

УДК 550.34

Ударно-волновая модель землетрясения. I. Сильные движения землетрясения как выход ударной волны на поверхность

В.В. Кузнецов

Институт космофизических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН, Камчатка, 684034, Россия

Предложена модель сильных движений грунта при землетрясении на примере двух землетрясений: Нортриджского (Калифорния, США, $M = 6.7$, 17.01.1994 г.) и Чуйского (Алтай, Россия, $M = 7.5$, 27.09.2003 г.). Сильные движения грунта при землетрясении рассматриваются как процессы, сопровождающие выход ударной волны на свободную поверхность. Теория этого явления хорошо развита, что позволило найти непротиворечивое объяснение практически всем известным особенностям таких движений поверхности.

Ключевые слова: сильные движения при землетрясении, выход ударной волны на поверхность

Shock-wave earthquake model. I. Strong ground motion as the emergence of a shock wave at the surface

V.V. Kuznetsov

Institute of Cosmophysical Research and Radiowave Propagation FEB RAS, Kamchatka, 684034, Russia

A model of strong earthquake-induced ground displacements as the processes involved in the emergence of a shock wave at the free surface is proposed and exemplified by two earthquakes: Northridge, California ($M = 6.7$; 17.01.1994) and Chuya, Altai ($M = 7.5$; 27.09.2003). The well-developed theory of this phenomenon allowed consistent explanation of virtually all known peculiarities of the surface motion.

Keywords: strong earthquake-induced motion, emergence of a shock wave at the surface

1. Введение

Физика землетрясения, несмотря на то что эта проблема стоит перед человечеством более 100 лет, до сих пор так и остается неясной. В чем же состоит причина и почему эта очень важная проблема, над решением которой работает огромное количество университетов, институтов и компаний во всем мире, не продвинулась ни на шаг за те сто лет, которые прошли с первой научной концепции упругой отдачи, высказанной Г. Рейдом в 1906 г. после разрушительного землетрясения в Сан-Франциско?

Дело, по-видимому, заключается в том, что физика землетрясения все это время рассматривалась только в рамках механики сплошной среды и теории упругости. Сильные движения грунта, сопутствующие землетрясению, объясняются обычно присутствием сейсмотектонических деформаций [1], хотя из всех опубликованных работ неясно, каким образом можно с этих позиций

объяснить весь комплекс явлений, сопровождающих сильное землетрясение. К этим явлениям относятся разрывы поверхности, отколы, волны на поверхности, когда среда ведет себя как вязкая жидкость, разуплотнение грунта, возникновение водяных фонтанов, грифонов и пр.

Оказывается, что все они находят логичное объяснение, если предположить, что катастрофические подвижки грунта в момент землетрясения связаны с ударной волной [2–5]. В этом случае, очевидно, физика землетрясения распадается на три части: 1) это механизм образования ударной волны в литосфере на глубине гипоцентра, 2) прохождение волны от гипоцентра до поверхности земли и 3) выход ударной волны на поверхность земли, сопровождающийся всем комплексом явлений, о которых идет речь.

В наших работах по ударно-волновой модели землетрясения, в отличие, например, от [1], под гипоцентром

понимается совсем не некая условная точка, а, скорее, огромное пространство, на котором возникает ударная волна. Некоторые авторы оговариваются, что очаг землетрясения сводится к точке для очень слабых землетрясений. Возможно, это справедливо, но уж совсем неправильно применять этот подход при анализе такого сильного землетрясения как Чуйское (Алтайское) 27.09.2003 г. Тем более, находить причину возникновения землетрясения в особенностях компонент тензора сейсмоструктурных деформаций в районе точки, соответствующей эпицентру землетрясения.

Есть ли основания для того, чтобы вообще рассматривать идею ударной волны как механизм землетрясения?

Величина смещения грунта во время главного толчка Чуйского землетрясения на Новосибирской сейсмостанции, составляет примерно 50 мкм. Зная величину смещения, можно попытаться оценить деформацию ϵ , производимую проходящей волной: $\epsilon \approx (1-5) \cdot 10^{-3}$ из следующих ниже соображений. Величина напряжения σ грунта, соответствующая $\epsilon = 0.1$, составляет примерно 50 МПа и эта величина изменяется линейно с изменением ϵ : $\sigma \sim \epsilon$. Эта закономерность дает основание оценить $\sigma = p \approx 0.5$ МПа при $\epsilon \approx 10^{-3}$. По-видимому, реальная величина σ еще меньше, однако эти оценки (при различных способах их получения) показывают порядок величин напряжения в волне. Скорость распространения волны, амплитуда которой составляет 0.5 МПа от очага Алтайского землетрясения до сейсмостанции Новосибирск, расположенной примерно в 650 км от очага, равна 3.6 км/с. Это намного больше, чем местная (в грунте) скорость звука (≈ 400 м/с). Возникает вопрос, какая волна (ударная или нет) приходит к сейсмостанции, расположенной так далеко (650 км) от очага землетрясения? Волна такой амплитуды ударной вроде быть не должна. Однако, если производная $d^2\sigma/d\epsilon^2 > 0$, волну можно считать ударной вне зависимости от величины σ [6]. В нашем случае это условие выполняется. В [6] сказано, что если условие $d^2\sigma/d\epsilon^2 > 0$ не выполняется, волну можно считать плоской волной сжатия, которая распространяется в упругопластической среде.

Сошлемся также на мнение С.Б. Смирнова, обосновавшего концепцию ударно-волнового сейсмического разрушения [7]. Автор учел многочисленные наблюдения сейсмических разрушений зданий, которые показывают, что разрушения происходят сразу после первых наиболее мощных поперечных толчков. Результатом таких толчков, которые конечно же не успевают раскачать здание, т.е. вызвать в нем появление опасных сил инерции, является почти мгновенный срез колонн или стен здания, вследствие чего происходит разрушение здания до попадания его в резонанс. Для того чтобы объяснить эти факты, автор приходит к мнению, что такие разрушения могут производиться только ударной волной.

Свою концепцию автор обосновывает расчетами и многочисленными примерами из практики сейсмических разрушений.

Оценки параметров волны, приведшей к весьма заметным колебаниям почвы в районе Новосибирска в 4 балла при Чуйском землетрясении 27.09.2003 г., а также работа С.Б. Смирнова свидетельствуют в пользу предлагаемой нами ударно-волновой модели землетрясения. Мы отметили только два примера, в действительности, подобных причин считать именно так значительно больше.

Как отмечалось выше, с точки зрения ударно-волновой модели землетрясения, его можно рассматривать как последовательность таких механизмов:

1) возникновение упругих напряжений в литосфере и мгновенный сброс этих напряжений путем формирования ударной волны,

2) распространение ударной волны по литосфере, взаимодействие ее со средой, приводящее к генерации акустических (сейсмических) волн, распространяющихся по всему объему Земли, и, наконец,

3) выход ударной волны на поверхность земли и формирование так называемых сильных движений грунта.

