустические волны, так и движущиеся ВГВ. При распространении волны цунами в открытом океане отклик атмосферы представлял собой возмущение, расположенное в основном на высотах  $h \sim 100-300$  км и следующее на этих высотах с задержкой в том же направлении, что и источник. По спектральному составу возмущение можно отнести в основном к акустическим волнам с периодом  $T=230-250$ с. Длины волн АВ составляли  $\lambda \sim 140-160$  км. Длина пакета составляла 1500-2000 км, т.е. 10-15 длин волн. Средний декремент затухания лежал в диапазоне 0,3-0,7 м/с на 1000 км.

Анализ результатов показал, что наибольший вклад в итоговое возмущение оказывают именно последние десятки минут жизни волны, когда она

продвигается по шельфу и выходит на берег. Относительное резкое нарастание амплитуды в этот момент и само внушительное значение амплитуды, иногда достигающее 30-40 метров, является определяющим фактором того, что волны цунами могут вызывать одни из самых сильных возмущений в верхней атмосфере. Полученные данные позволяют утверждать, что в последнем случае эффективно генерировались уже и гравитационные волны. Причем ВГВ, которые распространялись в том же направлении, что и цунами, имели значительные амплитуды, достигающие 10-20 м/с на высотах максимального отклика атмосферы 200-250 км. Амплитуды возмущения температуры, полученные в расчетах не превышали значений 10-12 К. Характерным отличием источника типа цунами является ассимитричный вид пространственно-временной картины возмущения (рис.7), с неодинаковыми по амплитуде и характеру возмущения частями с одной и с другой стороны от вертикальной линии проходящей через побережье.

Отдельные данные по изучению возмущений в верхней атмосфере от цунами, представленные в литературе [24], позволяют утверждать, что имеется определенное сходство в полученных результатах. Так наблюдаемые в экспериментах периоды гравитационных волн  $T \sim 10-30$  минут ( $T \sim 600-1800$ с), коэффициент усиления на ионосферных высотах  $10^4$ , групповые скорости 200-250 м/с приблизительно соответствуют значениям, полученным по нашей модели.



**Рис.7.** Пространственное распределение горизонтальной скорости  $u$  частиц возмущения через  $t=8800$  с после выхода цунами на берег в точке с координатами  $x=3000$  км,  $z=0$ .

### **Основные результаты и выводы:**

- Была модернизирована численная схема решения уравнений гидродинамики для моделирования генерации и распространения акустико-гравитационных волн в двумерной стратифицированной сжимаемой диссипативной атмосфере в целях включения поверхностных источников разнообразной природы в модель.
- Проведён анализ пространственно-временных характеристик АГВ для реальных температурных профилей, взятых для различных времен года; Исследовано влияние параметров фоновой атмосферы на распространение АГВ в верхней атмосфере, проведен качественный и количественный анализ влияния поведения температурной стратификации в области мезопаузы на характеристики возмущения.
- Впервые получены и проанализированы закономерности изменения характеристик АГВ для различных параметров источника, таких как период, амплитуда, пространственный масштаб и форма импульса. Установлены диапазоны частот источника, для которых наблюдается максимальный отклик нейтральной атмосферы.
- Осуществлено моделирование распространения АГВ для различных классов поверхностных источников: землетрясения и взрывы, длиннопериодные колебания земной поверхности, сейши, температурный нагрев приземного слоя атмосферы, волны цунами. Впервые осуществлен сравнительный анализ полученных характеристик АГВ в верхней атмосфере от разных типов источников, обработка и систематизация данных по каждому источнику. Осуществлено сравнение полученных результатов с результатами экспериментальных и теоретических работ в тех областях, где подобные исследования проводились.
- По итогам проведенного анализа результатов моделирования возмущений в верхней атмосфере для различных поверхностных источников дана оценка степени эффективности генерации ВГВ в верхней атмосфере.

### **Результаты диссертации опубликованы в следующих работах:**

1. В.Е. Куницын, С.Н. Сураев, Ахмедов Р.Р. Моделирование распространения акустико-гравитационных волн в атмосфере для различных поверхностных источников //Вестник Московского университета, серия 3, Физика. Астрономия. 2007, №2, стр.59-63.
2. В.Е. Куницын, С.Н. Сураев, Ахмедов Р.Р. Численное моделирование распространения акустико – гравитационных волн в верхней атмосфере для периодических источников //Электромагнитные волны и электронные системы, Т.12, 2007, №4, стр. 4-8.

3. Сураев С.Н., Куницын В.Е., Ахмедов Р.Р. Моделирование различных режимов возбуждения ионосферных возмущений, генерированных колебаниями земной поверхности // Сб. тезисов докладов МСАР-2006, с. 120-121.
4. Куницын В.Е., Сураев С.Н., Ахмедов Р.Р. Моделирование различных режимов возбуждения ионосферных возмущений, генерированных колебаниями земной поверхности // X Всероссийская научная школа–семинар “Волновые явления в неоднородных средах”. Труды школы семинара “Волны 2006”, Звенигород, Моск. обл. 22-27 мая 2006 г.
5. Kunitsyn V., R. Ahmedov, E. Andreeva, M. Nazarenko, S. Suraev. Ionospheric manifestations of wavelike disturbances in the atmosphere and ionosphere observed by radio tomography // Abstracts of The 36th COSPAR Scientific Assembly, COSPAR2006-A-02013.
6. S.N. Suraev, V.E.Kunitsyn, R.R.Ahmadov. Modelling of generation and propagation of internal gravity waves from the different kind of sources. // Atmospheric and ocean optics. Atmospheric physics. XIII International symp., Tomsk, 2-6 July, 2006. SPAE-Rus SB RAS. D-34, p.181.

