

## Нерешенные проблемы физики землетрясения.

### Введение

Землетрясение - одно из катастрофических явлений на Земле. Несмотря на это, пока никто не знает, что оно само собой представляет, а также где, когда и какой силы произойдет следующее землетрясение. Землетрясение возникает при внезапном освобождении энергии, которая долгое время накапливается в результате тектонических процессов в относительно локализованных областях земной коры и верхней мантии. Принято считать, что при этом происходит разрыв (разлом) сплошности горных пород, иногда на многие десятки километров и до нескольких сотен километров вглубь (?).

Область, где возникает процесс разрушения, называется очагом, гипоцентром или гипоцентральной областью. Проекция очага или его области на земную поверхность называется эпицентром или эпицентральной областью. Если очагом является протяженный сброс вдоль вертикальной плоскости, то эпицентром будет длинная полоса; при наклонной плоскости сброса эпицентральной областью будет представлена широкая полоса. Диаметрально противоположное эпицентру место на земном шаре называют антицентром; расстояние от эпицентра до какой-либо точки на земной поверхности - эпицентральной. Для удаленных землетрясений оно измеряется вдоль дуги большого круга, часто в градусах ( $1^\circ = 111,1$  км). Время возникновения землетрясения называют моментом землетрясения или временем в очаге.

Чувствительные сейсмографы ежегодно регистрируют около миллиона землетрясений, одно из них может быть катастрофическим, а около ста - разрушительной силы. Большинство землетрясений происходит на глубине до 70 км, такие землетрясения называются поверхностными. Землетрясения, которые происходят на глубине от 70 до 300 км, называют промежуточными, а глубже 300 км - глубокими. До сих пор не было зарегистрировано ни одного землетрясения глубже 720 км. Свыше 75% энергии, выделенной при землетрясениях принадлежит поверхностным и только 3% - глубоким. Различают сильные и слабые землетрясения: слабые землетрясения возникают повсеместно, но их общая энергия незначительна. Некоторые из них связаны с вулканической деятельностью. К сильным - относят землетрясения с магнитудой более 5,5. Анализ распределения сильных землетрясений по земному шару показывает, что примерно 75% поверхностных, 90% промежуточных и почти все глубокие землетрясения сосредоточены в Тихоокеанском кольце из островных дуг, глубоководных желобов и горных хребтов. Большая часть сильных землетрясений происходит также в Альпийско-Гималайском поясе. В Румынии и на Гиндукуше были зарегистрированы очаги сильных промежуточных землетрясений. Поверхностные землетрясения обычно происходят между океаническими прогибами и ближайшей материковой или островной горной цепью, промежуточные возникают под островными горными цепями, глубокие значительно удалены от океанических впадин.

Распределение землетрясений по энергии, по географическим зонам, а также их связь со строением этих зон, т.е. вся эта совокупность характеристик, объединяются понятием сейсмичность.

### 1. Основы ударно-волновой модели землетрясения.

Ударно-волновая модель землетрясения базируется на трех взаимосвязанных концепциях. Во-первых, в тектонически напряженной геологической среде возникает когерентная структура, в которой происходит взаимодействие между раскрывающимися трещинами и генерируемыми при этом звуковыми импульсами, причем таким образом,

что испускаемый раскрывающейся трещиной звуковой импульс, рассеиваясь на микротрещине, «помогает» ей раскрыться. Микротрещина, раскрываясь, генерирует следующий импульс, который способствует раскрытию другой трещины и т.д. Возникает процесс лавинного образования трещин. В этом процессе звуковые импульсы способны когерентно складываться в области гипоцентра землетрясения, что может привести к возникновению (генерации) ударной волны. Процесс лавинного образования трещин, по-видимому, не единственный способ возникновения когерентной структуры в недрах Земли. На больших глубинах, где вещество Земли находится в состоянии, больше соответствующем жидкости, чем упругому телу, аналогичное взаимодействие может возникать между кавитирующими пузырьками и звуковыми импульсами, возникающими при их «схлопывании». Есть основания считать, что в подобных когерентных средах может возникнуть звуковое излучение, аналогичное, по сути, оптическому сверхизлучению, предсказанному Дикке и реализованному в последствии в лазерах.