Настоящая статья включает рассмотрение только третьего механизма, как наиболее простого и более обоснованного. Здесь используется теория прохождения ударной волны по твердому телу и выхода ее на поверхность [6, 8, 9]. Первый и второй механизмы, более сложные и менее проработанные, будут обсуждаться в двух следующих статьях. Именно поэтому в общем заголовке статьи стоит цифра I.

2. Массовая скорость

В ударно-волновой модели землетрясения используется важная особенность ударной волны, заключающаяся в том, что прохождение волны по сплошной среде сопровождается «течением» вещества этой среды за фронтом ударной волны с массовой скоростью u , которая зависит от интенсивности ударной волны, т.е. от величины $\Delta\sigma$ (или p) на ее фронте.

Сравним общепринятую модель землетрясения с нашей ударно-волновой и покажем, что движение среды с массовой скоростью u вслед за ударной волной, это то же самое движение со скоростью, которая в stick-slip модели называется slip velocity.

Как известно во многих работах по физике очага сильных землетрясений, произошедших в последнее время, фиксируется и обсуждается подвижка в области очага и изменение этой подвижки во время основного удара. В книге К. Аки и П. Ричардса [10] спонтанное распространение сдвиговой трещины описывается формулой

$$w(\xi_0, \eta_0) \approx -\frac{1}{\sqrt{2\pi\mu}} \int \frac{d\xi}{\sqrt{\xi_0 - \xi}} \int \frac{p(\xi, \eta)d\eta}{\sqrt{\eta_0 - \eta}}, \quad (1)$$

где $w(\xi_0, \eta_0)$ — подвижка трещины в координатах ξ, η ; μ — модуль сдвига; $\xi(\xi, \eta)$ — траектория движения кончика трещины; $p(\xi, \eta)$ — величина сброшенного напряжения.

Интегрирование (1) приводит к формуле для подвижки:

$$w(\xi_0, \eta_0) \approx -\frac{\beta p_0 t}{\mu},$$

где $\beta = \sqrt{\mu/\rho}$ — скорость сдвиговых волн, обычно обозначаемая как V_S ; t — текущее время процесса.

Положим $w/t = u$ — скорость распространения подвижки трещины: $u = V_S p_0 / \mu$. Подставляя значение μ , получаем: $u = p_0 / (V_S \rho)$, или $p_0 = u V_S \rho$ — связь между скоростью распространения подвижки трещины, величиной сброшенного напряжения и акустическими параметрами среды. Для параметров среды, соответствующих Нортриджскому землетрясению ($u = 1$ м/с), величина p_0 совпадает с $\Delta\sigma = 10$ МПа.

Как известно в физике ударных волн, величина сжатия среды Δp после прохождения по ней ударной волны оценивается как [6]

$$\Delta p = u \rho c,$$

где u , как и раньше, — медленная массовая скорость течения среды за фронтом ударной волны; ρc — акустическое сопротивление среды. Если принять $u = 1$ м/с, а $\rho c = 2.5 \text{ г/см}^3 \cdot 4 \text{ км/с}$, то окажется, что величина Δp равна именно 10 МПа. Совпадение этих оценок неслучайно и, по-видимому, говорит в пользу того, что мы рассматриваем одно и то же физическое явление с точки зрения различных моделей. Действительно, и в модели землетрясения, основанной на теории упругости, и в нашей ударно-волновой модели конечным результатом действия механизма землетрясения является возникновение на поверхности Земли подвижек и течений сплошной среды, приводящих к образованию разрывов, разломов и т.п., т.е., собственно, к «трясению земли». Близость оценок величин скоростей подвижки в области очага в модели Рейда и массовой скорости, следующей из ударно-волновой модели, может говорить о том, что наша модель адекватна физическому механизму землетрясения. Ранее мы отмечали, что ударная волна вызывает возникновение разрыва поверхности. Конечно, это совсем не тот разрыв, который, следуя модели Рейда, распространяется с глубины 700 км до поверхности земли. Это локальный разрыв, время образования которого порядка длительности фронта ударной волны, а в пределе — длительности ее импульса.

Заметим, что К. Аки и П. Ричардс, обсуждая проблему землетрясения как сейсмического источника, не замыкаются только на проблеме образования трещины, которая, по их мнению, определяет одну из характеристик источника — разрыв. Они одновременно обсуждают и объемный тип источника, который связан с возникновением деформации и не имеет прямой связи с разрывом. Этот подход созвучен ударно-волновой модели зем-

летрясения, в которой ударная волна, проходя по очагу от гипоцентра до эпицентра, рассеивается (расщепляется) на неоднородностях среды, генерирует объемные волны, а выходя на поверхность Земли, приводит к разрыву и разуплотнению поверхности.

3. Взаимодействие ударных волн на поверхности

Рассмотрим волновую картину процессов формирования ударной волны в недрах Земли, движение ее к дневной поверхности, возникновение волн разгрузки (растяжения) и взаимодействие этих волн. Воспользуемся приемом из практики изучения ударных волн и изобразим рассматриваемые процессы на $x-t$ -диаграмме, где x — координата; t — время. Обозначим через x_0 и t_0 координату и время формирования ударной волны на поверхности кристаллического тела (рис. 1).

Предположим, что в земной коре на глубине (между точкой O ($x = 0$) и точкой D ($x = x_0$)) расположено геологическое тело, обладающее вполне определенными свойствами:

- во-первых, это должно быть прочное тело, способное к накоплению упругой энергии и образованию трещин, изменениям кристаллической решетки и нарушению дислокаций, т.е. к явлениям, приводящим к акустической эмиссии; кроме этого, оно должно иметь четкую акустическую границу с вышележащим слоем;
- во-вторых, вышележащий слой должен быть изотропным, т.е. в нем не должно быть внедрений вещества со свойствами, отличными от свойств тела (плотность и скорость звука);
- в-третьих, характер нагрузки тела должен быть таким, чтобы в нем могла возникнуть пространственно

