

ФИЗИКА ЗЕМЛИ, АТМОСФЕРЫ И ГИДРОСФЕРЫ

Моделирование распространения на ионосферных высотах акустико-гравитационных волн, порожденных цунами от землетрясения Тохоку 2011 годаВ. Е. Куницын^а, А. М. Воронцов^б*Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, физический факультет, кафедра физики атмосферы. Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2.**E-mail: ^аkunitsyn@phys.msu.ru, ^бam.vorontsov@physics.msu.ru*

Статья поступила 06.02.2014, подписана в печать 04.03.2014.

В работе анализируются данные наблюдений за верхней атмосферой после мощного землетрясения Тохоку, произошедшего в Японии 11 марта 2011 г. Наблюдения относятся к району Гавайских островов спустя приблизительно 7 часов после основного удара землетрясения и примерно за 30 минут до прихода волны цунами, вызванной этим землетрясением. Анализируются причины возникновения ионосферного отклика, содержащего целую серию волн, опережающих движение волны цунами. Путем численного моделирования уравнений геофизической гидродинамики в двумерной геометрии устанавливается вклад движущейся волны цунами в формирование такого опережающего отклика.

Ключевые слова: цунами Тохоку, ионосфера, акустико-гравитационные волны, раннее обнаружение цунами, уравнения геофизической гидродинамики.

УДК: 551.509.33. PACS: 94.20.-y.

Введение

Идея раннего обнаружения разрушительных волн цунами, являющихся следствием мощных землетрясений, восходит к работам 1970-х годов (см., напр., [1]). Базисом для такого раннего обнаружения является отклик ионосферы на события, сопутствующие планетарным землетрясениям. К такого рода событиям можно отнести собственно сами землетрясения, а также вызванные ими сейсмические волны Рэлея и цунами. С развитием систем мониторинга состояния ионосферы, в частности на базе сети GPS приемников, появилась возможность на практике реализовать идею раннего предупреждения о цунами. Однако необходимо иметь ясное понимание природы возникающих в ионосфере предвестников такого рода явлений, и здесь до сегодняшнего дня имеются разногласия. В работах [2, 3] анализируется разрушительное землетрясение Тохоку магнитудой 9.0, произошедшее в Японии 11 марта 2011 г. и породившее волну цунами, наблюдаемую далеко за пределами данного региона, в частности на Гавайских островах, находящихся приблизительно в 7000 км от эпицентра землетрясения. Первая работа посвящена регистрации ионосферных возмущений, вызванных данным землетрясением, по данным сети GPS приемников в непосредственной близости от места землетрясения, и анализу полученных результатов. Так, авторами было показано, что, по данным ТЕС (total electron content — полное электронное содержание), через 10 мин после землетрясения можно с определенной долей уверенности сказать о последующем возникновении волны цунами, подошедшей к берегу лишь через 20 мин, причем первоначальным источником возмущения ТЕС, по мнению авторов, служит локальный, быстрый и значительный подъем поверхности океана.

Отметим, что в работе [4] на основании трехмерного моделирования магнитогидродинамических уравнений и детальной динамической реконструкции поверхности океана проводится подробный анализ акустических и гравитационных волн, возникших приблизительно в течение часа от начала землетрясения. Величины ТЕС, рассчитанные по данным такого моделирования, хорошо согласуются с результатами реконструкций в [2], более того, авторы подтверждают гипотезу о возможности раннего предупреждения о цунами по данным ТЕС.

Во второй работе рассматривается регион Гавайских островов, к которому волна цунами пришла примерно через 7 ч после основного удара землетрясения, наблюдения производятся путем съемки интенсивности красного свечения ионосферной плазмы, приведенного нами на рис. 1 в обработанном несколькими фильтрами виде: так, как его приводят авторы [3]. Так, на рис. 1 справа приведено исходное изображение, изображение посередине есть применение к нему фильтра Габора с полосой пропускания 0.3–1.0 мГц, а изображение справа — с полосой пропускания 1.0–1.7 мГц. Красной линией на рисунке обозначена линия прохождения цунами на момент съемки, синие контуры соответствуют границам Гавайских островов. Отчетливо видно, что ионосферный отклик содержит целую серию волн, опережающих движение самой волны цунами. Авторы рассматривают три гипотезы возникновения этого эффекта, а именно: инфразвуковые волны, сгенерированные в эпицентре землетрясения и распространяющиеся в ионосфере быстрее, чем фронт цунами в океане; осцилляции диффузии плазмы, вызванные возмущением поверхности океана при движении цунами; начальные волны цунами, сформированные предразломными процессами. Рассматривая последовательно все

