

УДК 551.466

О ВОЗМОЖНОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ЦУНАМИ В РЕЗУЛЬТАТЕ СТОКА ВОДЫ В СЕЙСМИЧЕСКИЕ ТРЕЩИНЫ ДНА

© 2007 г. Б. В. Левин*, М. А. Носов**

*Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН 693022 г. Южно-Сахалинск, ул. Науки, 16

E-mail: lbw@imgg.ru

**Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

119992 Москва, Ленинские горы, 1, строение 2

E-mail: nosov@phys.msu.ru

Поступила в редакцию 31.01.2007 г.

Предложен принципиально новый механизм генерации волн цунами в результате стока воды в быстро раскрывающиеся сейсмические трещины дна. Представлена математическая модель явления, развития в рамкахлинейной потенциальной теории. Выявлены основные параметры задачи, влияющие на характеристики образующейся волны.

Во время землетрясения из точки зарождения разрыва сплошности, называемой гипоцентром, излучается упругая волна P , распространяющаяся по твердой среде со скоростью продольной волны. Следом за ней движется поперечная волна S , имеющая меньшую скорость распространения и амплитуду волны, превышающую амплитуду продольной волны. При выходе продольной волны или волны сжатия на поверхность раздела сред “порода–воздух” формируется отраженная волна растяжения, амплитуда массовой скорости которой (или колебательной скорости частиц в волне) вдвое больше амплитуды в исходной волне сжатия P . Сильные землетрясения с магнитудой $M > 7.5$ формируют продольную волну с величиной массовой скорости, превышающей вблизи эпицентра 1 м/с [1, 2]. Напомним, что при значениях массовых скоростей в сейсмической волне свыше 0.1 м/с наблюдается повреждение инженерных сооружений. Согласно материалам авторов [2] при катастрофических землетрясениях с интенсивностью колебаний 11 баллов в зонах активных разломов наблюдаются сеймотектонические нарушения длиной до нескольких сотен километров при амплитуде смещений свыше 10 м.

При землетрясениях с магнитудой $M > 8.0$ величина массовой скорости в продольной волне может достигать 5 м/с и более [2]. В волне, отраженной от свободной поверхности, значение массовой скорости может составлять около 10 м/с в результате эффекта удвоения скоростей. Известно, что в большинстве горных пород при прохождении волны сжатия–растяжения с амплитудой более 8 м/с возникают разрывы сплошности, сопровождаемые множественными трещинами и накоплением поврежденностей.

Изучение макросейсмических эффектов сильных землетрясений [1, 2] и в особенности землетрясений за последние 50 лет [3–6] показывает, что в эпицентральной зоне или в плейстосейстовой зоне землетрясения (зоне максимальной интенсивности сотрясений) образуются сейсмические разрывы и системы трещин на громадной площади. Протяженность единичного сейсморазрыва достигает десятков километров (Алтайское землетрясение 2003 г. – разлом 20 км; Нефтегорское землетрясение 1995 г. – разлом 35 км; Гоби-Алтайское землетрясение 1957 г. – разлом Богдо 265 км, суммарная длина разломов 850 км). Сейсморазрывы представляют собой зияющие трещины шириной 5–15 м и глубиной до 20–50 м. Во многих случаях в зоне магистрального разрыва образуется система оперяющих трещин, в области шириной до 500 м [3]. Типичный вид сейсмической трещины, образованной во время Алтайского землетрясения 2003 г. представлен на рис. 1. Отметим, что характерная длина плейстосейстовой зоны сильнейших землетрясений, в пределах которой возникает система трещин, составляет порядка 1000 км, ширина такой зоны – порядка 100 км. (например, землетрясение 1202 г. на Среднем Востоке, землетрясение 26.12.2004 г. в Индонезии).

В случае сильного подводного землетрясения все описанные выше эффекты должны развиваться аналогичным образом в породах дна. Быстрое раскрытие трещин и полостей в породах, контактирующих с водным слоем, создает условия для стремительного стока (подсасывания) воды в образовавшееся пустое пространство. Следует отметить, что задача обнаружения подводных трещин сейсмического происхождения содержит значительные трудности, поскольку сейсмопрофилирование при больших глубинах



Рис. 1. Сейсморазрыв Алтайского землетрясения длиной более 6 км и шириной до 10 метров. Фото Е.А. Рогожина.

воды не обладает достаточной разрешающей способностью.