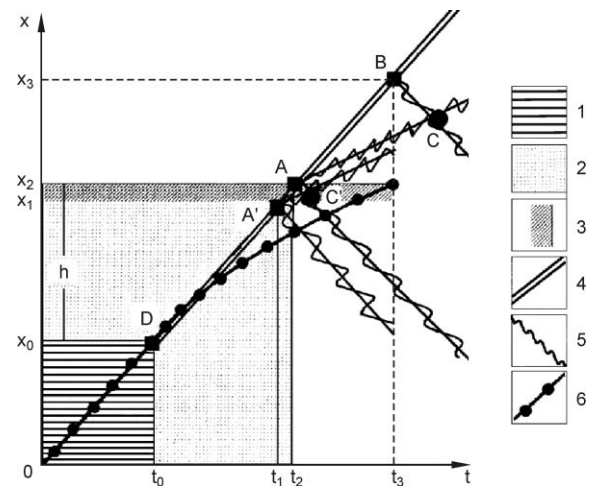


Рис. 1. Выход ударной волны на свободную поверхность (в точке (x_2, t_2)). Ударная волна выходит на свободную поверхность и образует волну разгрузки, «двигающуюся» в обратном (по отношению к ударной волне) направлении. Длительность ее импульса Δt , за это время ударная волна проходит по земной поверхности расстояние $\Delta x = x_3 - x_2$, h — глубина гипоцентра. В точке B также возникает волна разгрузки, которая направлена против направления ударной волны. Смысл обозначений 1–6 приведен в тексте

когерентная структура микротрещин; очевидно, что нагрузка должна иметь тензорный характер, т.е., кроме литостатической нагрузки, должна присутствовать и сдвиговая;

– в-четвертых, в этом теле должны образовываться и исчезать дефекты решетки, дислокации и раскрываться трещины таким образом, чтобы потом, после события, геологическое тело могло бы быть готово к очередному событию и т.п.

При выполнении этих требований в так называемой сейсмоактивной среде такого геологического тела I (рис. 1) возможно возникновение акустического стимулированного сверхизлучения [11] и образование ударной волны. Ударная волна, возможно, возникает в тот момент и в том месте, где скорость распространения волны b в среде превысит местную скорость звука, хотя возможны и другие (как будет показано в части III) механизмы образования ударной волны. В нашей модели это, скорее всего, произойдет на границе 3 (точка A) геологического тела 2 с окружающей его средой, в которой местная скорость звука ниже, чем в теле. Под сверхизлучением здесь понимается режим спонтанного увеличения акустического фона (N импульсов в секунду) до величины N^2 . Оптический аналог этого явления — оптическое сверхизлучение лазеров.

В точке $A(x_2, t_2)$ ударная волна 4 выходит на свободную поверхность (рис. 1) и образует волну разгрузки 5, двигающуюся в направлении отражения (по отношению к ударной волне). Если в среде имеется не совсем открытая поверхность, например слой с различающимися плотностями среды (точка $A'(x_1)$), то и на этой плоскости может возникнуть волна разгрузки. Длительность импульса (Δt) ударной волны конечна, за это время она проходит по земной поверхности расстояние $AB = \Delta x = x_3 - x_2$.

Обратим внимание на то, что волна разрежения в среде с нормальными термодинамическими свойствами образоваться может, но распространяться нет (теорема Цемплена) [6]. Взаимодействие фронтов ударной волны и волны разрежения происходит практически в точке возникновения волны разгрузки (разрежения). (Поэтому выражения типа: «бегущая» волна разрежения, взяты в кавычки.) Как известно, на фронте ударной волны происходит сжатие вещества среды, а в области фронта волны разрежения — растяжение. Взаимодействие фронтов этих волн приводит примерно к удвоению величины растягивающих напряжений — разрывам [6, с. 559]. Это явление аналогично тому, как в электромагнитной волне, распространяющейся вдоль линии, возникает удвоение напряжения на ее разомкнутом конце.

4. Падение ударной волны на свободную поверхность

Рассмотрим пример, когда ударная волна подходит снизу к дневной (свободной) поверхности («падает»)

под некоторым углом α . Из сейсмических наблюдений этот угол, соответствующий направлению главного удара землетрясения, находится в пределах 40° – 50° к горизонту. Например, при Спитакском землетрясении (1988 г., Армения) угол равен примерно 50° , а при Нортриджском (1994 г., Калифорния, США) — 40° и т.п. Наша модель позволяет определить область (эпицентр) разрушений такого землетрясения: расстояние вдоль направления распространения ударной волны примерно равно Δx , а поперек направления — линейному размеру очага. Например, в Нортридже длительность импульса ударной волны (в нашей интерпретации) составляла ≈ 8 с, что при скорости распространения ударной волны ≈ 5 – 6 км/с определяет область разрушений $\Delta x \approx 30$ – 40 км. Причем, что характерно для землетрясений с косым падением ударной волны, эпицентр землетрясения (как проекция гипоцентра), как правило, не совпадает с областью максимальных разрушений. В качестве подтверждающего примера можно привести диаграмму разрушений землетрясения в Нортридже, где эпицентр находится в стороне от области максимальных разрушений [12]. Аналогичная ситуация наблюдалась и в Спитакском, и во многих других землетрясениях.

Акцентируем внимание на процессах, сопровождающих выход не слишком сильной ударной волны на поверхность (рис. 2). Выход ударной волны под углом α к линии горизонта изображен на рис. 2, б. Здесь фронт ударной волны шириной a , двигающийся со скоростью c_0 , подходит под углом α к земной поверхности, вещество которой обладает плотностью ρ . Распространение ударной волны сопровождается сравнительно медленным движением сплошной среды с массовой скоростью u . Ударная волна отражается на участке AB и уходит вниз со скоростью c_0 . При отражении возникает быстро затухающая волна разгрузки (разрежения, растяжения), движение которой сопровождается перемещением вещества со скоростью u_0 . Действие на грунт силы, связанной с перемещением массы с вертикальными (вверх) компонентами этих скоростей, приводит к разуплотнению, расширению грунта и подъему его относительно начального уровня на высоту порядка метра, как это, например, наблюдалось во время Чуйского [13] и Нортриджского землетрясений [14].

На участке AB за счет отражения ударной волны может возникнуть система сил, направленных друг навстречу другу соответственно тому, как направлены горизонтальные компоненты массовых скоростей: $u - u_0$ (рис. 2, в) либо $u' - u'_0$ (рис. 2, д). Ниже этих рисунков показаны диаграммы первых вступлений (разломные диаграммы), соответствующие ситуациям, изображенным выше.