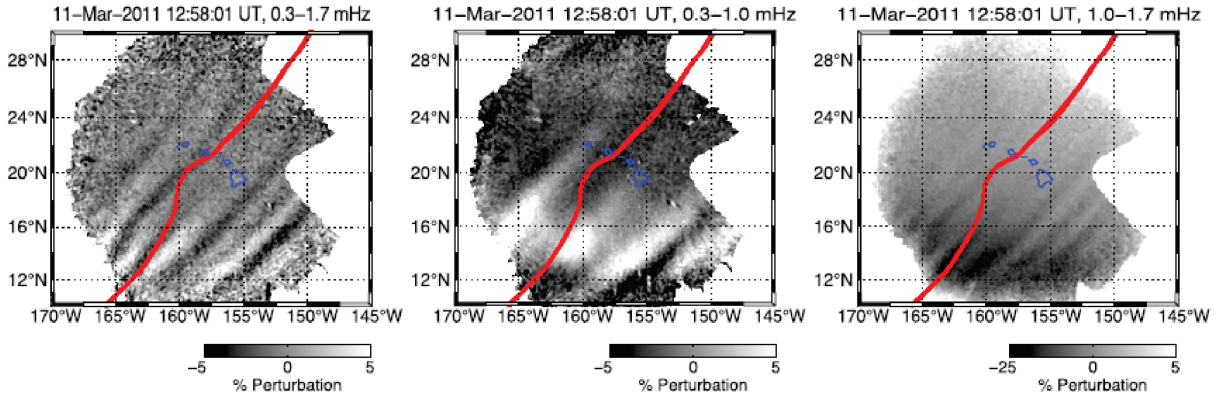


Рис. 1. Слева: Распределение вариаций красного (630 нм) свечения ионосферной плазмы над районом Гавайских островов снятое в диапазоне 0.3–1.7 мГц. Красная линия соответствует местоположению волны цунами Тохоку в момент съемки, синим выделены контуры Гавайских островов. Применение фильтра Габора с полосой пропускания 0.3–1.0 мГц (посередине) и 1.0–1.7 мГц (справа) к исходному изображению

три гипотезы и ссылаясь на данные моделирования внутренних гравитационных волн (ВГВ), порожденных прохождением волны цунами в океане [5], авторы приходят к выводу о справедливости третьей гипотезы, т.е. о решающем влиянии начальных процессов разлома на возникновение предвестника цунами. Однако в настоящей работе на примере указанного выше цунами Тохоку путем численного моделирования уравнений гидродинамики в двумерной геометрии будет частично подтверждена вторая гипотеза о формировании ионосферных предвестников волн цунами за счет движения непосредственно самих волн цунами в океане посредством механизма возникновения и распространения акустико-гравитационных волн (АГВ) в атмосфере Земли.

1. Постановка задачи и численный метод ее решения

Следуя [6, 7] для анализа условий распространения и механизмов генерации акустико-гравитационных волн (АГВ), рассмотрим уравнения геофизической гидродинамики

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

Первое уравнение — это уравнение неразрывности, второе — уравнение Навье–Стокса, третье — уравнение сохранения энергии и, наконец, последнее — это уравнение состояния идеального газа. Для относительно быстрых движений, соответствующих распространению АГВ, несущественна сила Кориолиса, поэтому мы пренебрегаем ею. Здесь ρ — плотность, T — температура, p — давление, \mathbf{v} — скорость движения частиц среды в волне, \mathbf{g} — ускорение свободного падения, \mathbf{F}_d — сила вязкости, Q_d — теплота, поглощенная из-за диссипации волны, c_v — удельная теплоемкость газа при постоян-

ном объеме, m_0 — относительная молекулярная масса воздуха, R — универсальная газовая постоянная.

В данной модели учитывается турбулентная вязкость до турбопаузы и ионное торможение, которое существенно выше турбопаузы. Эти силы диссипации вводятся как одна общая сила сопротивления в форме Рэлея $\mathbf{F}_d = -\alpha \mathbf{v}$ (см. [7]). Здесь α — коэффициент сопротивления, значение которого на разных высотах соответствует разным механизмам диссипации. В работе [6] было предположено, что $\chi = \alpha/\rho$ постоянно, и коэффициент сопротивления выбирался после тестирования модели при разных значениях. Кроме того, поскольку для затухания энергии таких больших волновых движений этим диссипативным механизмам требуется время порядка нескольких дней [8], в уравнении для температуры диссипативный член можно положить равным нулю $Q_d = 0$.

