

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

**АХМЕДОВ Раван Рамин оглы**

**ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГЕНЕРАЦИИ АКУСТИКО-  
ГРАВИТАЦИОННЫХ ВОЛН И ИОНОСФЕРНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ ОТ  
НАЗЕМНЫХ И АТМОСФЕРНЫХ ИСТОЧНИКОВ**

Специальность 25.00.29 – физика атмосферы и гидросферы

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Москва 2004 г.

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

*Научный руководитель:*

доктор физико-математических наук, КУНИЦЫН Вячеслав Евгеньевич  
профессор

*Официальные оппоненты:*

доктор физико-математических наук, КУТУЗА Борис Георгиевич  
профессор

доктор физико-математических наук, ШУВАЛОВ Валерий Викторович

*Ведущая организация:* Научно-исследовательский институт физики Санкт-Петербургского Государственного Университета

Защита диссертации состоится «22» апреля 2004 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 «19» марта 2004 г.

Ученый секретарь

Диссертационного совета Д501.001.63

кандидат физ.-мат. наук

В.Б. СМИРНОВ

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность.** В конце XIX века ученые начали обращать внимание на то, что сила тяжести и стратификация геофизических сред сильно модифицируют распространяющиеся в них звуковые волны. С тех пор начались первые теоретические исследования свойств распространения акустико-гравитационных волн (АГВ) в атмосфере. Наряду с этим, с развитием радиотехнических средств, в середине XX столетия начались наблюдения перемещающихся ионосферных возмущений (ПИВ). Впервые в 1960м году ПИВ были интерпретированы как проявления АГВ в ионосфере [1]. С тех пор с помощью различных методов ведутся интенсивные наблюдения АГВ в нижней и верхней атмосфере. В 90-х годах, с развитием дистанционных методов зондирования ионосферы с помощью спутников [2-5], начался новый «бум» в области исследования ионосферных возмущений. Радиотомографические методы позволили получить двумерные сечения ПИВ. Существующие радиотомографические системы и сеть приемников GPS/ГЛОНАСС дают возможность исследовать данное явление непрерывно в широких временных и пространственных масштабах. В течение почти 50 лет был накоплен огромный экспериментальный материал об ионосферных возмущениях, вызванных источниками разной природы. Среди таких источников особую роль играют сильные землетрясения, ядерные испытания, промышленные взрывы, сверхзвуковые полеты ракет и т.д.

Исследование отклика ионосферы на такие антропогенные и природные источники имеет большое значение для физики атмосферы, так как это позволяет подробно изучить различные физические процессы, происходящие в атмосфере. Земная атмосфера является уникальной лабораторией для изучения многих сложных физических процессов, таких как, генерация и распространение крупномасштабных волн, ударных волн, возникновение неустойчивых образований в ионосферной плазме и т.д. Изучение данной проблемы актуально в связи с необходимостью обоснования надежных сигнальных признаков техногенных воздействий (запуски ракет, несанкционированные взрывы и подземные ядерные испытания) [5,11]. Кроме того, результаты этих работ могут быть использованы для идентификации откликов от цунами и предвестников землетрясений в ионосфере [6,7].

Несмотря на огромное количество экспериментальных данных, лишь в относительно небольшом количестве работ были сделаны попытки с теоретических позиций объяснить наблюдаемые возмущения в атмосфере и ионосфере от наземных и атмосферных источников [6-12]. Следует отметить, что работы в данном направлении сыграли существенную роль в понимании механизма связей в системе литосфера – атмосфера – ионосфера [1]. Эти исследования внесли большой вклад в развитие теории распространения АГВ в атмосфере и т.д. Несмотря на это, до настоящего времени отсутствует полная интерпретация данных наблюдений [4,6]. Как правило, в предшествующих теоретических работах акустические волны (АВ) [11], внутренние гравитационные волны (ВГВ) [9], нелинейность среды, влияния вязкости, стратификации и зонального ветра на распространение волн рассматривались обособлено друг от друга. В результате этого, ни одна из существующих моделей не может объяснить весь спектр атмосферных и ионосферных возмущений, возбуждаемых источниками разной природы. Что

касается моделирования атмосферных волновых возмущений, генерированных во время сверхзвукового движения ракет, то эта задача интересна и еще тем, что здесь мощный источник возбуждения находится прямо в верхней атмосфере.

В последнее десятилетие в связи с увеличением быстродействия компьютеров и развитием вычислительной гидродинамики зародилось новое направление в физике атмосферы - исследование распространения атмосферных волн с помощью численного решения нелинейных уравнений геофизической гидродинамики [13]. Применение таких численных методов позволяет учесть совместно все факторы, влияющие на распространения АГВ с конечной амплитудой в реальной диссипативной среде.

#### **Цели работы:**

- Разработка численного метода для моделирования распространения АГВ с конечной амплитудой на большие горизонтальные и вертикальные расстояния;
- Моделирование генерации АГВ и волнообразных ионосферных возмущений от разного типа источников: наземных импульсных и длиннопериодных источников, сверхзвуковых полетов ракет;
- Сопоставление результатов моделирования с данными наблюдений.

#### **Новизна результатов:**

- Предложена система уравнений геофизической гидродинамики и граничные условия, позволяющие провести численное моделирование генерации и распространения АГВ от источников разной природы;
- Разработан численный алгоритм для решения системы уравнений вместе с соответствующими начальными и граничными условиями с помощью конечно-разностного метода;
- Промоделирована генерация волн от разного типа источников: сильных землетрясений, подземных ядерных взрывов, поверхностных волн Рэлея, длиннопериодных наземных источников, сверхзвуковых движений ракетоносителей;
- Впервые с помощью конечно-разностного метода были получены вместе две ветви спектра акустико-гравитационных волн – акустические волны и внутренние гравитационные волны;
- Впервые были построены кривые чувствительности (отклика) нейтральной атмосферы на воздействие поверхностных источников с разными периодами;
- Впервые были промоделированы волнообразные вариации электронной плотности в ионосфере с учетом геомагнитного поля на больших временных и пространственных масштабах, генерированные вышеуказанными источниками;
- Впервые с помощью разработанной модели были интерпретированы возмущения полного электронного содержания в ионосфере по разным направлениям лучей, связывающих спутники и приемники.

**Научная и практическая ценность работы.** Используя разработанную численную модель, можно исследовать свойства АГВ, генерированных источниками разных видов, такими как движение солнечного терминатора, экваториальные и полярные токовые системы, тропические циклоны и т.д.

Полученные численные результаты могут быть использованы для выделения и идентификации отклика в ионосфере от слабых длиннопериодных колебаний земной поверхности, наблюдаемых в некоторых случаях перед землетрясениями, зарегистрировать которые крайне трудно традиционными сейсмическими методами. Развитая модель позволяет исследовать нелинейный режим распространения АГВ и распространение слабых ударных волн в атмосфере. Результаты работы могут быть использованы в будущем для разработки и постановки экспериментов по наблюдению атмосферных и ионосферных возмущений, генерированных источниками разной природы. Полученные графические и мультимедийные материалы могут применяться в учебных курсах как наглядное пособие для изучения свойств АГВ в атмосфере.

**Апробация работы.** Результаты работы докладывались на XII Всероссийской школе-конференции по дифракции и распространению волн (Москва, 2001), XX Всероссийской научной конференции по распространению радиоволн (Нижний Новгород, 2002), на V сессии Байкальской молодежной школе по фундаментальной физике (Иркутск, 2002), Международной конференции «Потоки и структуры в жидкостях» (Санкт-Петербург, 2003), Генеральной Ассамблее Европейского Геофизического Союза (Nice, 2003), LVIII Научной Сессии ИТОРЭС им. А.С. Попова (Москва, 2003), международной конференции и школе для молодых ученых «Вычислительно-информационные технологии для наук об окружающей среде» (Томск, 2003). По теме диссертации опубликовано 12 работ в отечественных и зарубежных изданиях.