При определенных условиях (например, мелководье) возможно полное осушение дна на ограниченном участке в течение короткого промежутка времени. По сообщению очевидца Измитского землетрясения (Турция, 1999), приведенному в работе [7], вышеописанный гипотетический стоковый механизм формирования цунами был реализован в природе и имел живого свидетеля. Турецкий рыбак, находившийся в лодке в узком и мелком проливе возле мыса Гельчук (Измитский залив Мраморного моря) почувствовал сильную вибрацию (землетрясение). Почти сразу вода начала уходить вниз, и его лодка оказалась стоящей на дне моря. По обе стороны от лодки в некотором удалении стояли вертикальные стены воды высотой около 15 м. Потом стены воды начали

сближаться, образовались большие волны, и лодка сильным потоком была вынесена на берег.

Явление такого типа в научной литературе принято называть “эффектом Моисея” по аналогии с известным библейским сюжетом перехода через Красное море. Разумеется, осушенные участки дна существуют непродолжительное время, пока вода не заполнит весь объем, образованный возникшей системой трещин. Эффект кратковременного осушения участка Красного моря во время Исхода и гидродинамическая ситуация, при которой могло реализоваться это явление, были исследованы в работе [8].

Очевидно, что при стоковом механизме цунами образуется лидирующая волна отрицательной полярности (первая отливная волна). Известно, что многие цунами, в том числе и последнее катастрофическое цунами в Индийском океане, в декабре 2004 г., начиналось с прихода отливной волны в ряде пунктов, близких к источнику. Следует отметить, что подобный эффект может вызываться опусканием дна в районе очага цунами.

Для выявления основных параметров, от которых зависит амплитуда волн, вызываемых стоком воды в трещину, образующуюся в дне, используем математическую модель, развитую в рамках линейной потенциальной теории несжимаемой жидкости в работе [9]. Основанием для применения линейной теории служит предположение о малости амплитуды волны по сравнению с глубиной океана H . Отметим, что при выполнении условия $\tau < 4H/c$, где τ – время раскрытия трещины, c – скорость звука в воде, формально необходимо учитывать сжимаемость воды [10, 11]. Однако для оценки параметров гравитационных волн достаточно использовать теорию несжимаемой жидкости.

Для оценки характеристик волнового возмущения, образуемого раскрывающейся в дне трещиной, целесообразно решать двумерную задачу в вертикальной плоскости, ориентированной перпендикулярно направлению трещины. При раскрытии трещины в силу выполнения условия неразрывности вода будет “втянута” в образовавшиеся пустоты. Источник такого типа может быть описан заданием вертикальной скорости на дне. Постановка задачи иллюстрируется схемой на рис. 2.

Начало прямоугольной системы координат Oxz расположим на невозмущенной свободной поверхности воды, ось Oz направим вертикально вверх. Будем рассматривать безграничный вдоль оси Ox слой идеальной несжимаемой однородной жидкости постоянной глубины H в поле силы тяжести. До момента времени $t = 0$ жидкость находится в состоянии покоя. Для нахождения волнового возмущения $\xi(x, t)$, образующегося на поверхности жидкости в результате источника (стока) на дне, вертикальная скорость течения жидкости в котором

задана функцией $w(x, t)$, будем решать задачу относительно потенциала скорости течения $F(x, z, t)$:

$$\frac{\partial^2 F}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 F}{\partial z^2} = 0, \quad (1)$$

$$g \frac{\partial F}{\partial z} = -\frac{\partial^2 F}{\partial t^2}, \quad z = 0, \quad (2)$$

$$\frac{\partial F}{\partial z} = w(x, t), \quad z = -H, \quad (3)$$

где g – ускорение силы тяжести. Функцию источника выберем в следующем простом виде:

$$w(x, t) = -w_0[\theta(x+a) - \theta(x-a)] \times \\ \times [\theta(t) - \theta(t-\tau)], \quad (4)$$

где θ – ступенчатая функция Хевисайда, w_0 – амплитуда скорости жидкости, втекающей в трещину ($w_0 > 0$), a – полуширина трещины, τ – продолжительность действия источника. Знак “–” в формуле (4) означает, что течение на дне направлено вертикально вниз (против оси Oz). Вообще говоря, при раскрытии трещины ее ширина и скорость течения должны меняться во времени, но, как станет ясно из дальнейшего, это не принципиально, и можно ограничиться фиксированными значениями.