Для численного интегрирования системы (1) удобно каждый термодинамический параметр разложить на две части — стационарную часть, далее обозначаемую индексом 0, и возмущенную часть, обозначаемую штрихом. Кроме того, удобно привести уравнения (1) к безразмерному виду.

Будем рассматривать исходную задачу (1) в двумерной геометрии, поскольку фронт волны цунами имеет существенно большую протяженность в поперечном направлении (~ 1000 км), чем в продольном (~ 50 км), и искать ее решение в некоторой прямоугольной области, считая кривизну Земли не влияющей на дальнейшие результаты.

Введем двумерную декартову систему координат Oxz такую, что ось Oz направлена вертикально вверх, а ось Ox направлена горизонтально. В этой системе координат $\mathbf{r} = (x, z)$ и $\mathbf{v} = (u, w)$, где u (соответственно w) — горизонтальная (соответственно вертикальная) компонента скорости частиц среды. Проводя выкладки, аналогичные [6], нетрудно получить следующую систему уравнений:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho'}{\partial t} &= -\frac{\partial((\rho_0 + \rho')u)}{\partial x} - \frac{\partial((\rho_0 + \rho')w)}{\partial z}, \\ \frac{\partial u}{\partial t} &= -u \frac{\partial u}{\partial x} - w \frac{\partial u}{\partial z} - \frac{A_1}{\rho_0 + \rho'} \frac{\partial p'}{\partial x} - A_3 \chi u, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial w}{\partial t} &= -u \frac{\partial w}{\partial x} - w \frac{\partial w}{\partial z} - \frac{A_1}{\rho_0 + \rho'} \frac{d\rho_0}{dz} - \\ &\quad - \frac{A_1}{\rho_0 + \rho'} \frac{\partial p'}{\partial z} - A_2 - A_3 \chi w, \\ \frac{\partial T'}{\partial t} &= -u \frac{\partial T'}{\partial x} - w \frac{\partial (T_0 + T')}{\partial z} - A_4 \frac{T_0 + T'}{m_0} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} \right), \\ \rho' &= \frac{\rho_0 T' + \rho' T_0 + \rho' T'}{m_0}. \end{aligned} \quad (2)$$

Пусть $H = 8434.5$ м — высота однородной атмосферы, индекс s показывает значение соответствующего параметра на поверхности Земли, $c_s = 340.294$ м/с — скорость звука на поверхности Земли (см. [9]), $A_1 = p_s / \rho_s c_s^2$, $A_2 = gH / c_s^2$, $A_3 = H \alpha_s / \rho_s c_s$ и $A_4 = p_s / \rho_s T_s c_v = R / m_s c_v$. С учетом равенства $A_1 d\rho_0 / dz = -A_2 \rho_0$ третье уравнение можно переписать как

$$\frac{\partial w}{\partial t} = -u \frac{\partial w}{\partial x} - w \frac{\partial w}{\partial z} - \frac{A_1}{\rho_0 + \rho'} \frac{\partial p'}{\partial z} - \frac{A_2}{\rho_0 + \rho'} \rho' - A_3 \chi w.$$

При решении систем уравнений (2) необходимо задать начальные и граничные условия. Начальные условия для скорости, возмущений плотности и температуры выбирались нулевыми. В качестве граничных условий на нижней границе будем считать, что скорость движения частиц воздуха в приземном слое атмосферы равна скорости движения поверхности Земли или океана. Такое условие обеспечивает передачу возмущения от движущейся среды в атмосферу. Для остальных переменных будем полагать, что они непрерывны при переходе через поверхность нижней границы. На верхней и боковых границах были применены обычные граничные условия для обеспечения ухода волн через эти стенки без заметного отражения [10].