#### **Защищаемые положения.**

1. Система нелинейных уравнений гидродинамики и соответствующие граничные условия, позволяющие описывать распространение интенсивных АГВ в двумерной и трехмерной сжимаемой плоскопараллельной атмосфере, с учетом реальной стратификации и зонального ветра. Граничные условия позволяют включить наземные источники с разными характеристиками и цилиндрический звуковой источник, возникающий во время сверхзвукового полета ракет.
2. Численный метод для решения соответствующих систем уравнений геофизической гидродинамики.
3. Результаты моделирования пространственных и временных распределений возмущений плотности и температуры нейтральной атмосферы, скорости гидродинамических частиц, плотности волновой энергии АГВ, генерированных наземными и атмосферными источниками.
4. Результаты моделирования пространственных и временных распределений возмущений электронной концентрации в ионосферной плазме, генерированных наземными и атмосферными источниками при разных моделях нейтральной атмосферы и ориентации магнитного поля.
5. Результаты моделирования вариаций полного электронного содержания в разных направлениях в возмущенной ионосфере, для разного рода источников.
6. Кривые чувствительности (отклика) нейтральной атмосферы на наземные источники с разными периодами.
7. Результаты трехмерного моделирования возмущений нейтральной атмосферы от наземных источников.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка цитируемой литературы. Работа содержит \_\_\_ страниц текста, \_\_\_ рисунков.

### **Краткое содержание работы.**

**Во введении** сформулированы основные цели и задачи диссертации, представлена актуальность данных исследований и научная новизна, перечислены защищаемые положения и кратко изложено содержание всех глав диссертации.

**В первой главе** представлен обзор теоретических и экспериментальных работ по исследованиям АГВ в атмосфере и ионосфере. Глава состоит из трех параграфов.

*Первый параграф* посвящен общим свойствам распространения АГВ в атмосфере. Приводятся основные спектральные характеристики АВ и ВГВ, захваченных АГВ, механизмы диссипации волн и т.д. Более энергетическая часть этих волн – ВГВ играет большую роль в циркуляции атмосферы, и их параметризация имеет важное значение в мезомасштабных и глобальных моделях атмосферы [14]. Кроме того, ВГВ являются одним из основных механизмов передачи энергии из нижних слоев атмосферы в термосферу.

*Второй параграф* посвящен механизмам генерации АГВ. Источники генерации могут быть антропогенными или природными. Характеристики АГВ также зависят от свойств источников. Такие источники, как конвективная неустойчивость, сдвиговая неустойчивость, орография, погодные фронты и т.д. постоянно генерируют ВГВ в нижней атмосфере. Такие источники, как сильные землетрясения, мощные взрывы, запуски ракет и т.д. способны генерировать широкий спектр волн – от высокочастотных инфразвуковых до длиннопериодных ВГВ, которые распространяются на тысячи километров без заметного затухания.

*В третьем параграфе* дан обзор основных экспериментальных работ по изучению проявлений АГВ в ионосфере. Один из основных эффектов АГВ в ионосфере - это ПИВ и неустойчивые плазменные образования. С развитием средств наблюдения ионосферы стало возможным проведение непрерывного мониторинга ионосферных возмущений. Конкретный механизм формирования этих возмущений не до конца ясен.

**Во второй главе** рассмотрено построение численной модели.

*В первом параграфе* представлена система уравнений геофизической гидродинамики для моделирования распространения АГВ в атмосфере. С этой целью рассмотрены уравнения гидродинамики в общей форме. С помощью известных математических преобразований можно получить систему уравнений гидродинамики в эйлеровой форме, удовлетворяющую требованиям нашей задачи:

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

Здесь, первое уравнение – это уравнение неразрывности, второе и третье – уравнения Навье-Стокса, четвертое – уравнение сохранения энергии, и, наконец, последнее – это уравнение состояния идеального газа,  $\rho$  – плотность,  $T$  – температура,  $p$  – давление,  $U_0$  –  $x$  компонента скорости зонального ветра,  $m_0$  – относительная молекулярная масса воздуха. Индексами «0» и «'» обозначены невозмущенные и возмущенные части термодинамических параметров, соответственно. Здесь  $u$  и  $w$  горизонтальные и вертикальные компоненты скорости движения частиц атмосферы, соответственно,  $A_{1-5}$  – постоянные. Для таких относительно быстрых движений несущественна сила Кориолиса, которая не учитывалась. В данной модели сила вязкости вводится как Рэлеевское трение  $\vec{F}_d = -\alpha \vec{v}$ , а  $\chi = \alpha / \rho$  – коэффициент трения, который растет с высотой. При затухании энергии таких больших волновых движений основную роль играет теплопроводность, т.е. в уравнении для температуры диссипативный член равен  $Q_d = k \Delta T$ , где  $k$  – коэффициент теплопроводности воздуха. Как видно из (1), в слагаемом, относящемся к теплопроводности отсутствует производная второго порядка от фоновой температуры по высоте. Это связано тем, что в случае, если возмущение в атмосфере отсутствует, т.е. все переменные равны нулю, тогда в решении уравнений будут генерироваться волны из-за того, что  $\frac{\partial^2 T_0}{\partial z^2} \neq 0$ . А это с физической точки зрения недопустимо. При моделировании использовались профили фоновой плотности и температуры атмосферы из модели MSISE-90. Значения скорости зонального ветра были взяты из модели HWM-93. Таким образом, после задания параметров атмосферы и соответствующих начальных и граничных условий можно решать систему уравнений (1).

*Второй параграф* посвящен разработке численного алгоритма для решения (1). При выборе численного метода мы учитывали следующие особенности данной задачи:

- Решение должно содержать медленные и быстрые волновые движения.
- Метод должен быть устойчивым к резким градиентам плотности атмосферы.
- Обеспечение устойчивости решения усложняется присутствием нелинейных компонент в уравнениях.
- Большой объем вычислений из-за размера области интегрирования и длительности времени распространения волн.

Учитывая все вышеперечисленное, после анализа и сопоставления разных методов был выбран явный конечно-разностный метод Flux Corrected Transport [15]. В разработанном нами численном алгоритме используются основные свойства этого метода. Суть метода состоит в том, что для обеспечения устойчивости решения на первом этапе вводится искусственная диффузия, а потом с помощью антидиффузии минимизируется численная диффузия. Так как все переменные в (1) могут быть положительными и отрицательными, мы не использовали ограничения на антидиффузионные слагаемые для обеспечения положительности. Таким образом, мы освобождаемся от таких проблем, как синхронизация потоков и большие затраты на время расчета. Для обеспечения устойчивости и высокой точности мы аппроксимировали конвективные, адвекционные и нелинейные слагаемые в (1) особыми методами [15]. Для решения двумерной и трехмерной задачи использовался метод расщепления шага по времени для координатных направлений. Граничные условия состоят из двух частей: первая часть обеспечивает вход возмущения от источника в данную модель, вторая часть - уход волны из расчетной области. Начальные условия предполагались нулевыми.

В третьем параграфе приведен вывод формулы для вычисления изменения электронной концентрации в плоскопараллельной ионосфере, вследствие столкновений с нейтральными частицами во время прохождения АГВ. Эта формула получена из уравнении неразрывности для заряженных частиц [3]:

$$\Delta N_e(x, z, t) = -\frac{dN_e}{dz} \int_{t_0}^t (b_x b_z u + b_z^2 w) d\tau - N_e \int_{t_0}^t \left( b_x^2 \frac{\partial u}{\partial x} + b_x b_z \left( \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) + b_z^2 \frac{\partial w}{\partial z} \right) d\tau \quad (2)$$

где  $N_e$ - концентрация электронов в невозмущенной ионосфере,  $b_x$  и  $b_z$  горизонтальные и вертикальные компоненты единичного вектора магнитного поля, соответственно. В конкретных расчетах использовался профиль фоновой ионосферы, состоящий из двух параболических слоев -  $E$  и  $F$  (с максимумом на 300 км). Для наблюдения за состоянием ионосферы имеет очень большое значение определение изменения полного электронного содержания (ПЭС) в разных направлениях, т.е. между приемником и искусственным спутником земли (ИСЗ) [4] (см. Рис. 1):

$$\Delta TEC = \int_{receiver}^{satellite} \Delta N_e dr \quad (3)$$

**В третьей главе** рассматривается включение наземных источников в представленную модель, анализ полученных результатов для нейтральной атмосферы и ионосферы и сравнение их с экспериментальными данными. Глава разделена на 5 параграфов.