На рис. 2, а изображено распределение плотности до (слева) и после выхода нормально падающей ударной волны (справа). Видно, что после выхода ударной волны и отражения волны от поверхности вещество с плот-

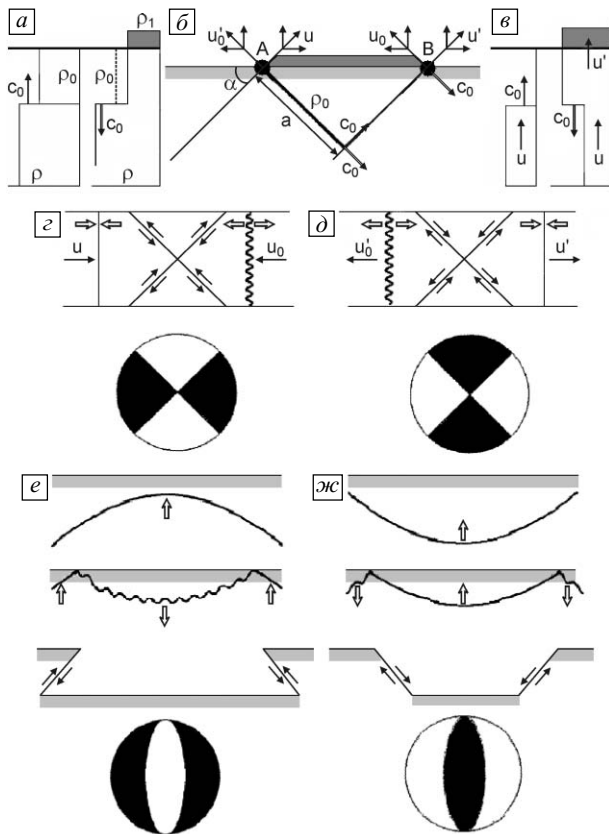


Рис. 2. Выход фронта плоской ударной волны шириной a на поверхность Земли под углом α к линии горизонта ($a-d$), на поверхность сферической ударной волны ($e, жс$). Пояснения в тексте

ностью ρ_1 (меньшей ρ_0) находится выше начального уровня. Аналогичная картина представлена на рис. 2, b , где изображены скорости в нормально падающей ударной волне со скоростью c_0 и массовые скорости u и $u' \approx 2u$ до выхода ударной волны на поверхность (слева) и после ее выхода на поверхность. На рис. 2, e и $жс$ показаны схемы прихода к свободной поверхности сферической ударной волны (выпуклой (e) и вогнутой ($жс$)) и формирование отраженной волны разгрузки. Ниже, под каждой из схем, приведены диаграммы первых вступлений. Темные секторы на всех диаграммах рис. 2 означают области сжатия, светлые — растяжения. Комбинируя из четырех приведенных диаграмм, можно получить любую из наблюдаемых в природе диаграмм. В нашей модели форма диаграммы определяется исключительно формой фронта ударной волны, которая определяется местными условиями ее возникновения и прохождения по среде. Отсюда следует, что выход ударной волны сопровождается переносом вещества и наблюдаемым неоднократно вспучиванием почвы. Кроме этого, начальная форма ударной волны определяет форму разломных диаграмм (диаграмм первых вступлений).

Различие в скоростях распространения ударных волн по глубине и вдоль поверхности вызывает возникновение растягивающих и сжимающих усилий разных

знаков, приводящих к появлению разломов и разрывов земной поверхности. Соответственно, фазы вступления поверхностных волн, возникающих при образовании разрывов и фиксируемые сейсмостанциями, «повторяют» фазы направлений растяжения-сжатия, определяемых (как, например, в Нортридже) по величине доплеровского изменения стабильной частоты радиосигналов со спутников Global Positioning System (GPS).

5. Взаимодействие ударных волн с преградой. Отколы и разрушения

Предлагаемый здесь принципиально новый механизм сильных движений среды при землетрясении основан на известной физике взаимодействия волн, возникающих при выходе ударной волны на «свободную» поверхность твердого тела. Наиболее полно этот вопрос рассмотрен в книге Е.И. Забабахина [9], которой будем придерживаться при изложении материала этого раздела.

Как известно, ударная волна — это волна сжатия, на очень узком фронте которой термодинамические характеристики претерпевают разрыв. Эта волна при прохождении через твердое тело уплотняет его, а при расщеплении на внутренних неоднородностях тела приводит к генерации и излучению объемных волн. Ударная волна, как отмечалось выше, отличается от обычных акустических (сейсмических) волн еще и тем, что вслед за фронтом ударной волны происходит движение (течение) вещества твердого тела, причем массовая скорость этого течения значительно меньше скорости ударной волны, и чем интенсивнее ударная волна, тем выше массовая скорость. При выходе ударной волны на поверхность твердого тела образуется волна разрежения, двигающаяся в сторону, обратную движению ударной волны. Образование волн, идущих в обе стороны от «свободной» поверхности, принято называть распадом разрыва. Разрыв в начальных условиях распространения ударной волны действительно исчезает, так как образуются два других разрыва. В книге [9] рассмотрены четыре возможных типа распада разрыва, из которых нас будет интересовать лишь четвертый. Все типы распада разрыва изображены на рис. 3 (сверху вниз):

1. Образование двух ударных волн. Такой тип распада встречается при выходе ударной волны из более «мягкого» вещества в более «жесткое».
2. Образование ударной волны и волны разрежения. Это происходит при выходе ударной волны из более жесткого вещества в более мягкое. В теле начинает распространяться волна разрежения.
3. Образование двух волн разрежения. Они возникают в том случае, когда, строго говоря, разрыва в начальных условиях нет, а волна разрежения приходит на границу двух сред, до этого сжатых и покоящихся. На Земле такая ситуация может возникнуть при выходе ударной волны на поверхность и образовании волны разреже-

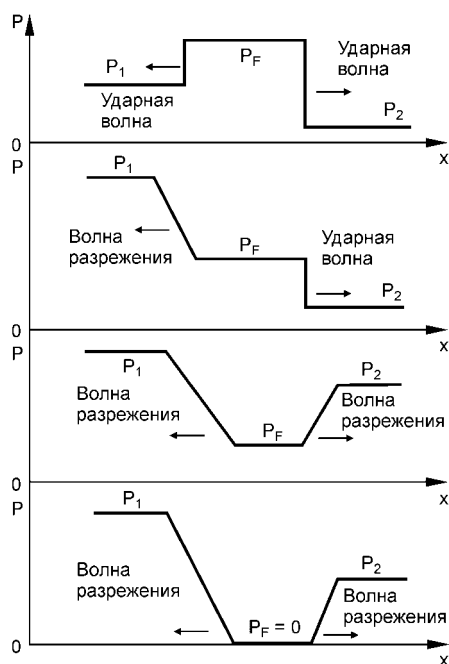


Рис. 3. Возможные типы распада разрыва [9]. P_1 и P_2 — давления на фронтах волн ударной и разрежения, P_F — давление в теле после прохождения по нему этих волн. Стрелки — направления распространения волн. Откол происходит при $P_F = 0$

ния. Волна разрежения приходит на границу двух сред, например грунта, лежащего на гранитном основании, либо рыхлого грунта на границе вечной мерзлоты и т.п. Волна разрежения является фактически волной плавного изменения состояния и не носит характера ударной волны, т.к. фронт такой волны имеет конечную ширину.

4. Образование двух волн разрежения и разрыва ($P_F = 0$) сплошного вещества возможно при слабом начальном сжатии (т.е. вблизи поверхности). При интенсивных волнах разрежения элементы вещества начинают двигаться друг от друга в противоположных направлениях, т.е. происходит откол — разрушение ранее целого и компактного вещества.