В настоящей работе рассматривается приповерхностный сейсмический источник — волна цунами, которая генерирует атмосферные возмущения. Как было сказано во введении, особый интерес представляет волна цунами Тохоку, вызванная мегаземлетрясением в Японии, произошедшим 11 марта 2011 г. Можно приближенно считать, что средняя скорость волны цунами Тохоку, вычисленная по формуле Лагранжа [11], составляла приблизительно 220 м/с (≈ 790 км/ч), ее высота 1.3 м, а длина порядка 50 км (см. данные [12]). В первом приближении вертикальное смещение поверхности океана можно представлять в форме функции Гаусса, распространяющейся с постоянной скоростью по горизонтали. Ее производной по времени будет скорость движения. Таким образом, источник описывается следующим образом:

$$w(x, z=0, t) = \frac{h\nu}{d^2} (x - \nu t) \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left(\frac{x - \nu t}{d} \right)^2 \right\},$$

где ν — нормированная скорость волны, h — нормированная высота волны, а d — гауссов масштаб нормированной ширины волны.

Для численного решения системы (2) был выбран алгоритм расчета переноса с коррекцией потоков (метод FCT) [13]. Отметим, что данный метод хорошо зарекомендовал себя при численном решении сходных задач моделирования ионосферных откликов от взрывов

и землетрясений (см. [6, 14]). Для решения указанной системы уравнений методом FCT можно воспользоваться методом расщепления шага по времени для координатных направлений x и z . Правые части уравнений (2) разделяются на горизонтальные и вертикальные компоненты. Так, для горизонтальной компоненты можно записать

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho'}{\partial t} &= -\rho_0 \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\partial (\rho' u)}{\partial x}, \\ \frac{\partial u}{\partial t} &= -u \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{A_1}{\rho_0 + \rho'} \frac{\partial p'}{\partial x} - A_3 \chi u, \\ \frac{\partial w}{\partial t} &= -u \frac{\partial w}{\partial x}, \\ \frac{\partial T'}{\partial t} &= -u \frac{\partial T'}{\partial x} - A_4 \frac{T_0 + T'}{m_0} \frac{\partial u}{\partial x}, \\ \rho' &= \frac{\rho_0 T' + \rho' T_0 + \rho' T'}{m_0} \end{aligned}$$

и аналогичное соотношение для вертикальной компоненты.

Системы уравнений для компонент решаются раздельно и попеременно в горизонтальном и вертикальном направлениях. Каждая пара последовательных интегрирований составляет продвижение решения по времени на один полный шаг. Так как возмущения очень быстрые, необходимо интегрировать аппроксимированные уравнения мелким временным шагом, с соблюдением условия сходимости Куранта–Фридрихса–Леви [10]. При этом общее время моделирования прохождения цунами должно быть не менее 8 часов, для того чтобы иметь возможность сравнивать результаты численных расчетов с результатами мониторинга ионосферы, полученными приемниками, расположенными на Гавайских островах. Таким образом, необходимо произвести несколько сотен тысяч итераций, причем за обозримое машинное время, и добиться сходимости итерационного процесса на всем протяжении расчета. В этом состоят основные трудности численного моделирования поставленной задачи, и именно перечисленные обстоятельства в конечном итоге определили выбор метода FCT как наиболее подходящего в данном случае.

Для решения уравнений (2) строится равномерная ортогональная сетка, в которой физические границы располагаются вдоль участков сеточных линий, а ее нижняя граница совпадает с невозмущенной поверхностью океана. Шаги по горизонтали и высоте брались равными 5 км, расчетная область по горизонтальной координате простиралась на 20 000 км, а по вертикальной координате на 500 км. Шаг по времени выбирался равным 0.1 с, общее время моделирования составило 8 ч. В начальный момент времени источник возмущения находится на расстоянии 7000 км от левой боковой границы области моделирования, а в конечный момент времени — приблизительно на расстоянии 14 000 км. При моделировании использовались профили фоновой плотности и температуры атмосферы из модели MSISE-90 (см. [15]). Профиль относительной молярной массы воздуха взят из модели ГОСТ [9]. Для значения коэффициента сопротивления здесь бралось значение $\chi = 10^{-5}$.

Отметим, что в расчетах использовался параллельный алгоритм получения решения на базе технологии

MPI (message passing interface), что позволило существенно повысить производительность вычислений на персональном компьютере и в будущем рассмотреть возможность трехмерного моделирования с использованием ресурсов современных суперкомпьютеров.