Решение задачи (1)–(3), найденное методом интегральных преобразований в работе [9], дается следующей формулой:

$$\xi(x, z, t) = \zeta(x, t)\theta(t) - \zeta(x, t-\tau)\theta(t-\tau), \quad (5)$$

$$\zeta(x, t) = -\frac{2w_0}{\pi} \left(\frac{H}{g}\right)^{1/2} \times \\ \times \int_0^{+\infty} dk \frac{\cos kx \sin ka \sin(t(kthk)^{1/2})}{k(kthk)^{1/2} \operatorname{ch} k}, \quad (6)$$

где под знаком интеграла стоят безразмерные величины, а коэффициент перед интегралом является размерным. Переход к безразмерным переменным проведен в соответствии со следующими формулами (знак “*” в дальнейшем опущен):

$$k^* = Hk, \quad a^* = a/H, \quad x^* = x/H, \quad t^* = t(g/H)^{1/2}, \quad \tau^* = \tau(g/H)^{1/2}.$$

Очевидно, что в большинстве случаев ширина трещины существенно уступает глубине океана $a \ll H$. Подынтегральная функция в формуле (6) быстро затухает, поэтому интегрирование фактически производится не до бесконечности, а до некоторого конечного предела k_{\max} . При условии

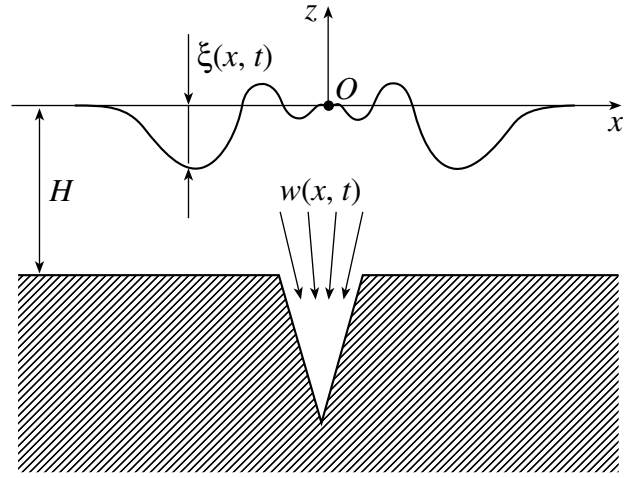


Рис. 2. Постановка задачи о генерации волны быстрым стоком воды в открывшуюся на дне трещину.

$k_{\max} a \ll 1$ выражение (6) можно представить в следующем виде:

$$\zeta(x, t) = -\frac{2w_0}{\pi} \left(\frac{H}{g}\right)^{1/2} \frac{a}{H} \times \\ \times \int_0^{+\infty} dk \frac{\cos kx \sin(t(kthk)^{1/2})}{(kthk)^{1/2} \operatorname{ch} k}. \quad (7)$$

Кроме того, если считать, что раскрытие трещины – процесс скоротечный, т.е. $\tau \ll (H/g)^{1/2}$, то допустимо и дальнейшее упрощение:

$$\xi(x, t) = -\frac{2w_0 a \tau}{\pi H} \int_0^{+\infty} dk \frac{\cos kx \cos(t(kthk)^{1/2})}{\operatorname{ch} k}. \quad (8)$$

Формула (8) позволяет утверждать, что амплитуда волны цунами, образованной стоком воды в трещину, пропорциональна площади поперечного сечения трещины ($S \sim w_0 a \tau$), отнесенной к глубине океана H .

Видно, что глубина океана является важнейшим параметром, влияющим на эффективность стокового механизма генерации цунами. Нами было проанализировано распределение глубин океана в эпицентрах известных цунамигенных землетрясений Тихоокеанского региона (всего 1096 событий). Координаты эпицентров взяты из исторической базы данных по цунами в Тихом океане, созданной в ИВМиМГ СО РАН (<http://tsun.sccc.ru/htdbrac>). Глубина океана вычислялась в соответствии с глобальной базой данных о рельефе Земли ETOPO2 (<http://www.ngdc.noaa.gov>). Установлено, что почти в половине случаев (48%) в эпицентральной точке глубина оказывается менее 200 м.

Оценим амплитуду волны, создаваемой сравнительно небольшой одиночной трещиной с харак-

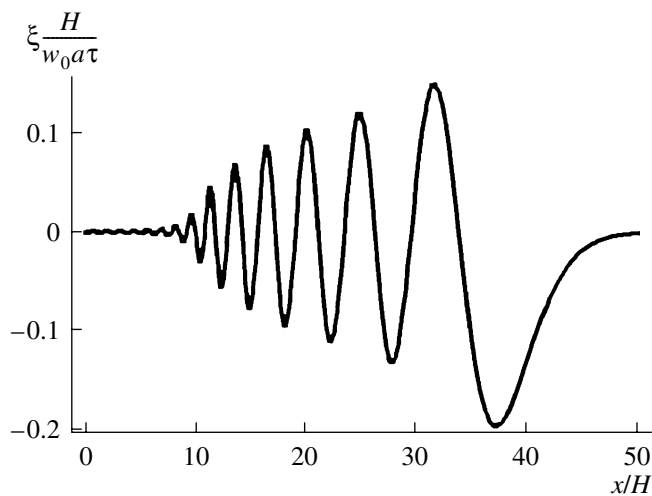


Рис. 3. Форма волны, вызванной быстрым стоком воды в узкую одиночную трещину. Расчет выполнен при $t = 20$.