6. Особенности сильных движений

В течение последних 25 лет в сейсмически опасных регионах США и Японии созданы измерительные и информационные сети, позволяющие фиксировать комплекс явлений на земной поверхности в момент землетрясения. Например, землетрясение в Нортридже вблизи Лос-Анджелеса было зарегистрировано примерно 150 приемниками GPS с точностью перемещений грунта порядка 1 мм. Кроме этого, использовались геодезические приборы, сейсмические датчики ускорений и т.п. Объем информации по сильным движениям Нортриджского землетрясения так велик, что выбрать какую-либо конкретную деталь и на ней сконцентрировать внимание просто невозможно. Надо сказать, что данных

по землетрясению в Кобе (Япония) 1995 г. не меньше, чем в Нортридже.

Обсудим особенности сильных движений грунта при землетрясении. В качестве примера остановимся на данных, полученных с помощью датчика горизонтальных перемещений, установленного в 80 м на 65° северо-востока от разлома Сан Андреас, в момент Паркфилдского землетрясения 1966 г. Зависимость ускорения, скорости и величины смещения грунта Паркфилдского землетрясения 1966 г. приведены в книге [10]. Анализируя эти данные, можно видеть, что поведение упругой среды (грунта) скорее характерно для жидкости. Действительно, колебания смещений среды в горизонтальном направлении в момент землетрясения напоминают волны на воде при падении в нее камня. Можно оценить длительность периода колебаний $T \approx 1$ с, среднюю величину групповой (массовой) скорости $u \approx 10$ см/с (максимальное значение u в 80 м от разлома — более 50 см/с), волновое число $k = \omega/u \approx 0.1$ см $^{-1}$. Величины k и ω для волн на поверхности жидкости связаны дисперсионным уравнением

$$\omega = \sqrt{gk + \alpha^* k^3 / \rho},$$

где ρ — плотность среды; g — ускорение силы тяжести; α^* — коэффициент поверхностного натяжения. Подстановка в эту формулу оцененных нами данных позволяет судить о величине «поверхностного натяжения» грунта, приобретшего при ударной нагрузке на него в момент землетрясения свойства, характерные для жидких сред. Величина α оказывается порядка 10^2 Н/м (для сравнения, α^* воды $\approx 7 \cdot 10^{-2}$ Н/м, литосферы $\approx 10^{16}$ Н/м). Таким образом, полученная нами оценка величины поверхностного натяжения не слишком экзотична и вполне может оказаться реальной. При этом грунт в момент его сильного нагружения может проявлять вызванную пластичность и действительно вести себя как «вязкая жидкость». Далее рассмотрим несколько примеров сильных движений грунта при землетрясении.

6.1. Откольные явления в грунтах

Приведем результаты экспериментов по исследованию явлений отколов в грунтах, возникающих при взрывах в скважинах, выполненных более 40 лет тому назад [15]. Эксперимент состоял в регистрации коротких импульсов от взрыва небольших зарядов взрывчатых веществ, помещенных в скважину на глубину до 20 м, с помощью широкополосной сейсмической аппаратуры. С увеличением веса заряда (или уменьшением глубины его заложения) форма регистрируемого импульса менялась. На больших глубинах и малых зарядах импульс был практически однополярен. Отколов грунтов при этом не наблюдалось. С увеличением веса взрывчатых веществ на регистраторе появлялся второй импульс, следующий за первым, причем обратной полярности. С появлением второго импульса наблюдались отколы. Рас-

положение датчика в скважине на сравнительно небольшой глубине приводило к тому, что на этом датчике второго импульса не наблюдалось, в то время как и отколы, и второй импульс на датчике, установленном на грунте, регистрировались. Эти эксперименты демонстрируют возникновение волны разгрузки, следующей за ударной волной, и ее действие — отколы, а также ее быстрое затухание на сравнительно небольших глубинах. Заметим, что неоднократные попытки проследить трещины, образовавшиеся при землетрясении вглубь, заканчивались безуспешно: на глубине, большей, чем наблюдаемая глубина открытой трещины, она никогда не прослеживается (частное сообщение академика Н.Н. Пузырева).

6.2. Особенности сильных движений землетрясений

Физику землетрясений нельзя понять, если базироваться только на теоретических моделях, натурных и лабораторных экспериментах. Решающую роль должны сыграть непосредственные наблюдения за сильными землетрясениями, выявление их общности и различий, пространственных и временных особенностей и закономерностей макросейсмологии. Выясним, может ли оказаться полезным использование ударно-волновой модели при обсуждении особенностей явлений в грунте, сопровождавших сильные землетрясения.

6.2.1. Нортриджское землетрясение ($M = 6.7$, 17.01.1994 г.)

Любая теория явления, а также его физическая модель проверяются опытом, т.е. экспериментом или качественными наблюдениями. В этом плане наблюдения за Нортриджским землетрясением 1994 г., в своем роде, уникальны. Воспользуемся данными наблюдений, полученными американскими сейсмологами в момент прохождения этого землетрясения и некоторое время спустя после него. Используемые нами данные в значительной массе собраны в специальном выпуске Бюллетеня сейсмологического общества Америки [16].

Одно из наиболее изученных из землетрясений — Нортриджское — произошло вблизи Голливуда, пригорода Лос-Анджелеса, в сейсмоопасном и густонаселенном районе, где сосредоточено наибольшее количество сейсмической измерительной аппаратуры. Особую ценность, на наш взгляд, представляют собой результаты измерения трех компонент сильных движений на специально оборудованном полигоне Van Norman Complex [17], а также результаты исследования величины и направления подвижек в очаге землетрясения.

Нортриджское землетрясение 6.7 баллов (энергия $\sim 10^{15}$ Дж) произошло 17 января 1994 г. Координаты гипоцентра — 32.2° N, 118.5° W, глубина — 16.6 км. Сейсмический момент — $1.2 \cdot 10^{19}$ Н·м. Ориентация разлома: направление — 131° , наклонение — 50° , уклон — 115° . Размер зоны разрушений — 20×20 км², скорость

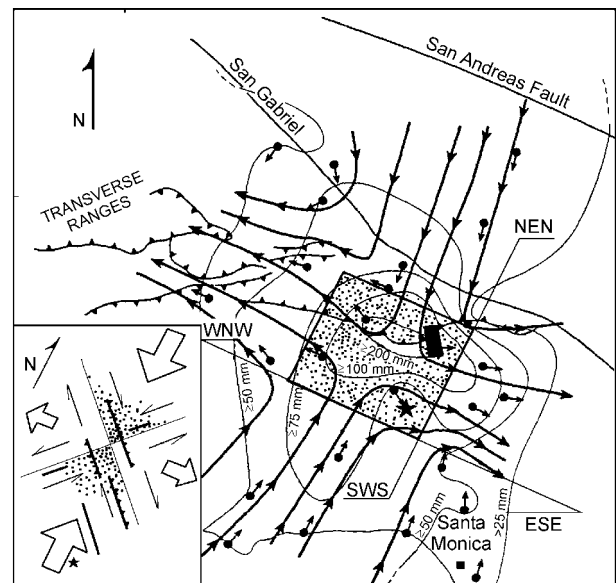


Рис. 4. Расположение GPS-станций (точки) в момент Нортриджского землетрясения. Звезда — эпицентр землетрясения, выделенный прямоугольник — область сильных движений, черный прямоугольник — специальный полигон Van Norman Complex, стрелки показывают направления горизонтальных движений грунта. Слева (на вставке) — направление сжимающих и растягивающих сил в районе разлома Сан-Андреас

разрыва — 2.8 км/с, фрактальная размерность $D = 2$, напряжение $\Delta\sigma = 10$ МПа [18].