2. Анализ полученных результатов

Анализ полученных результатов начнем с рассмотрения распределений относительной плотности ρ'/ρ_0 и вертикальной компоненты скорости частиц атмосферы w в зависимости от координат спустя 1 ч после возникновения волны цунами, которые представлены на рис. 2. Горизонтальная ось координат соответствует моделируемой невозмущенной поверхности океана, вертикальная ось координат — высоте над уровнем океана, а вертикальная черта обозначает текущее местоположение волны цунами, которая движется слева направо. Ясно видно, что атмосферный отклик от генерируемого на поверхности океана возмущения имеет колебательный характер и сосредоточен преимущественно в диапазоне высот от 100 до 200 км. Нижняя граница этого диапазона определяется характером изменения характеристик статической атмосферы, в частности профиля температуры T_0 и относительной молекулярной массы воздуха m_0 . Верхняя граница соответствует высотам, после которых начинается активное торможение потока диссипативными механизмами ($F_d = -\alpha v$). Не вызывает сомнений, что наблюдаемые колебания являются акустическими волнами (АВ), скорость распространения которых в верхней атмосфере составляет ≈ 600 м/с. Как будет видно из дальнейшего изложения, АВ следуют прямо за источником возмущения, вследствие чего максимум отклика смещается в сторону более коротких периодов. Кроме того, поскольку

атмосфера оказывает фильтрующее действие на коротковолновые колебания, наблюдаемые АВ будут быстро затухать по мере удаления от источника.

Далее рассмотрим распределение исследуемых параметров спустя 4 ч после возникновения волны цунами. Соответствующие графики приведены на рис. 3. Здесь помимо уже отмеченных нами АВ, следующих непосредственно за источником, отчетливо видно зарождение длинноволнового колебательного процесса, опережающего возмущение океана приблизительно на 350 км. Есть все основания предполагать, что данный колебательный процесс соответствует ВГВ, генерируемым на высотах порядка 200 км. Действительно, анализ отклика нейтральной атмосферы на длиннопериодические источники показывает, что роль ВГВ растет с ростом периода источника. Рассматриваемый нами источник, безусловно, относится к такому типу источников (с периодом порядка 100 с). Кроме того, горизонтальная фазовая скорость ВГВ ≈ 250 м/с, а моделируемого возмущения 220 м/с, следовательно, ВГВ будет обгонять волновой пакет, следующий за источником, что и наблюдается в расчетах, приведенных на рис. 3. Все это указывает на необходимость формирования ВГВ, интенсивность которых должна нарастать со временем и в определенный момент превосходить интенсивность АВ. Рост интенсивности ВГВ по мере движения волны цунами связан с тем фактом, что по мере удаления от источника в горизонтальном направлении в отклике атмосферы начинают преобладать длиннопериодические колебания.

На рис. 4 показаны графики относительной плотности и вертикальной компоненты скорости частиц атмосферы в зависимости от координат в момент времени $t = 7$ ч, что соответствует моменту достижения волны