В первом параграфе приведена постановка задачи для моделирования литосферно-ионосферной связи. Наземный импульсный источник рассматривался как поршнеобразный источник, который действует на атмосферу (участок АВ на Рис. 1). Чтобы включить этот источник в данную модель, необходимо задать скорость движения частиц воздуха на высоте поверхности земли в окрестности эпицентра источника. Отсюда следует, что для



вертикальной компоненты (горизонтальные перемещения не учитываются) скорости граничное условие будет условием сшивания над твердой поверхностью земли:

$$w = w_m \sin\left(\frac{2\pi(t-t_0)}{P}\right) \cdot \exp\left(-\left(\frac{x-x_c}{Dx}\right)^2\right), \quad t_0 \leq t \leq t_0 + P \quad (4)$$

где  $w_m$  – амплитуда,  $t_0$  – момент начала возмущения,  $P$  – период,  $x_c$  – горизонтальная координата эпицентра источника,  $Dx$  – Гауссовский масштаб, характеризующий горизонтальный размер источника. Для сильного землетрясения или подземного ядерного испытания мы брали  $w_m = 10$  м/с,  $P = 1$  с,  $Dx = 20$  км. При выборе значений этих параметров, мы учитывали то обстоятельство, что на практике определить точные значения параметров импульса возмущения не так просто, и они зависят от конкретного случая. Но так как нашей главной целью является изучение общих свойств возмущений от таких источников, мы принимали некоторые приближенные значения параметров источника. Что касается наземных промышленных взрывов, то их можно учитывать в нашей модели с помощью задания эквивалентного подземного источника.

Во втором параграфе представлены основные результаты, полученные при решении уравнений (1) для наземного источника с вышеперечисленными параметрами. Таким образом, система уравнений (1) вместе с начальными и граничными условиями решалась с помощью составленного нами пакета компьютерных программ. Параметры расчетной сетки были выбраны следующие: шаг по высоте 5 км, по горизонтальной координате 10 км и 0.1 сек по времени. Размеры моделируемой области составляли 4000 км и 500 км по ширине и высоте, соответственно.

Как известно, стратификация температуры и зональный ветер влияют на распространение АГВ в атмосфере. Чтобы отделить эти влияния друг от друга, мы поэтапно рассматривали разные варианты модели атмосферы в наших вычислениях. Изотермический случай интересен тем, что он позволяет сравнить результаты моделирования с предшествующими работами в этой области. Как показывает сравнение, период, фазовая и групповая скорости, линейный рост периода ВГВ и т.д. полученные нами для изотермической и безветренной атмосферы, подтверждаются результатами предыдущих работ. Кроме того, как показывают результаты, данная модель хорошо описывает такие нелинейные эффекты, как укрупнение профиля волны и т.д. Таким образом, тестирование численной модели показало, что она обладает приемлемой точностью.

На Рис.2 представлена зависимость горизонтальной скорости гидродинамических частиц на высоте  $h=100$  км, от времени и расстояния. Она рассчитана на основе июльского профиля температуры модели MSISE-90, без учета ветра для вышесказанного источника. Здесь четко видны АВ и ВГВ. Как видно из графика, период ВГВ растет от 300 сек до 1200 сек линейно по мере удаления от источника в горизонтальном направлении. Эта связано тем, что волны с большими периодами движутся наклонно к вертикали. Период акустических волн около 200 сек. Точка насыщения, т.е. высота максимальной амплитуды АГВ находится на высоте около 200 км. Вертикальная скорость, возмущения плотности, давления и температуры в волне, также показывают подобную зависимость. Для АВ

вертикальная скорость, а для ВГВ горизонтальная скорость играют доминирующую роль.

В *третьем параграфе* приведены результаты вычислений ионосферных возмущений, вызванных наземными импульсными источниками. На Рис. 3-4 представлены пространственные распределения вариации электронной плотности в ионосфере через 5000 с после землетрясения или взрыва. После толчка в течении 15 мин возмущение доходит до верхней атмосферы. Учет зонального ветра нарушает симметрию отклика атмосферы и ионосферы. Этот случай продемонстрирован на Рис. 3, где ось OX направлена на восток. Здесь наблюдаются среднемасштабные ПИВ с длинами волн около 100 км, распространяющиеся от источника с горизонтальной фазовой скоростью около 300 м/с.

Проведенные исследования показали сильную качественную и количественную модификацию ионосферного отклика при изменении ориентации геомагнитного поля. Как видно из Рис. 4, в случае когда магнитное поле имеет заметную вертикальную компоненту (наклонение  $I=45^\circ$ ), получается совсем другая картина. Эти результаты могут быть также применены к интерпретации атмосферных возмущений вызванных наземными взрывами.

Что касается данных, полученных при трансionoсферном зондировании верхней атмосферы сигналами спутниковой радионавигационной системы GPS, то анализ полученных результатов показывает, что характеристики этих сигналов сильно зависят от месторасположения приемника, угла места спутника и т.д. Как показывают наши результаты, диапазон частот этих возмущений может быть очень широким. Если посмотреть на Рис. 5а, мы увидим, что этот график качественно хорошо описывает высокочастотные (период  $\approx 200$  с) возмущения вертикального ПЭС (т.е. угол места спутника  $\theta=90^\circ$ ), зарегистрированные авторами [4,5] во время сильных землетрясений. Этот график соответствует случаю, когда приемник находится над эпицентром. В Рис. 5б представлена зависимость вариации вертикального ПЭС, когда приемник находится на расстоянии 800 км от источника. Здесь видна ВГВ с периодом приблизительно 1000 с. Длиннопериодные колебания в ионосфере, предсказанные нами, наблюдались с помощью томографических, доплеровским зондированием, и др. методами во время землетрясений и взрывов [2,3,12]. Периоды волн, горизонтальные фазовые и групповые скорости распространения волн в нашей модели и экспериментальных данных почти совпадают.

В *четвертом параграфе* представлены результаты моделирования возбуждения атмосферы и ионосферы от длиннопериодных наземных источников. Как известно, неглубокие землетрясения генерируют длинные поверхностные волны Релея, которые распространяются на большие расстояния. В модели в качестве источника бегущей волны Релея предполагалась одиночная синусоидальная волна с периодом 50 с и длиной волны 70 км, которая распространяется со скоростью 1400 м/с по поверхности земли. Для амплитуды скорости вертикальных колебаний земной поверхности принималось значение  $w_m = 1$  мм/с. Ионосферный отклик через 2000 с после начала распространения волны от точки O в направлении оси OX (см. Рис.1) продемонстрирован на Рис. 6. В этом