На рис. 4 представлено расположение GPS-станций в районе Нортриджского землетрясения и величины перемещений грунта в момент толчка в горизонтальном направлении. Точками выделен прямоугольник размером 20×20 км², на который приходился основной удар землетрясения, звездочкой — эпицентр землетрясения. Одна сторона прямоугольника ориентирована WNW–ESE, другая — NEN–SWS. Черный маленький прямоугольник внутри выделенного соответствует положению Van Norman Complex, где были зарегистрированы сильные движения почвы. Слева внизу на вставке показано распределение действующих при землетрясении сил и направлений подвижек на поверхности.

Рисунок 5 показывает величины вертикальных и горизонтальных амплитуд и скоростей перемещений грунта, измеренных на полигоне Van Norman Complex [17]. Черные прямоугольники на рис. 5 соответствуют усредненным за 1 с величинам направлений смещений и векторов скоростей. Анализируя амплитуды и скорости перемещений грунта, приведенные на рис. 5, можно выделить некоторую квазипериодичность процесса $T \approx 2-3$ с. Видно, что амплитуда горизонтальных перемещений и скоростей больше, чем вертикальных, примерно в 2–3 раза, при этом амплитуда вертикальных колебаний порядка $h \approx 10-20$ см. Максимальная скорость горизонтальных движений грунта достигает 177 см/с, средняя скорость вертикальных — 10–20 см/с. Макси-

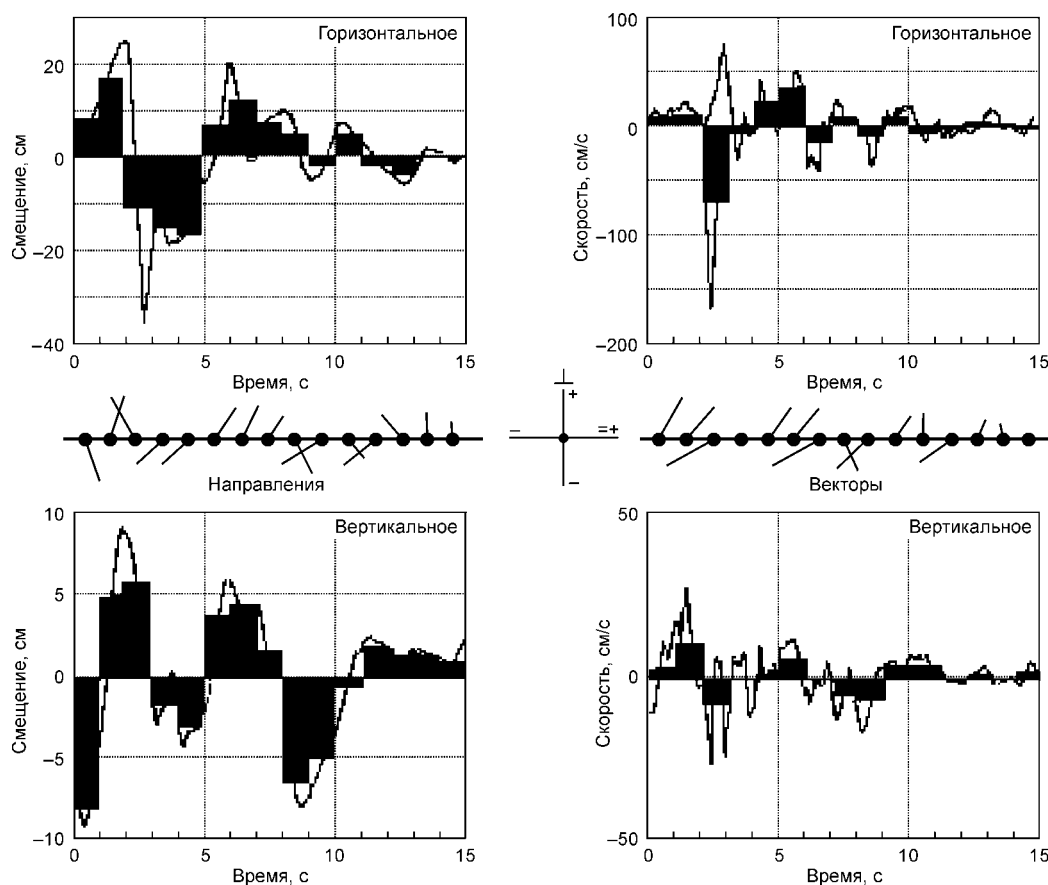


Рис. 5. Временная зависимость продольных компонент скоростей и смещений, записанных на станции Van Norman Complex [17]

мальная амплитуда горизонтальных движений — до 40 см. Условная длина волны вертикальных колебаний $\lambda < 50$ см. Отношение $h/\lambda > 1/5$, что говорит о неустойчивости волн (условие устойчивости: $h/\lambda < 1/2\pi$).

Анализ данных по сильным движениям показывает, что в отмеченном на рис. 4 прямоугольнике максимальных разрушений (размером 20×20 км²) в момент толчка произошло поднятие (см. рис. 2) грунта на высоту ≈ 50 см.

6.2.2. Чуйское землетрясение на Горном Алтае ($M = 7.5$)

Землетрясение произошло на юге Горного Алтая, на территории Кош-Агачского района, 27 сентября 2003 г. в 11 ч 33 мин по Гринвичу. Землетрясение сопровождалось афтершоками, наиболее сильные из них два: первый — 27.09.03 г. в 18 ч 52 мин по Гринвичу с магнитудой $M = 6.4$ и второй — 1.10.03 г. в 1 ч 03 мин 28 с по Гринвичу с магнитудой 7.0. Главный удар афтершока 1 октября произошел в районе пос. Акташ (место расположения сеймостанции), где отмечались повреждения зданий 7-, 8-бальной интенсивности.