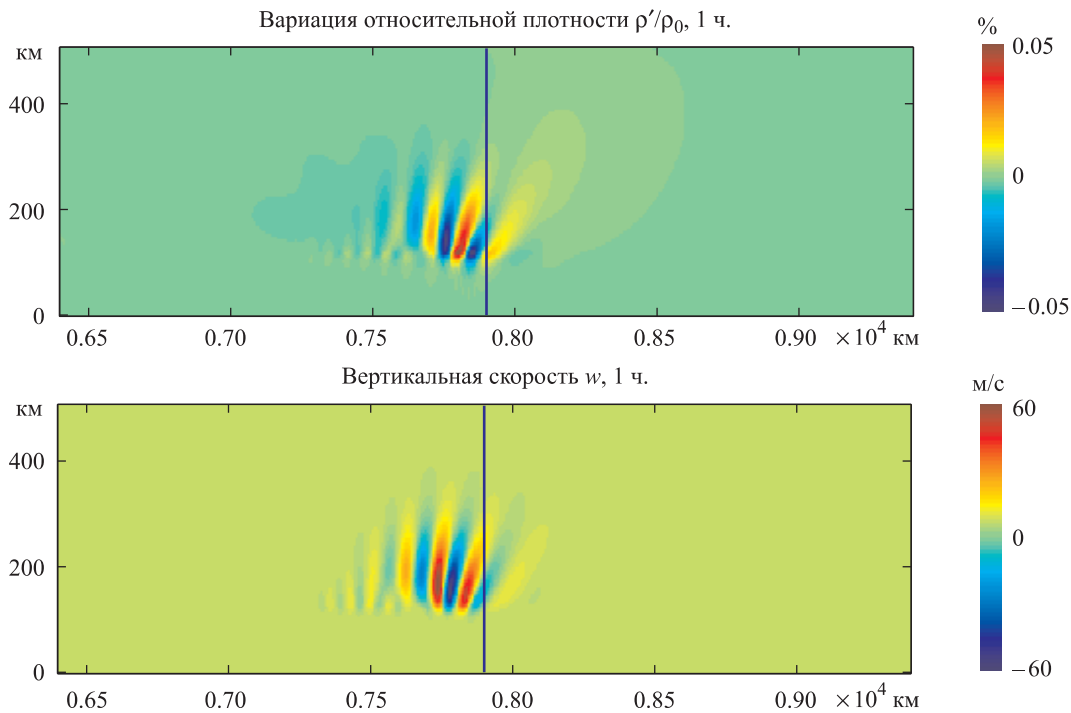


Рис. 2. Распределение относительной плотности и вертикальной компоненты скорости частиц атмосферы спустя 1 ч после возникновения волны цунами. Местоположение волны цунами здесь и далее отмечено вертикальной линией

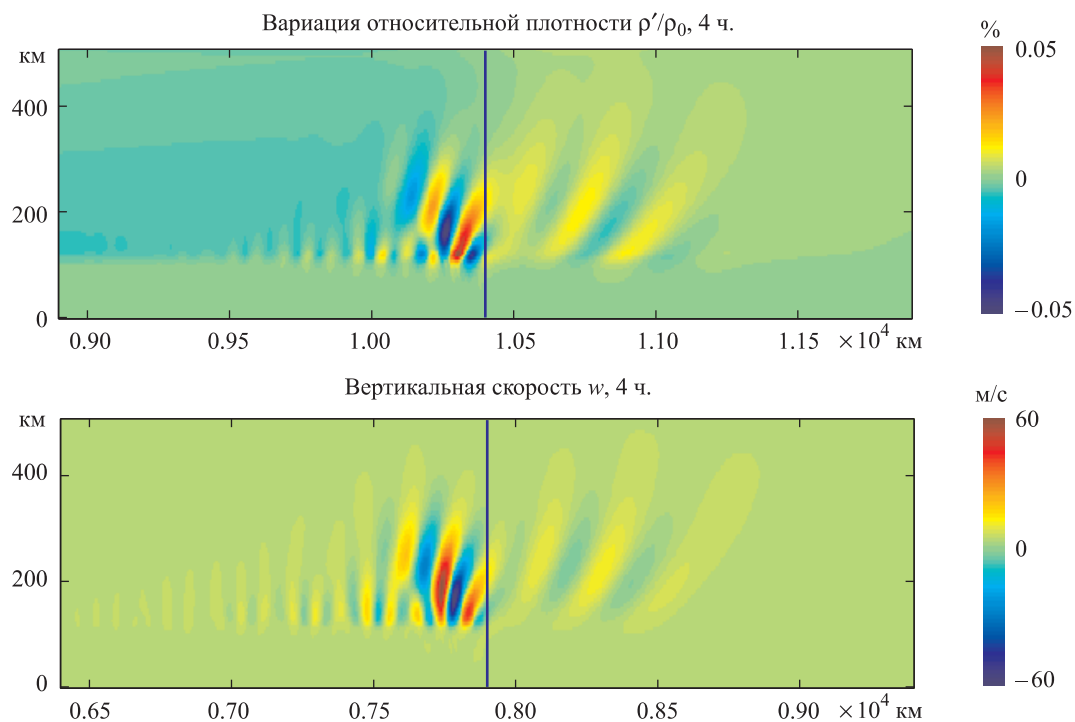


Рис. 3. Распределение относительной плотности и вертикальной компоненты скорости частиц атмосферы спустя 4 ч после возникновения волны цунами