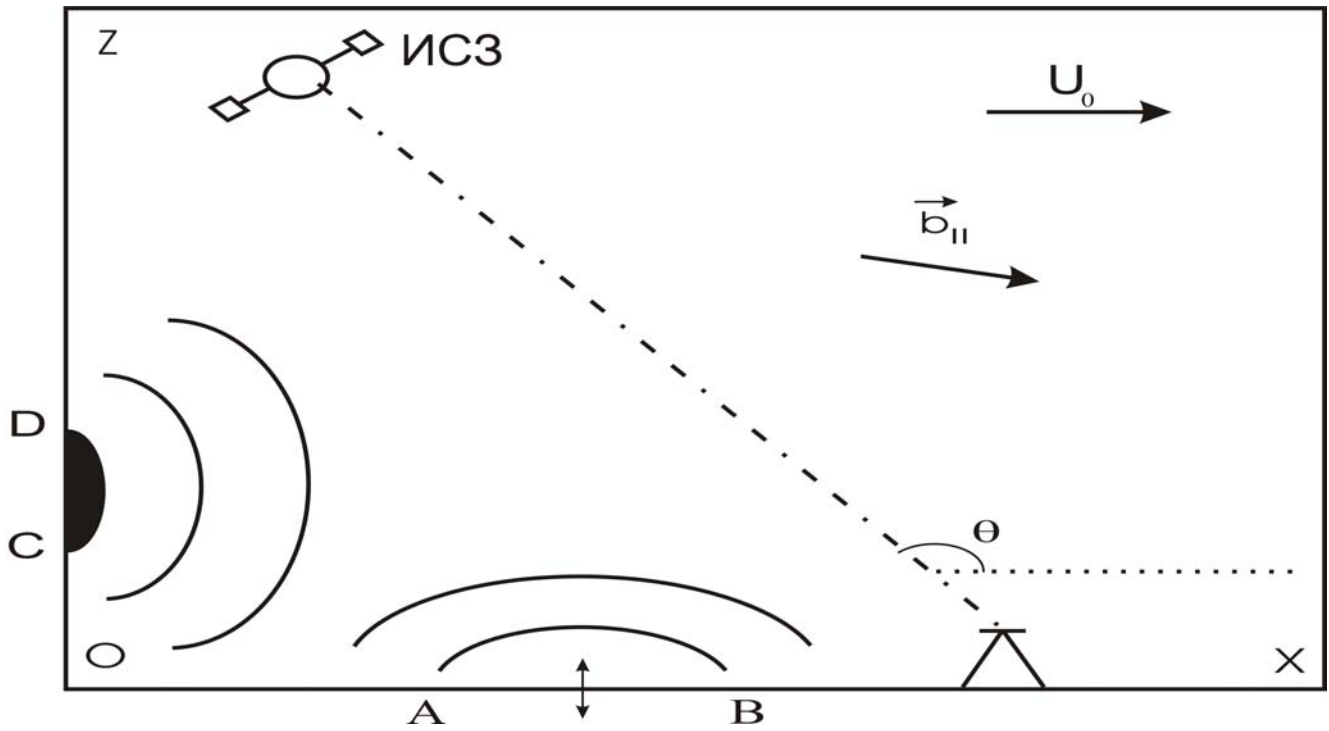


Рис. 1. Схематическая диаграмма, иллюстрирующая, генерацию АГВ наземными и атмосферными источниками и возможности спутникового радиозондирования. Показаны зональный ветер и магнитное поле.

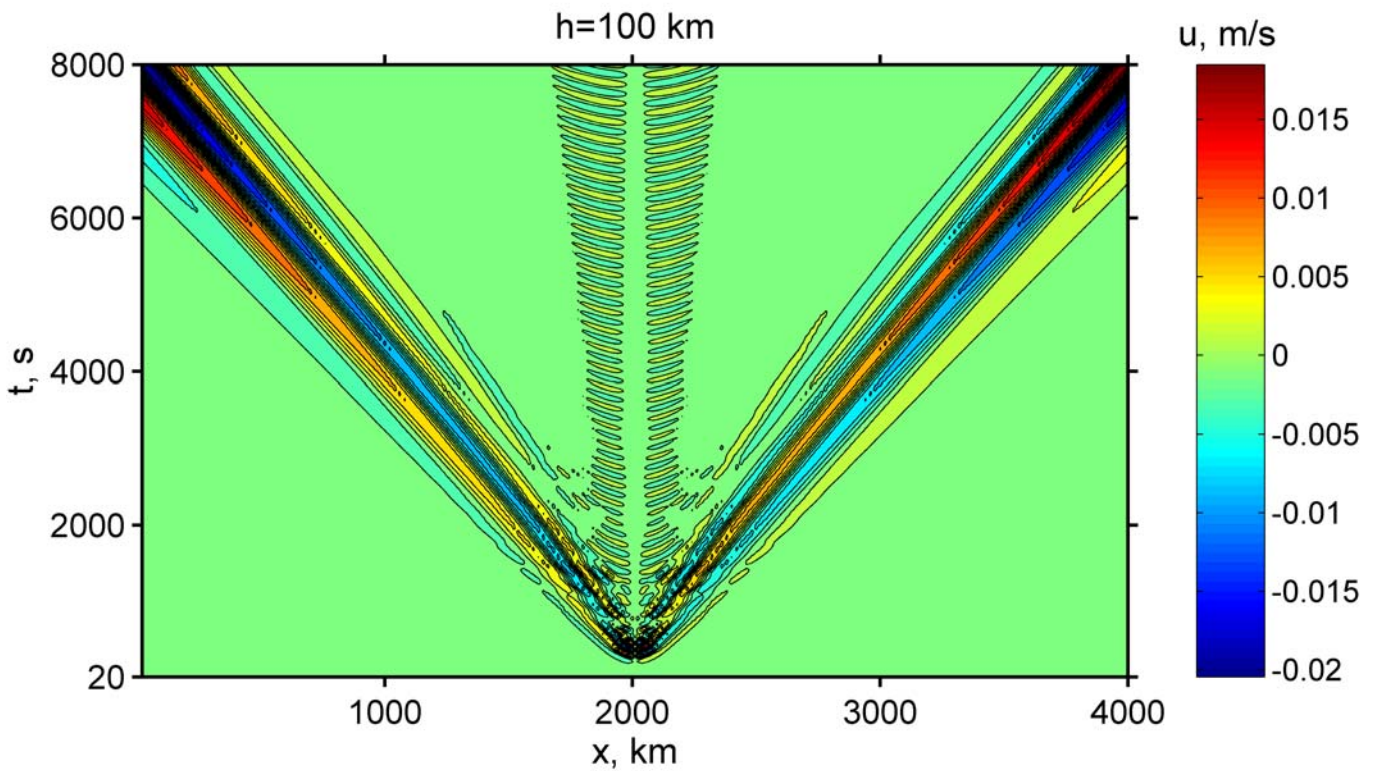


Рис. 2. Изменение горизонтальной скорости частиц атмосферы в зависимости от времени и горизонтального расстояния.