Очаг землетрясения в ходе вспарывания земной коры «вышел на поверхность» в виде системы первичных сейсморазрывов. Эта система прослеживается на протя-

жении 20 км в бассейне р. Чаган-Узун на восточном погружении Северо-Чуйского хребта (рис. 6). Первичный характер разрывов обусловлен их морфологией и тем, что эти трещины представляют собой систему параллельных рвов, секущих различные формы рельефа. Эта система вытянута в северо-западном направлении.

Сеймотектонические разрывы представляют собой эшелонированную систему трещин сжатия и расширения, укладываемую в линию северо-западного простирания. Такая структура сеймотектонического разрыва, по мнению авторов [13], характеризует подвижку в очаге как сдвиг в горизонтальной плоскости. Строение зоны сейсморазрывов несколько отличается для различных участков. Так, например, на водоразделе рек Чаган и Елангаш разрыв разветвляется на две основных трещины, которые затем смыкаются, представляясь в виде трещин северо-западной ориентировки. Наблюдается правостороннее смещение на 0.5 м по западной ветви разрывов. По восточной ветви смещение достигает 0.2 м. Блок, заключенный между этими рвами, опущен на 0.2–0.3 м и рассечен многочисленными диагональными трещинами. Авторы отмечают, что в зоне эпицентра Чуйского землетрясения находятся следы предыдущих землетрясений, которые, также как современные, были следствием разрядки одного и того же очага.

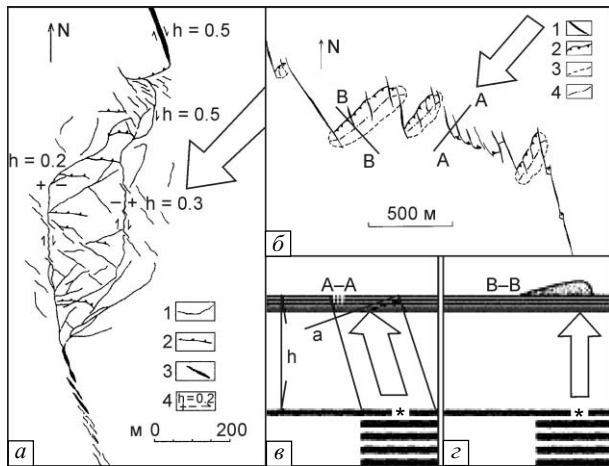


Рис. 6. Слева (а) структура сейсморазрыва на водоразделе рек Чаган и Елангаш: 1 — закрытые трещины и разрывы, 2 — валы вспучивания, 3 — сейсморвы, 4 — амплитуда (м) и направления смещения. Большая стрелка — направление главного удара, параллельные стрелки — направления подвижек почвы. Справа вверху (б) структура сейсморазрыва на водоразделе рек Талдура и Кускуннур: 1 — сейсморвы, 2 — бровки валов вспучивания, 3 — контуры валов вспучивания, 4 — оси валов вспучивания [13]. Справа внизу (в, з) разрезы по А-А и В-В, звездочка — гипоцентр, стрелка — направление главного удара, а — фронт ударной волны

Чуйское землетрясение, по всей видимости, не является уникальным, оно лишь несколько «обновило» следы прошлых, возможно, более сильных землетрясений. Этот факт однозначно демонстрирует, что очаг сильного землетрясения оказывается «привязанным» к определенной геологической структуре.

Сильные движения грунта и его разрушения, произошедшие во время рассмотренных нами выше землетрясений, находят непротиворечивое объяснение в контексте ударно-волновой модели.

6.3. Энергетика сильных движений

Воспользуемся формулой $p = \rho Du$, где $D = 3.5$ км/с, $u = 1$ м/с, $p \approx 10$ МПа (полагая, что сброшенное сдвиговое напряжение примерно равно давлению p). Как отмечалось выше, эти параметры измерены при наблюдении Нортриджского землетрясения в Калифорнии и примерно соответствуют его энергетике ($M = 6.7$). Энергия Чуйского землетрясения ($M = 7.5$) примерно на порядок выше, следовательно, величины D и u выше.

Предположим невероятный случай, что вся энергия землетрясения E пошла, например, на разуплотнение грунта на поверхности $S = 10 \times 10$ км² под действием волны разрежения. В этом случае глубина слоя разуплотнения грунта была бы равна $E/(pS) = 10$ м. Эта оценка показывает масштаб явления. Грубая оценка суммарной длины очень сильных сейсморазрывов Алтайского землетрясения примерно 5 км, хотя мелкие разрывы прослеживаются на расстоянии до 100 км. Если принять глубину разрывов 5 м, а ширину — 20 м, то объем, который подвергся разрушению, равен $5 \cdot 10^5$ м³. На

эту «операцию» было затрачено примерно $5 \cdot 10^{12}$ Дж. Оценим объем грунта, подвергшегося вспучиванию. Оказывается, что грубая оценка величины этого объема равна объему трещин. Возможно, это совпадение, но возможно, это реализация закона сохранения массы в ударной волне. В любом случае, суммарная энергия, потраченная на получение разрывов и вспучиваний, составляет примерно 10^{13} Дж на один из многих участков земной коры в эпицентре землетрясения. Будем, к примеру, считать, что таких участков 10, тогда получается, что на реализацию этого типа сильных движений и разрушений в эпицентре землетрясения «уходит» примерно 1% от суммарной энергии. Пока не учитывалась часть энергии, которая «пошла» на работу грифонов, подвижку среды как квазижидкости и образование оползней.

Оценим, для сравнения, порядок кинетической энергии, израсходованной на образование грифона. Воспользуемся формулой Пуазейля для оценки объемного расхода жидкости V (см³/с), изливающейся через круглое отверстие радиусом R , длиной «трубы» l , вязкостью «жидкости» η и под давлением Δp :

$$V = (\pi R^4 / (8\eta l)) \cdot \Delta p.$$

Подставляя $R = 10^2$ см, $\eta = 10^4$ – 10^5 Па · с, $l = 10^2$ см, $\Delta p = 10^9$ Па, получаем $V = 10^8$ см³/с. Учитывая, что время «работы» грифона порядка нескольких минут, масса (объем ΔV) выброшенного материала может достигать: $m \geq 1000$ т. Линейная скорость переноса массы m порядка $v = 10^4$ см/с, что позволяет сделать грубую оценку кинетической энергии работающего грифона: $E = 10^{10}$ Дж. Величину E можно оценить и по формуле: $E = \Delta p \Delta V$. Подставляя $\Delta p = 10^9$ Па, $\Delta V = 10^9$ см³, получаем ту же величину E . Даже если допустить, что во время Чуйского землетрясения «работало» 100 таких грифонов, их суммарная энергия ($E = 10^{12}$ Дж) оказывается значительно меньше (в 100 раз), чем энергия, которая пошла на образование сейсморазрывов.