Во-вторых, как отмечалось, в результате когерентного взаимодействия - сложения звуковых волн очень большого количества трещин, в акустически активной среде может возникнуть т.н. разрыв термодинамических характеристик, что приводит к образованию ударной волны. В процессе транспортировки ударной волны из области её генерации (гипоцентра землетрясения) к поверхности земли, волна рассеивается (расщепляется) на неоднородностях среды, вызывая при этом излучение объемных сейсмических волн. Кроме этого, ударная волна сжатия, распространяясь по очагу, залечивает (захлопывает) существовавшие в геологическом теле трещины и микроразрывы, после чего эта среда становится способной к последующей генерации афтершоков - т.е. землетрясений, «стимулированных» главным ударом. Продолжая аналогию с оптикой, можно полагать, что афтершоковый режим является акустическим аналогом флуоресценции (флюоресценции), возникающей в оптической среде после прохождения через неё сильного светового импульса.

И, наконец, в-третьих, ударная волна, выходя на поверхность Земли, отражается, образуя волну разрежения. Взаимодействие ударных волн с волнами разрежения приводит к возникновению разрывов поверхности, относительному смещению, вспучиванию и проседанию почвы, образованию т.н. «земляных волн» и пр. явлений, объединяемых общим понятием «сильные движения» при землетрясении. Другой, используемый в сейсмологии термин, соответствующий этим явлениям, носит название макросейсмика.

Ниже будут рассмотрены в основном первая и третья части модели. Вторая часть, по-видимому, наиболее сложная, - формирование ударной волны на квазистационарном акустическом фоне, пока ещё не проработана даже в достаточной степени даже в плане построения феноменологической модели явления.

## **2. Математическая модель акустического сверхизлучения.**

*Эксперименты.* Модель базируется на объяснении известных экспериментальных фактов. Авторами ряда работ неоднократно наблюдалось явление самопроизвольного усиления интенсивности акустической эмиссии, которое затем, так же самопроизвольно, - прекращалось. Единственное объяснение этому явлению с точки зрения самоорганизации когерентной структуры на основе взаимодействия звуковых волн с раскрывающимися трещинами было сделано автором. Им же высказано предположение, что эффект усиления акустической эмиссии имеет некоторую общность с оптическим сверхизлучением. Любопытный факт, досконально исследованный в некоторых работах в Японии и Китае, состоит в том, что эффекты акустического сверхизлучения происходят далеко не во всех типах горных пород. Так, например, изучение режимов акустической эмиссии гранитов двух различных типов, внешне практически не отличающихся один от другого, показало, что при нагружении образцов на прессах, они ведут себя по-разному. На серии образцов гранита из одного месторождения эффект резкого усиления интенсивности акустической эмиссии, названной нами акустическим сверхизлучением, постоянно присутствует,

однако, на серии образцов гранитов другого типа – эффекта нет. Этот результат, неоднократно подтвержденный экспериментально, дает основание полагать, что и в земных недрах должны встречаться геологические тела, реология которых такова, что в них могут развиваться процессы самоорганизации и генерироваться, в конечном счете, землетрясение, а в других телах, на первый взгляд идентичных первым, таких явлений возникнуть не может.