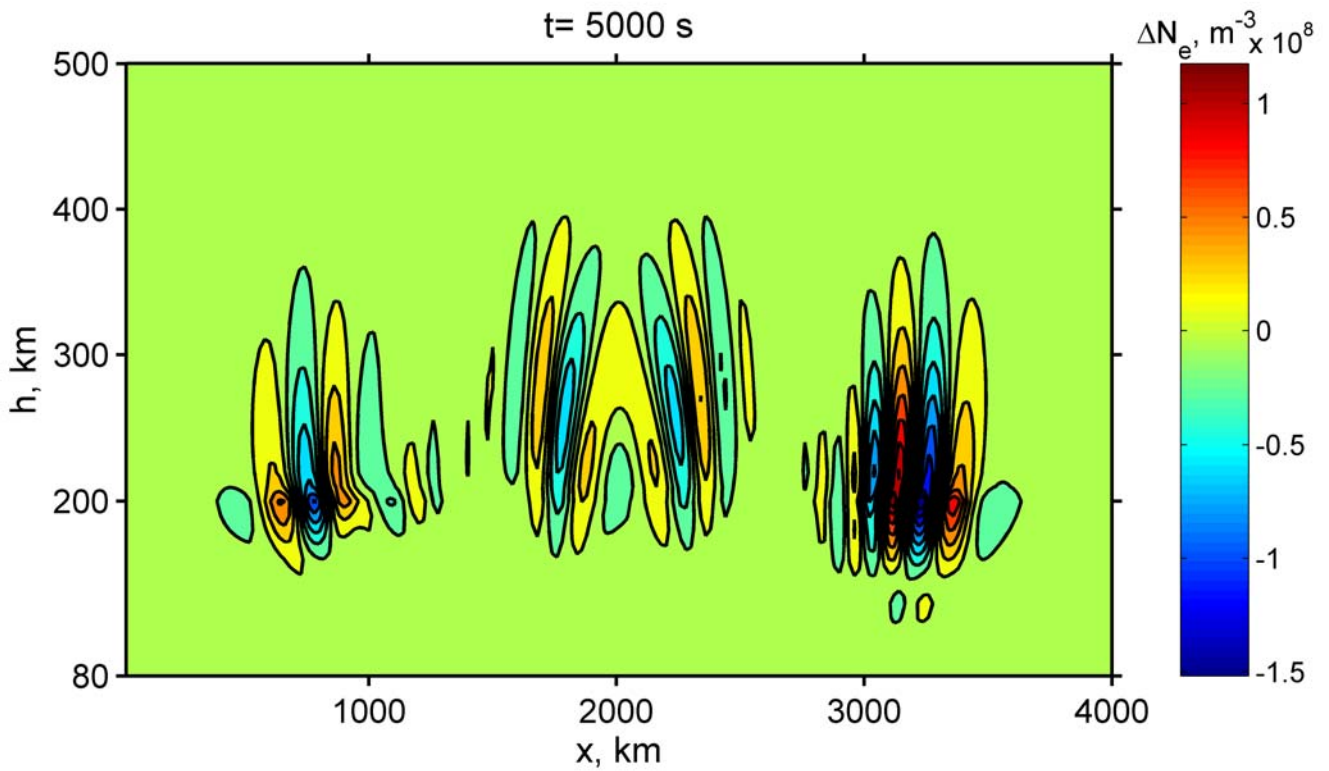


Рис.3. Распределение вариаций электронной концентрации в ионосфере, после наземного возмущения, где учтен ветер и горизонтальное магнитное поле.

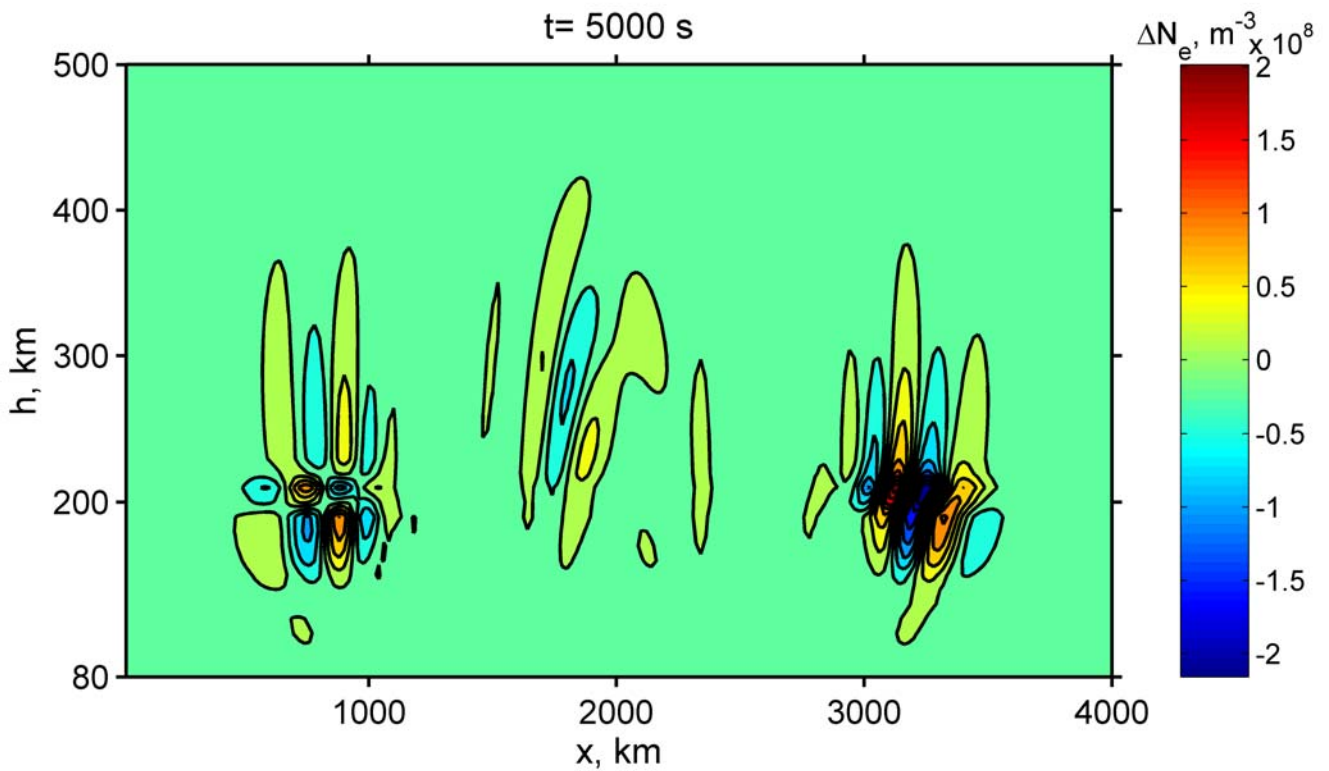


Рис.4. Распределение вариаций электронной концентрации в ионосфере, после наземного возмущения (наклонение магнитного поля  $I=45^\circ$ ).

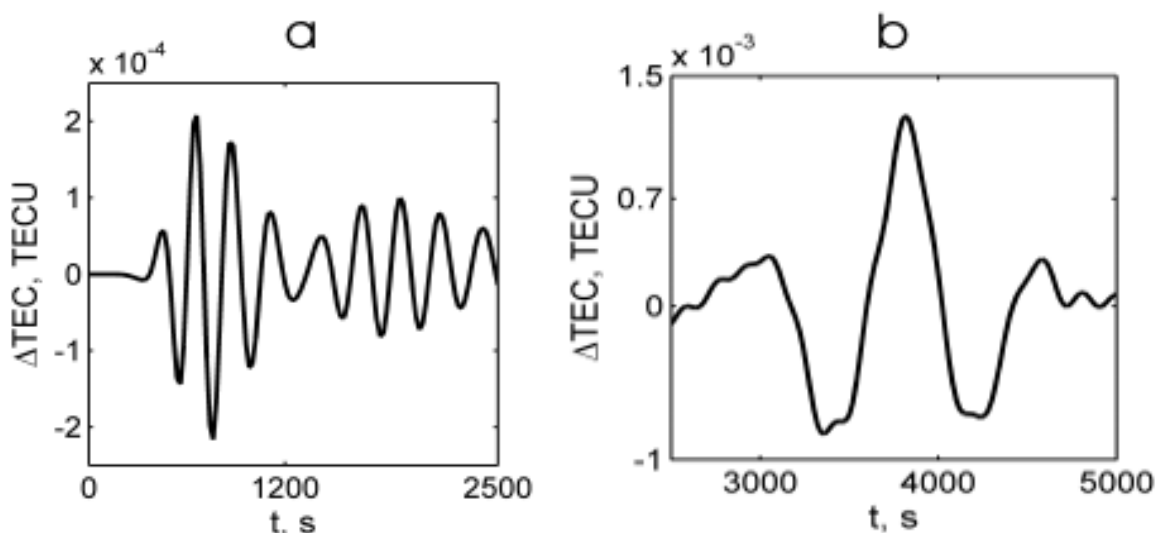


Рис. 5. Возмущения вертикального полного электронного содержания. а) над эпицентром; б) вдали от него;  $1 \text{ TECU} = 10^{16} \text{ эл/м}^2$

случае ПИВ распространяются со сверхзвуковой фазовой скоростью. Амплитуда возмущения электронной плотности такого же порядка, как в случае импульсного источника. По периодам атмосферные волны, генерированные волнами Рэля, принадлежат к высокочастотным АВ. Этот результат подтверждается результатами аналитических вычислений, проведенных в работе [8].