терными размерами полушириной $a = 1$ м и глубиной $w_0 \tau = 10$ м. При глубине океана $H = 100$ м получаем амплитуду 0.1 м. Для системы трещин или в случае более масштабного разлома эта величина может значительно возрасти. Традиционные механизмы генерации цунами дают близкие значения амплитуды волны в источнике.

Пакет волн, сформированный стоком в одиночную трещину, будет диспергирующим, наибольшая длина волн будет примерно соответствовать глубине океана. На больших временах (или большом удалении от источника) при $x < t$ интеграл (8) может быть представлен с использованием метода стационарной фазы [12]. Так, например, для $x > 0$ асимптотическое представление формулы (8) имеет следующий вид:

$$\xi(x, t) = -\frac{1}{\pi} \frac{w_0 a \tau}{H} \sqrt{\frac{2\pi}{x|S''(k_0)|}} \frac{1}{\text{ch} k_0} \times \cos \left[t(k_0 \text{th} k_0)^{1/2} - k_0 x - \frac{\pi}{4} \right], \quad (9)$$

где

$$S(k) = \frac{t}{x} (k \text{th} k)^{1/2} - k.$$

Из формулы (9) видно, что с расстоянием амплитуда волны будет убывать по закону $\xi \sim x^{-1/2}$.

Типичный вид волнового возмущения, сформированного внезапно возникшей в дне узкой трещиной, представлен на рис. 3. Лидирующая волна является отрицательной, за ней следует диспергирующий цуг.

Выполненный анализ гидродинамических процессов, возникающих в водоеме над раскрывающейся трещиной дна, подтверждает правоту постановки задачи о стоковом механизме генерации цунами и перспективности дальнейшего изучения этого механизма в рамках более совершенных моделей с привлечением численного и физического эксперимента.

Авторы признательны Г.С. Голицыну и Ю.И. Троицкой за полезные обсуждения. Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты № 04-05-64274, 05-05-79133, 07-05-00363) и Программы поддержки ведущих научных школ России НШ-8043.2006.5.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шебалин Н.В. Проблемы макросейсмологии // Вычислительная сейсмология. 2003. Вып. 34. С. 57–200.
2. Шебалин Н.В., Антикаев Ф.Ф. Развитие шкал типа MSK // Вычислительная сейсмология. 2003. Вып. 34. С. 210–253.
3. Рогожин Е.А., Овсюченко А.Н., Геодаков А.Р. О сильном землетрясении на Алтае // Вестник РФФИ. 2004. № 2 (36). С. 60–70.
4. Сильное землетрясение на Алтае 27 сентября 2003 г. Материалы предварительного изучения / Под ред. А.О. Глико. М: ИФЗ РАН, 2004. 112 с.
5. Стрельцов М.И. Нефтегорское землетрясение 27 (28) мая 1995 года на Сахалине / Под редакцией А.И. Ивашенко, А.И. Кожурина, Б.В. Левина. М.: Янус-К, 2005. 180 с.
6. Гоби-Алтайское землетрясение / Под ред. Н.А. Флоренсова, В.П. Солоненко. М.: Изд. АН СССР. 1963. 391 с.
7. Ikeya M., Satoh H., Ulusoy U., Kimura R. Split sea and walls of water. Moses' phenomenon at the Izmit earthquake, Turkey. Proc., Japan Acad. 2002. V. 78. Ser. B. P. 24–29.
8. Вольцингер Н.Е., Андросов А.А. Моделирование гидродинамической ситуации Исхода // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2003. Т. 39. № 4. С. 532–546.
9. Носов М.А., Шелковников Н.К. Возбуждение диспергирующих волн цунами “поршневыми” и “мембранными” подвижками дна // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 1997. Т. 33. № 1. С. 145–151.
10. Носов М.А. О возбуждении цунами в сжимаемом океане вертикальными подвижками дна // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2000. Т. 36. № 5. С. 718–726.
11. Левин Б.В., Носов М.А. Физика цунами и родственных явлений в океане. М.: Янус-К, 2005. 360 с.
12. Федорюк М.В. Асимптотика: Интегралы и ряды. М.: Наука, 1987. 544 с.