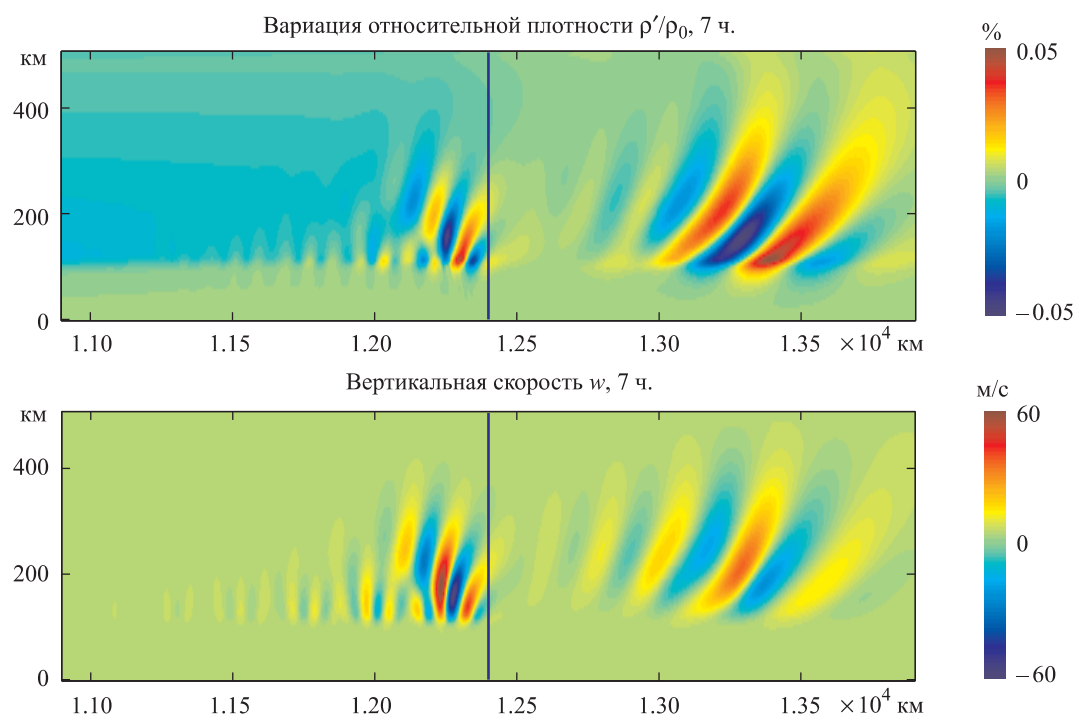


Рис. 4. Распределение относительной плотности и вертикальной компоненты скорости частиц атмосферы спустя 7 ч после возникновения волны цунами

цунами Тохоку 500-километрового региона Гавайских островов (время прихода цунами на Гавайи составило приблизительно 7.5 ч). Из графика очевидно явное присутствие предвестника волны цунами, а именно мощной ВГВ, опережающей возмущение поверхности океана (и сопутствующие ему АВ) и сосредоточенной впереди цунами преимущественно на расстоянии от 500 до 1000 км. С учетом скорости распространения цунами

первые возмущения верхней атмосферы могли наблюдаться на Гавайях примерно за один час по времени до прихода самой волны.

Вновь обратимся к результатам наблюдений (см. рис. 1), где нас будет интересовать в первую очередь правый график, представляющий собой применение фильтра Габора к изображению слева. Авторы [3] отмечают, что фильтр с полосой пропускания

1.0–1.7 мГц (справа) отвечает волнам с характерной длиной волны порядка 190 ± 5 км и скоростью распространения 222 ± 50 м/с. Такие характеристики хорошо соответствуют параметрам волн ВГВ, полученных при моделировании и приведенных на рис. 4. Кроме того, нетрудно видеть, что, как и на рис. 4, возмущения на рис. 1 справа структурно состоят из двух частей — одного опережающего, а второго следующего сразу за волной цунами. Таким образом, с определенной долей уверенности можно сказать, что ответственность за появление волнового процесса в диапазоне 1.0–1.7 мГц несут генерируемые цунами ВГВ. Что касается другой части спектра (рис. 1, посередине), то за его образование как раз и могут отвечать начальные волны цунами, сгенерированные процессами разлома на которые указывают авторы [3].

Итак, в работе показано, что длиннопериодные колебания поверхности океана могут очень эффективно генерировать атмосферные и ионосферные возмущения, несмотря на их низкие амплитуды и скорости движения. Если учесть, что протяженность таких источников велика, тогда очевидно, что они могут сильно возбудить верхнюю атмосферу, и их можно зарегистрировать традиционными радиофизическими методами. Кроме того, из полученных результатов можно сделать важный вывод, что для идентификации предвестников землетрясений и цунами необходимо проводить наблюдения на больших горизонтальных расстояниях от очага.

В заключение необходимо вернуться к результатам работы [5], где рассмотрена более сложная трехмерная модель атмосферы, включающая в себя магнитодинамические уравнения, а также содержащая детальное моделирование распространения волны цунами Тохоку в океане. Авторы статьи находят определенные совпадения результатов такого трехмерного моделирования в районе Гавайских островов с результатами наблюдений, приведенных на рис. 1, но стоит отметить, что такое совпадение довольно условно. Самое главное, численные расчеты по такой модели не содержат сигнал предвестника, фронт атмосферного возмущения идет вместе с волной цунами. Таким образом, в результатах моделирования в [5] ВГВ либо отсутствуют полностью, либо присутствуют лишь незначительно.