Кроме того, в природе существуют длиннопериодные источники, такие как цунами, колебания земной поверхности и т.д. [6–8]. Длиннопериодные колебания земной поверхности могут быть основным механизмом генерации ВГВ в сейсмически активных регионах. С этой целью мы брали источник в форме (4), с амплитудой  $1 \text{ мм/с}$ , но с разными периодами. Анализ отклика нейтральной атмосферы на такие источники показывает, что роль ВГВ в отклике растет с ростом периода источника. Результаты показывают, что в зависимости от расстояний в горизонтальном и вертикальном направлениях от источника, чувствительность атмосферы существенно меняется. На Рис. 7 показаны две резонансные кривые, рассчитанные на основе сравнения амплитуд скоростей над источником и на горизонтальном расстоянии  $100 \text{ км}$  от него. Очевидно, что первая кривая имеет максимум на частоте Брента-Вяйсяля. Из второй кривой видно, что максимум отклика смещается в сторону длинных периодов с удалением от источника в горизонтальном направлении. Что касается, амплитуды возмущений, то они сравнимы с откликами в случае импульсных источников, несмотря на то, что амплитуды источников отличаются в  $10^4$  раз. Таким образом, длиннопериодные наземные источники способны генерировать интенсивные ВГВ в атмосфере в больших масштабах. Если учесть, что в сейсмически активных регионах протяженность таких источников велика, тогда очевидно, что они могут сильно возбудить верхнюю атмосферу, и их можно зарегистрировать радиофизическими методами.

В пятом параграфе приведены результаты трехмерного моделирования атмосферных возмущений от импульсных источников. В трехмерном случае система уравнений (1) будет иметь аналогичный вид, но с добавлением компоненты скорости в другом горизонтальном направлении. К сожалению, большие затраты памяти компьютера и времени расчета ограничивают

возможности решения трехмерной задачи и обработки полученных результатов. Поэтому здесь представлены результаты, полученные на более грубых разностных сетках в меньшей пространственной области. На Рис. 8 показано пространственное распределение вертикальной скорости гидродинамических частиц в горизонтальной плоскости, где ось OX направлена под углом  $45^\circ$  к востоку. В данном случае учитывается горизонтальный ветер. Здесь источник точечный, параметры его такие же как в двумерной модели. Из графика видно, что над источником наблюдается акустический купол, и расходящиеся от него ВГВ. В трехмерном случае из-за геометрического расхождения наблюдается более сильное затухание волн.

**В четвертой главе** представлены результаты работ по моделированию генерации АГВ и ионосферных возмущений, генерированных во время полета ракет.

*Первый параграф* посвящен анализу свойств УВ, излучаемых сверхзвуковыми полетами ракет. Общеизвестно, что генерация АГВ происходит в основном во время горизонтального сверхзвукового полета ракеты после запуска [12]. При сверхзвуковом обтекании ракеты на больших расстояниях от нее вызываемые ею возмущения слабы, и поэтому их можно рассматривать как цилиндрическую звуковую волну, расходящуюся от оси, проходящей через ракету параллельно направлению обтекания. Мы ввели источник возмущения в расчетную модель следующим образом: пусть вертикальная координатная плоскость – XOZ (см. Рис. 1.) перпендикулярна к траектории горизонтального полета ракеты. Предположим, что с левой границы (участок CD на Рис. 1.) в расчетную область входит одиночный сильно нелинейный акустический импульс, который далее превращается в пакет АГВ. Цилиндрический звуковой импульс в первом приближении можно аппроксимировать с помощью функции Гаусса. Таким образом, акустический импульс вводится в модель в такой форме, что выражение для горизонтальной компоненты колебательной скорости частиц воздуха на оси OZ определяется формулой:

$$u = u_m \sin\left(\frac{2\pi(t-t_0)}{P}\right) \cdot \exp\left(-\left(\frac{z-z_m}{Dz}\right)^2\right), \quad t_0 \leq t \leq t_0 + P \quad (5)$$

где  $u_m$  – амплитуда,  $t_0$  – момент прихода импульса,  $P$  – период,  $z_m$  – высота оси звукового цилиндра от земной поверхности,  $Dz$  – Гауссовский масштаб, характеризующий поперечный размер цилиндра. Значения плотности и температуры в волне можно вычислить с помощью формул, описывающих простые нелинейные акустические волны [12]. Эти граничные условия обеспечивают передачу возмущения от среды вокруг траектории ракеты в рассматриваемую нами область атмосферы. Что касается моделирования второй области атмосферы, находящейся слева от траектории ракеты, то в этом случае такие же граничные условия будут на правой границе расчетной области. Граничные условия на других стенках области будут аналогичными, как в случае для наземных источников.

*Второй параграф* посвящен результатам моделирования генерации АГВ от звукового цилиндра вокруг сверхзвуковой ракеты. Здесь мы принимали

приближенные значения для параметров акустического импульса [12]:  $u_m = 260$  м/с,  $P = 26$  с,  $Dz = 10$  км. Результаты моделирования показывают, что в этом случае генерируется широкий спектр волн – АВ, ВГВ и захваченные АГВ. Основной отклик – это длиннопериодные волны. Примечательным фактом является то, что скорость распространения возмущений близка к скорости звука в термосфере, около 800 м/с. Как в предыдущих случаях горизонтальный ветер слабо влияет на характер отклика.

В третьем параграфе приведены результаты вычислений ионосферных волнообразных возмущений, генерированных во время полета ракет. На Рис. 9 изображен график изменения электронной концентрации в зависимости от координат в момент  $t=5000$  с, после начала возмущения, где учитывалась реальная стратификация атмосферы. Угол наклона магнитного поля  $75^\circ$ . Из графика очевидно, что в ионосфере генерируются крупномасштабные ПИВ с масштабами сотни километров. В области мезосферно-термосферного волновода видны захваченные волны, которые не появляются в решении, если принимать атмосферу изотермической.

Сравнение результатов с данными радиотомографических реконструкций, полученных во время запуска ракеты с космодрома Плесецк в 1991 г. [2], показывает, что данная модель качественно описывает пространственные свойства ионосферных возмущений от такого рода источников. Кроме того, низкочастотные ВГВ, предсказанные данной моделью, наблюдались также с помощью методов некогерентного рассеяния, доплеровского зондирования и т.д. во время запусков ракет с космодромов Байконур и Kennedy Space Center [12]. Что касается данных по вариации ПЭС, здесь модель также предсказывает появление N-образного возмущения по времени [4].

**В Заключении** сформулированы основные результаты, полученные в ходе выполнения данной работы. Была разработана численная модель распространения АГВ в двумерной и трехмерной сжимаемой атмосфере, учитывающая стратификацию атмосферы, зональный ветер, диссипативные эффекты и нелинейность. На основе двумерной модели были промоделированы генерация АГВ от разного вида источников. Были вычислены временные и пространственные распределения возмущений электронной плотности в ионосфере, генерированные во время распространения АГВ. Рассчитаны интегральные вариации электронной концентрации в разных направлениях для сопоставления с экспериментальными данными. Результаты показывают, что разработанная численная модель достаточно хорошо предсказывает наблюдаемые возмущения в ионосфере от рассматриваемых источников. Анализ полученных результатов демонстрирует, что отклики от наземных и атмосферных источников сильно отличаются друг от друга, так как вторые возбуждают верхний волновод атмосферы и находятся прямо в ионосфере. Сравнение численных и экспериментальных результатов показывает, что для углубленного изучения данной проблемы, следует привлекать комплекс различных методов наблюдения. Среди них самым информативным и подходящим является