Анализируя приведенные данные, вернемся к одной интересной особенности сильных движений. Сильные движения почвы имеют, несомненно, колебательный неустойчивый характер. Можно считать, что среда, в которой происходят подобные затухающие колебательные движения, ведет себя как «квазижидкость», в которой возбудили горизонтальные колебания (рис. 5). Фазы вертикальных и горизонтальных перемещений и скоростей не совпадают. Характерный вертикальный размер пространства, на котором наблюдается колебательный процесс $a \approx 1$ м, величина напряжения в главном толчке землетрясения $\sigma \approx 10$ МПа. Знание этих параметров позволяет оценить величину вязкости «жидкой» среды: $\eta = \sigma a / v \approx 10^7$ Па · с. Оценка вязкости показывает, что вещество верхнего слоя почвы действительно находится в момент землетрясения в квазижидком, пластическом состоянии. Подобные оценки и сам подход к ним следуют из [6].

7. Выводы

Обсуждая идею представить сильные движения грунта в момент землетрясения как выход ударной волны на свободную поверхность, неявно приходится сравнивать ее с общепринятой моделью выхода на поверхность «очага» в виде трещины. Действительно, наблюдатель видит трещины и разрывы в эпицентре разрушений. Заметим, что эпицентр разрушений не часто совпадает с эпицентром землетрясения: подчас «основной удар» приходится под углом к горизонту. Выражение, взятое в кавычки, часто используется в сейсмологической литературе. Это скорее говорит о том, что подспудно авторы понимают, что происходит именно удар. Об этом пишет специалист по сейсмическому разрушению зданий [7]. Об этом свидетельствуют многочисленные факты и наблюдения, такие как, например, отколовшиеся скалы и колонны зданий, которые были рассечены поперек, повернуты на некоторый угол и остались на месте. Об этом говорит и рассеченный пополам пень в момент удара Алтайского землетрясения. Об этом свидетельствуют и сами сейсмологи, пытавшиеся найти под землей следы трещины раскрывшейся и вышедшей наружу с глубины (до 700 км?). Общепринятая модель не находит объяснения также, почему удар распространяется со скоростью S-волны, ведь сейсмическая волна сама по себе не может приводить к таким разрушениям, почему течение вещества такое медленное, хотя лабораторные эксперименты дают скорость распространения трещин значительно выше и т.п.

Эти вопросы легко и просто решаются в рамках ударно-волновой модели. Как будет показано в следующей статье, эта идея находит непротиворечивое объяснение механизму акустического звучания очага и, что особенно интересно, появлению афтершоков, как аналог люминесценции стекла после подсветки ее световой вспышкой.

Самый сложный и еще не нашедший окончательного решения вопрос о том, почему и как образуется ударная волна в твердом теле? Ответ на этот вопрос будет дан в третьей статье. Здесь будет обсуждаться вопрос, о котором авторы обычно умалчивают, но его не может не задать ни один сейсмолог. Суть вопроса проста. Если размер очага достигает 1 000 км, а само землетрясение рассматривается как удар с фронтом порядка секунды, то какие же силы заставляют синхронно на таком огромном размере одновременно «запустить» механизм землетрясения? Ведь легко показать, что акустическим ме-

тодам это непосильно, даже если предположить, что скорость обмена информацией в очаге достигает 10 км/с, то для его синхронизации потребуется не менее 100 с, что ни в коей мере не соответствует наблюдаемым данным. Это очень сложный момент в физике землетрясения, но, похоже, и он может быть решен в рамках предложенной модели.

Литература

1. Гольдин С.В., Кучай О.А. Сеймотектонические деформации в окрестности сильных землетрясений Алтая // Физ. мезомех. – 2008. – Т. 11. – № 1. – С. 5–13.
2. Кузнецов В.В. Ударно-волновая модель очага землетрясения. – Новосибирск, 1990. – 18 с. / Препринт ИГиГ № 8.
3. Кузнецов В.В. Физика земных катастрофических явлений. – Новосибирск: Наука, 1992. – 96 с.
4. Кузнецов В.В. Ударно-волновая модель очага землетрясения. Наука о Земле: Современные проблемы сейсмологии. – М.: Вузовская книга, 2001. – С. 47–62.
5. Кузнецов В.В. Введение в физику горячей Земли. – Петропавловск-Камчатский: КамГУ, 2008. – 367 с.
6. Зельдович Я.Б., Райзер Ю.П. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. – М.: Наука, 1966. – 686 с.
7. Смирнов С.Б. Ударно-волновая концепция сейсмического разрушения сооружений // Энергетическое строительство. – 1992. – № 9. – С. 70–73.
8. Станюкович К.П. Неустановившиеся движения сплошной среды. – М.: Наука, 1971. – 854 с.
9. Заббахин Е.И. Некоторые вопросы газодинамики взрыва. – Снежинск: РФЯЦ-ВНИИТФ, 1997. – 200 с.
10. Аки К., Ричардс П. Количественная сейсмология: Теория и методы. – М.: Мир, 1983. – Т. 1–2. – 880 с.
11. Кузнецов В.В. Модель самоорганизации ансамбля излучающих звук трещин // ПМТФ. – 2001. – Т. 42. – № 4. – С. 184–189.
12. Harp E.L., Jibson R.W. Landslides triggered by the 1994 Northridge, California, Earthquake // Bull. Seism. Soc. Am. B. – 1996. – V. 86. – No. 1. – P. S319–S332.
13. Геодаков А.Р., Овсяченко А.Н., Платонова С.Г. и др. Материалы предварительного изучения сильного землетрясения 2003 г. на Горном Алтае // Электронный научно-информационный журнал «Вестник отделения наук о Земле РАН». – 2003. – № 1. – URL: http://www.scgis.ru/ruaiaian/cp1251/h_dgggms/1-2003/screp-8.pdf.
14. Shen Z., Ge B.X., Jackson D.D. et al. Northridge earthquake rupture models based on the global positioning system measurements // Bull. Seism. Soc. Am. B. – 1996. – V. 86. – No. 1. – P. 39–48.
15. Гвоздев А.А., Кузнецов В.В. Откольные явления в грунтах, наблюдаемые при сейсморазведке // Изв. АН СССР. Физика Земли. – 1967. – № 5. – С. 21–27.
16. Northridge Earthquake, January 17, 1994 // Bull. Seism. Soc. Am. – 1996. – V. 86. – No. 1B. – 361 p.
17. Bardet J.P., Davis C. Engineering observations on ground motions at the Van Norman Complex after the 1994 Northridge Earthquake // Bull. Seism. Soc. Am. – 1996. – V. 86. – No. 1B. – P. 333–349.
18. Anderson J.G., Yu G. Predictability of strong motion from the Northridge, California, Earthquake // Bull. Seism. Soc. Am. – 1996. – V. 86. – No. 1B. – P. 100–114.

Поступила в редакцию 10.03.2009 г.,
после переработки 18.11.2009 г.