#### Список цитируемой литературы:

1. Row R.V. Acoustic-gravity waves in the upper atmosphere due to a nuclear detonation and an Earthquake// // J. Geophys. Res. 1967. V. 72. No. 5. 1599 – 1610.
2. Андреева Е.С., Гохберг М.Б., Куницын В.Е., Терещенко Е.Д., Худукон Б.З., Шалимов С.Л. Радиотомографическая регистрация возмущений ионосферы от наземных взрывов// Космич. исслед. 2001. т. 39. № 1. с. 13 – 17.
3. Afraimovich E.L., Perevalova N.P., Plotnikov A.V., Uralov A.M. The shockacoustic waves generated by earthquakes// Ann. Geophysicae. 2001. 19. с. 395 –409.
4. Шалимов С.Л. Ионосферные неоднородности, инициированные интенсивными магнитосферными токами и атмосферными волнами. Дис. докт. ф.-м. наук. 04.00.23. Москва. 1998.
5. Шефов Н.Н, А.И. Семенов, Хомич В.Ю., Излучение верхней атмосферы – индикатор её структуры и динамики М.:ГЕОС, 2006, 741с.
6. Шувалов В.В. Динамические процессы в атмосфере вызванные сильными импульсными возмущениями. Дис. докт. ф.-м. наук. 04.00.23. Москва. 1999.
7. Линьков Е.М., Петрова Л.Н., Осипов К.С. Сейсмогравитационные пульсации Земли и возмущения атмосферы как возможные предвестники сильных землетрясений// Докл. АН СССР. 1990. 313. № 5. 1095 – 1098.

8. Popov K.V., Liperovsky V.A., Meister C.-V., et al. On ionospheric precursors of earthquakes in scales of 2-3 hours // *Phys. And. Chem. Earth*. 2004. V. 29. P.529-535.
9. Ахмедов Р.Р., Куницын В.Е. Численный метод решения задачи распространения акустико-гравитационных волн в атмосфере до ионосферных высот// *Вестник Московского Университета. Серия 3. Физика. Астрономия*. 2003. № 3. с. 38 – 42.
10. Григорьев Г.И. Акустико-гравитационные волны в атмосфере Земли (обзор)// *Изв. ВУЗов Радиофизика*. 1999. Т. XLII. № 1. с. 3 - 25.
11. Гаврилов Н.М. Распространение внутренних гравитационных волн в стратифицированной атмосфере. *Изв. АН СССР. ФАО*. 1985. 21. с. 921 – 927.
12. Hines C.O. Internal atmospheric gravity waves at ionospheric heights// *Can. J. Phys.* 1960. V. 38. p. 1441 – 1481.
13. Francis S.H. Acoustic-gravity modes and large-scale traveling ionospheric disturbances of a realistic, dissipative atmosphere// *J. Geophys. Res.* 1973. V. 78. № 13. p. 2278 – 2301.
14. Kunitsyn V., Tereshchenko E. *Ionospheric Tomography*. Springer-Verlag, 2003, 272 p.
15. Нагорский П.М. Анализ отклика КВ-радиосигнала на возмущения ионосферной плазмы, вызванные ударно-акустическими волнами// *Изв. ВУЗов. Радиофизика*. 1999. Т. XLII. №1. с. 36-44..
16. Drobzheva Ya.V., Krasnov V.M. The acoustic field in the atmosphere and ionosphere caused by a point explosion on the ground// *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.* 2003. V. 65. No. 3. p. 369 – 377.
17. Zhang S.D., Yi F. A numerical study on the propagation and evaluation of resonant interacting gravity waves// *J. Geophys. Res.* 2004. V. 109. D24. 107.
18. Ахмедов Р.Р., Куницын В.Е. Моделирование ионосферных возмущений, вызванных землетрясениями и взрывами// *Геомagnetизм и аэрономия*. 2004. Т. 44. № 1. с. 1 – 8.
19. Оран Э., Борис Дж. Численное моделирование реагирующих потоков: Пер. с англ. - М. Мир. 1990. 660 с.
20. Wuest A., Farmer D.M. *Seishe*// *McGraw-Hill Encyclopedia of Science&Technology*, 2003.
21. Sauli P., Boska J. Tropospheric events and possible related gravity wave activity effects on the ionosphere// *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.* 2001. 63. p. 945 – 950.
22. Friedman J.P. Propagation of internal gravity waves in a thermally stratified atmosphere// *J. Geophys. Res.* 1966. V. 71. № 4. p. 1033 – 1053.
23. Левин Б.В., Носов М.А. *Физика цунами*. М.: «Янус-К». 2005.
24. Artru J., Ducic V., Kanamori H., Lognonne P., Murakami M. Ionospheric detection of gravity waves induced by tsunamis// *Geophys. J. Int.* V.160. 2005. p. 840-848.