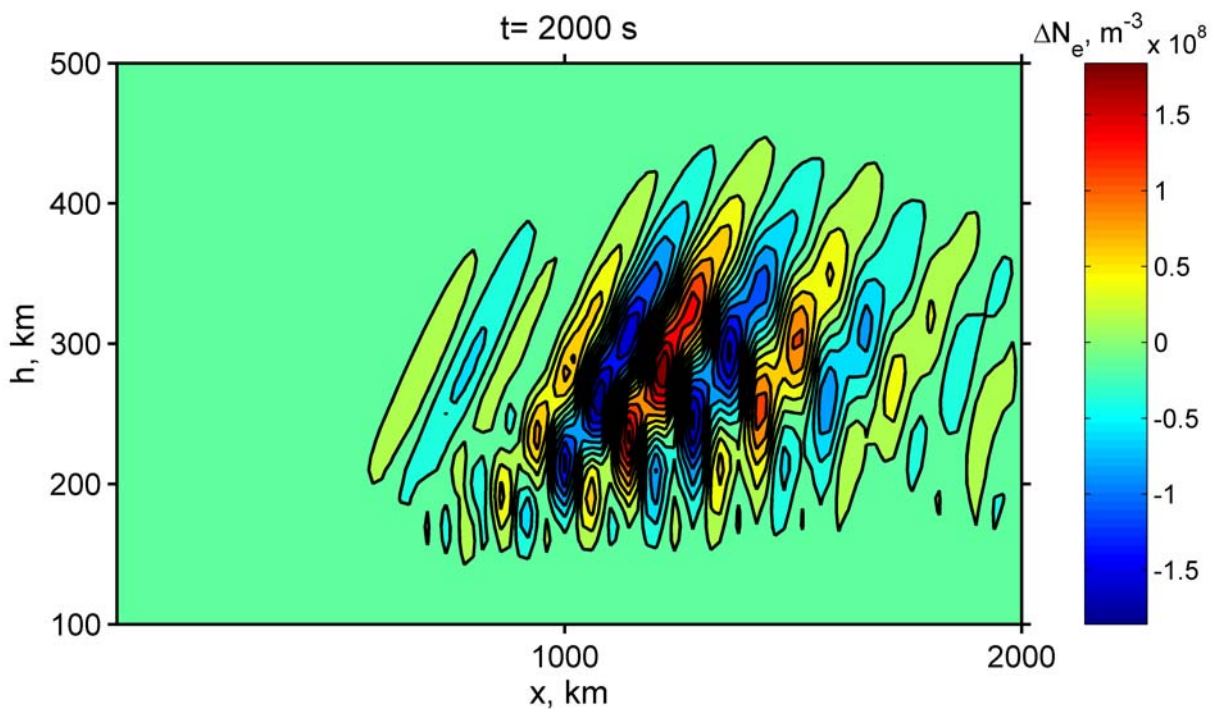


Рис. 6. Распределение вариации электронной концентрации в ионосфере, генерированная при распространении волны Рэлея. (наклонение магнитного поля  $I=0^\circ$ )

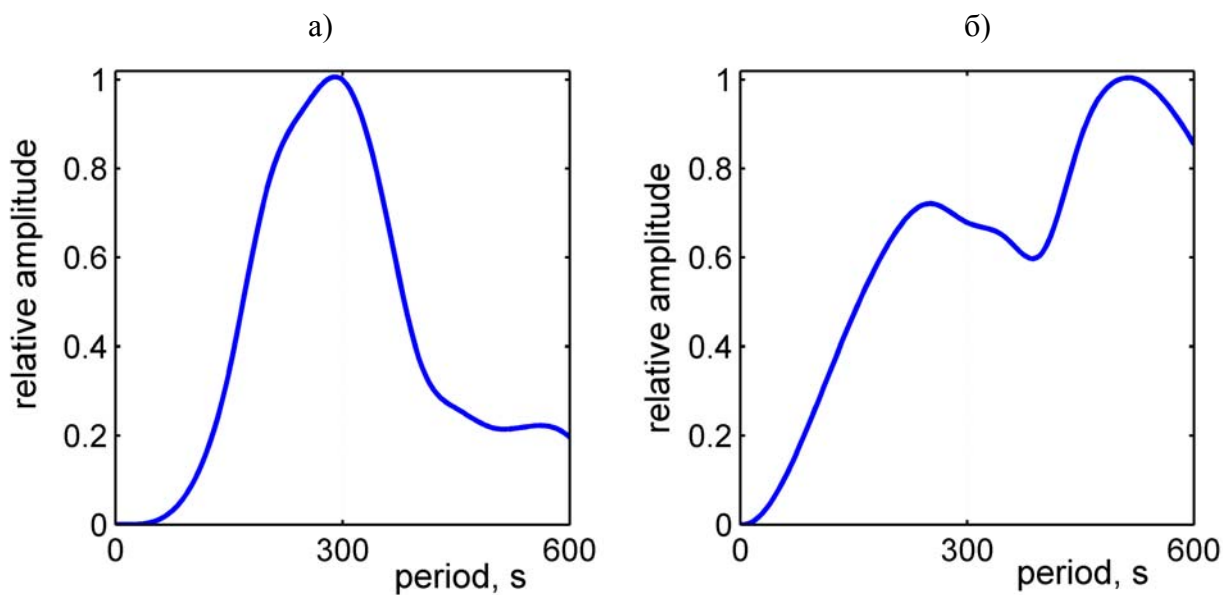


Рис. 7. Кривые чувствительности атмосферы к воздействию источников с разными периодами: а) на высоте 50 км от источника; б) на той же высоте, но на горизонтальном расстоянии 100 км от источника



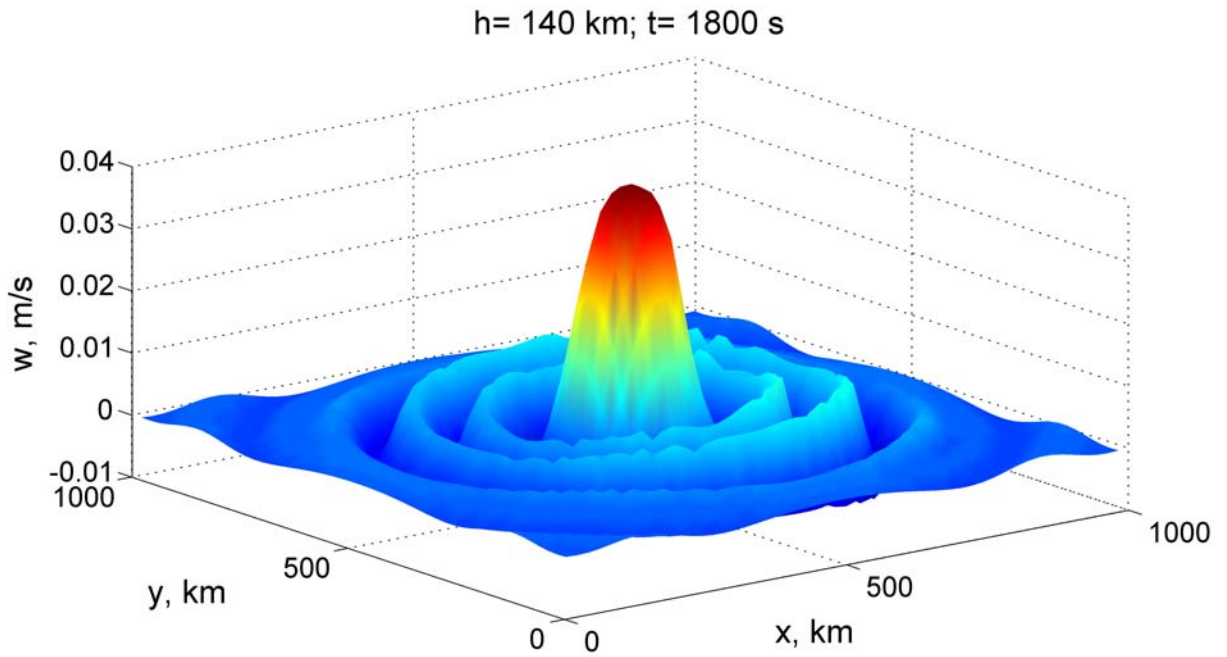


Рис. 8. Распределение вертикальной скорости частиц атмосферы в горизонтальной плоскости над импульсным источником.