Причина отсутствия ВГВ в расчетах по модели [5] и их присутствия в расчетах по используемой в настоящей работе модели может быть в различной форме

диссипативного члена. Наличие магнитной составляющей не могло столь сильно повлиять на результаты моделирования, поскольку в аналогичных задачах добавление такой составляющей приводит к изменению результатов расчетов в пределах 10% (см. [16]). Несмотря на простоту используемой в настоящей работе модели, она зарекомендовала себя как надежный и эффективный инструмент расчета атмосферных откликов для широкого спектра возмущений поверхности Земли или океана, дающий хорошо интерпретируемые физические результаты. Рассмотренный выше пример расчета атмосферного отклика от цунами Тохоку лишь подтверждает этот вывод. Отметим, что в дальнейшем авторами планируется распространить используемую расчетную модель на трехмерную геометрию.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 14-05-00815).

Список литературы

1. *Najita K., Weaver P., Yuen P.* // Proc. IEEE. 1974. **62**, N 5. P. 563.
2. *Куницын В.Е., Нестеров И.А., Шалимов С.Л.* // Письма в ЖЭТФ. 2011. **94**, № 8. С. 657.
3. *Makela J.J., Lognonné P., Hébert H. et al.* // Geophys. Res. Lett. 2011. **38**. L00G02.
4. *Kherani E.A., Lognonné P., Hébert H. et al.* // Geophys. J. Int. 2012. **19**, N 1. P. 1049.
5. *Ochipinti G., Coisson P., Makela J.J. et al.* // Earth Planets Space. 2011. **63**. P. 847.
6. *Ахмедов Р.Р., Куницын В.Е.* // Геомагнетизм и аэрономия. 2004. **44**, № 1. С. 105.
7. *Госсард Э., Хук У.* // Волны в атмосфере. М., 1975.
8. *Pitteway M., Hines C.* // Can. J. Phys. 1963. **41**. P. 1935.
9. Атмосфера стандартная. Параметры. ГОСТ 4401-81.1981.
10. *Durran D.* Numerical Methods for Wave Equations in Geophysical Fluid Dynamics. N. Y., 1999.
11. *Пелиновский Е.Н.* Гидродинамика волн цунами. Н. Новгород, 1996.
12. http://www.ngdc.noaa.gov/hazard/dart/2011honsu_dart.html.
13. *Оран Э., Борис Дж.* Численное моделирование реагирующих потоков. М., 1990.
14. *Куницын В.Е., Сураев С.Н., Ахмедов Р.Р.* // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 2007. № 2. С. 59.
15. <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/space/model/models/msis.html>.
16. *Крысанов Б.Ю., Куницын В.Е., Холодов А.С.* // Журн. вычисл. матем. и матем. физики. 2011. **51**, № 2. С. 282.

Modeling the ionospheric propagation of acoustic gravity waves from the Tohoku tsunami of 2011

V. E. Kunitsyn^a, A. M. Vorontsov^b

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

E-mail: ^a kunitsyn@phys.msu.ru, ^b am.vorontsov@physics.msu.ru.

The observations of the upper atmosphere after the severe Tohoku earthquake of March 11, 2011 are analyzed. The observations cover the Hawaii region and span the time interval from about 7 h after the main shock to about half an hour before the arrival of the tsunami wave generated this earthquake. We explore the factors that are

responsible for the emergence of the ionospheric response, which comprises a series of waves propagating ahead of the tsunami. The contribution of the moving tsunami wave into the formation of such a pre-tsunami response is established by the numerical simulation of the equations of geophysical hydrodynamics with two-dimensional geometry.

Keywords: Tohoku tsunami, ionosphere, acoustic gravity waves, early detection of tsunami, equations of geophysical hydrodynamics.

PACS: 94.20.-y.

Received 6 February 2014.

English version: *Moscow University Physics Bulletin* 3(2014).

Сведения об авторах

1. Куницын Вячеслав Евгеньевич — доктор физ.-мат. наук, профессор, зав. кафедрой; тел.: (495) 939-38-06, e-mail: kunitsyn@phys.msu.ru.
2. Воронцов Артем Михайлович — канд. физ.-мат. наук, науч. сотрудник; e-mail: am.vorontsov@physics.msu.ru.