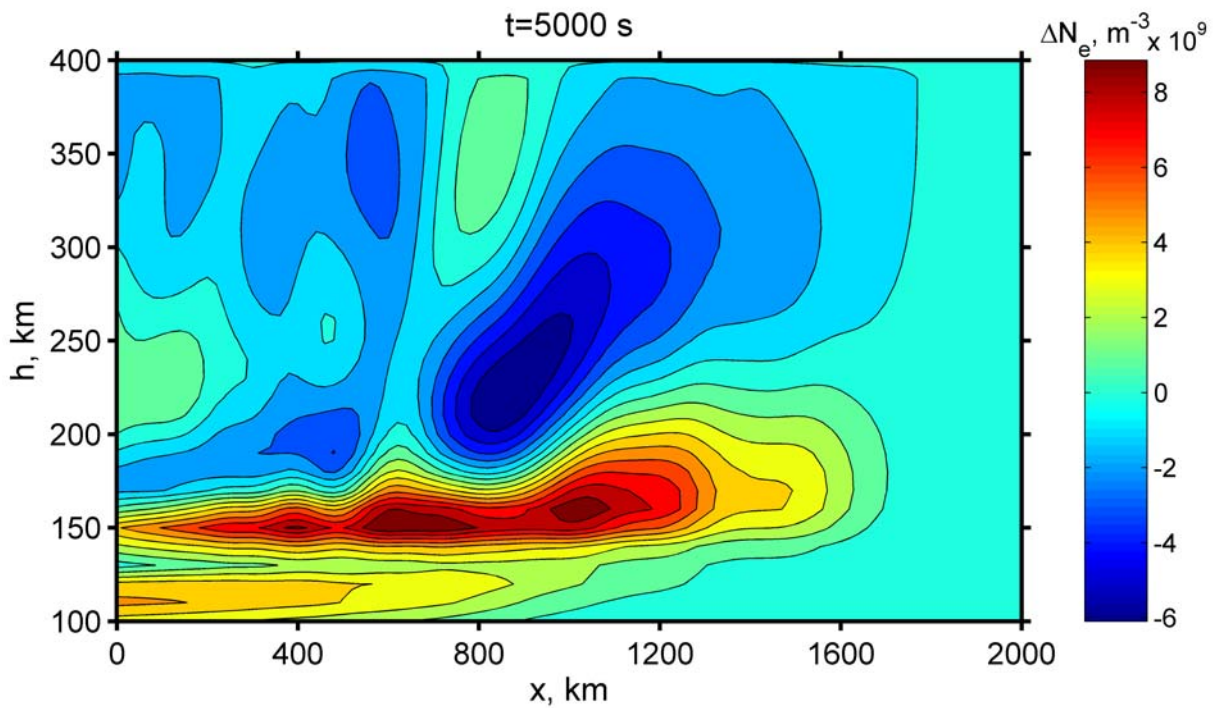


Рис. 9. Распределение возмущения электронной концентрации в ионосфере, во время сверхзвукового полета ракеты. Траектория ракеты перпендикулярна к координатной плоскости и находится слева от нее.

томографический метод, который позволяет зарегистрировать двумерную картину возмущения атмосферы и ионосферы.

Из полученных результатов следует, что для детальной интерпретации экспериментальных результатов необходимо учитывать следующие факторы:

- геометрию и временные характеристики источника;
- состояния атмосферы и ионосферы над местом наблюдения;
- ориентацию геомагнитного поля над местом наблюдения;
- особенности данного экспериментального метода.

В заключении можно утверждать, что предлагаемый подход к решению данной проблемы является эффективным методом расчета различных характеристик атмосферных и ионосферных возмущений, свойств АГВ и т.д.

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

1. 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.
2. Ахмедов Р.Р., Куницын В.Е. Моделирование ионосферных возмущений, вызванных землетрясениями и взрывами// Геомагнетизм и аэрономия. 2004. Т. 44. № 1. С. 1 - 8.
3. Ахмедов Р.Р., Кадиров Ф.А., Куницын В.Е. Моделирование атмосферных возмущений, вызванных землетрясениями// Изв. НАН Азерб. Сер. Наук о Земле. 2004. № 1. с. 59 - 68.
4. Ahmadov R.R., Kunitsyn V.E. Numerical simulation of atmospheric propagation of acoustic-gravity waves caused by impulsive sources on the earth// Geophysical Research Abstracts. 2003. V. 5. 12451.
5. Ahmadov R.R., Kunitsyn V.E. The atmospheric disturbances generated by the impulsive sources on the earth// International conference. Fluxes and Structures in Fluids. Sanct Petersburg. P. 6. 2003. 23-26 June.
6. Ахмедов Р.Р. Распространение внутренних гравитационных волн в стратифицированной атмосфере// Труды XII Всероссийской школы-конференции по дифракции и распространению волн. Москва. 19-23 декабря. 2001 г.
7. Ахмедов Р.Р. Численное моделирование ионосферных возмущений, вызванных землетрясениями и взрывами// ВНКСФ-9. Сборник тезисов. Т. 2. 871-873.
8. Ахмедов Р.Р. Численное моделирование распространения акустико-гравитационных волн в атмосфере// Труды V сессии молодых ученых «Гелио- и геофизические исследования». Иркутск. 2002 г. с. 71 - 73.
9. Ахмедов Р.Р. Численное моделирование распространения акустико-гравитационных волн в атмосфере, вызванных импульсными источниками на Земле// Международная конференция и школа молодых ученых. Томск. 1-11 сентября. 2003 г.
10. Ахмедов Р.Р., Куницын В.Е. Моделирование ионосферных возмущений, генерируемых наземными импульсными источниками// Труды XX Всероссийской конференции по распространению радиоволн. Нижний Новгород. 2-4 июля. 2002 г.

11. Ахмедов Р.Р., Куницын В.Е. Моделирование ионосферных возмущений, вызванных землетрясениями и взрывами// Труды LVIII научной сессии, посвященная дню радио. Москва. 2003.
12. Ahmadov R.R., Kunitsyn V.E. Modeling of acoustic-gravity waves generation and propagation in the atmosphere during rocket launchings// International Geomagnetism and Aeronomy (in press).

### ЦИТИРУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА:

1. Григорьев Г.И. Акустико-гравитационные волны в атмосфере Земли (обзор)// Изв. ВУЗов Радиофизика. 1999. Т. XLII. № 1. с. 3 - 25.
2. Kunitsyn V., Tereshchenko E. Ionospheric Tomography. Springer-Verlag. 2003. 272p.
3. 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.
4. Calais E., Minster J.B. GPS, earthquakes, the ionosphere, and the Space Shuttle// Phys. of the Earth and Planet. Inter. 1998. 105. 167 - 181.
5. Afraimovich E.L., Perevalova N.P., Plotnikov A.V., Uralov A.M. The shock-acoustic waves generated by earthquakes// Ann. Geophysicae. 2001. 19. 395 - 409.
6. Artru J., Lognonne P., Blanc E.. Normal modes modeling of post-seismic ionospheric oscillations// Geophys. Res. Let. V. 28. No. 4. P. 697 - 700. 2001.
7. Перцев Н.Н., Шалимов С.Л. Генерация атмосферных гравитационных волн в сейсмически активном регионе и их влияние на ионосферу// Геомагнетизм и аэрномия. 1996. 36. 111 - 118.
8. Голицын Г.С., Кляцкий В.И. Колебания в атмосфере, вызываемые движениями земной поверхности// Изв. АН СССР. ФАО. 1967. Т. 3. № 10. 1045 - 1052.
9. Гаврилов Н.М. Внутренние гравитационные волны и их воздействие на среднюю атмосферу и ионосферу. Дис... докт. ф.-м. наук. 04.00.22. ЛГУ. 1988.
10. Шувалов В.В. Динамические процессы в атмосфере вызванные сильными импульсными возмущениями. Дис... докт. ф.-м. наук. 04.00.23. Москва. 1999.
11. 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. 369 - 377.
12. Нагорский П.М. Модификация F-области ионосферы мощными импульсными источниками волн в нейтральном газе. Дис... докт. ф.-м. наук. 04.00.23. ТГУ. 1998. 365 с.
13. Zhang S.D., Yi F. A numerical study of propagation characteristics of gravity wave packets propagating in a dissipative atmosphere// J. Geophys. Res. 2002. V. 107. D14. 1 - 9.
14. Fritts D.C., Alexander M.J. Gravity wave dynamics and effects in the middle atmosphere// Reviews of geophysics. 2003. V. 41. N. 1. 1 - 64 .
15. Durran D. Numerical methods for wave equations in Geophysical Fluid Dynamics. Springer - Verlag New York, Inc. 1999. 465 p.