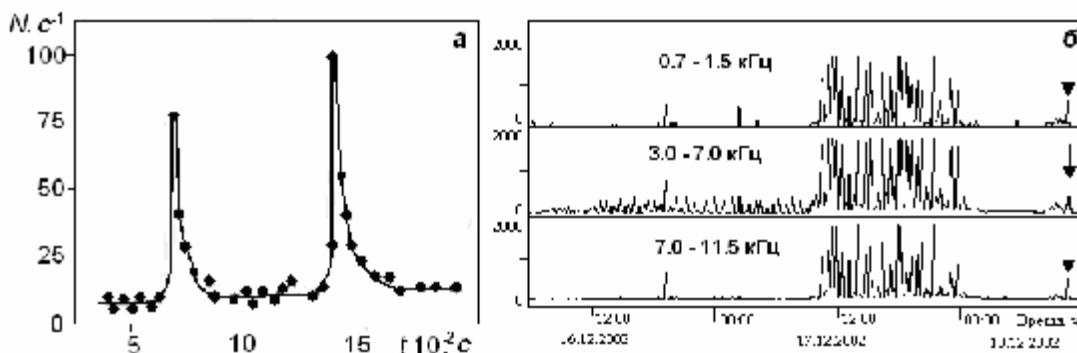


Рис. 1. а) Скорость образования трещин в диабазе при действии на образец постоянного одноосного сжимающего напряжения. б) Геоакустические сигналы, зарегистрированные перед землетрясением 18.12.2002 ( $K = 12.1$ ) на Камчатке (ИКИР). Время события отмечено стрелкой.

Результаты лабораторных экспериментов и натуральных наблюдений (рис.1) показывают, что на фоне постоянного акустического фона ( $I = dN/dt \sim N$ ), излучаемого нагруженным образцом горной породы, возникает взрывоподобное нарастание (типа цепной реакции) количества раскрывающихся трещин  $N$  (акустических импульсов) в единицу времени  $t$ :  $dN/dt \sim N^2$ . По аналогии с оптикой это явление можно считать акустическим сверхизлучением. Ясного понимания этого явления нет.

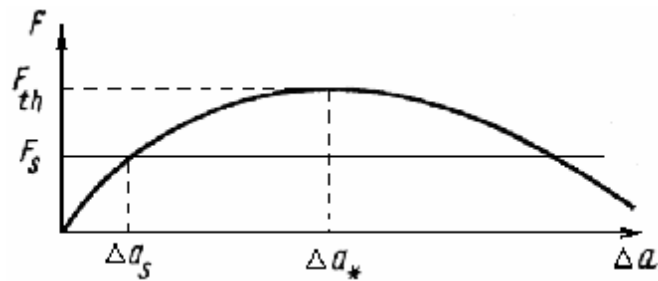
*Теория разрушения.* Согласно механистическому подходу к описанию теории твердого тела, потенциальная энергия твердого тела определяется через деформацию. Свойства тела определяются модулями Юнга и Пуассона, а разрушение происходит, когда напряжение (растяжение или сжатие) достигает своего критического значения - т.е. образуется трещина. Классическим критерием разрушения является критерий Гриффитца, отвечающий за развитие трещины. Акустическая эмиссия является лишь сопутствующим фактором раскрытия трещины. Именно такой подход механического разрушения применяется в теории землетрясения, т.е. образования магистральной теории трещины.

Однако существует и другой подход к теории разрушения: кинетический (подход С.Н. Журкова). Сущность его заключается в необходимости учета ангармонизма кристаллической решетки. Согласно кинетической теории прочности долговечность материала  $\tau$ , находящегося под нагрузкой  $\sigma$ , равна:  $\tau = \tau_0 \exp [(U_0 - \gamma\sigma)/kT]$ . Здесь  $k$  – константа Больцмана,  $T$ - температура,  $U_0$  – энергия разрыва межатомных связей, время  $\tau_0 = 10^{-13}$  с – совпадает с фундаментальной характеристикой твердого тела – периодом тепловых колебаний атомов в решетке,  $\gamma$  – коэффициент, пропорциональный перенапряжению на межатомных связях. Отсюда следует, что напряжение  $\sigma$ , разрывающее образец за время  $\tau$ :

$$\sigma = 1/\gamma (U_0 - kT \ln \tau/\tau_0) = \sigma_{\max} - (kT/\gamma) \ln \tau/\tau_0.$$

Рассмотрим роль ангармонизма в кинетической теории прочности. Представим силу межатомного взаимодействия  $F(\Delta)$  (см. рис.) в виде разложения в ряд Тейлора по величине  $\Delta a$  смещения атома от равновесного расстояния  $r$ , сохраняя два члена:  $F(\Delta a) = f$

$\Delta a - g(\Delta a)^2$ , где  $f$  – константа упругости связи, а  $g$  – коэффициент ангармоничности, учитывающий нелинейность силы взаимодействия.



Из рис. видно, что максимум силы  $F_{th}$ , достигаемый при удлинении  $\Delta a$ , определяет теоретическую прочность связи. Если к связи приложена сила  $F_s$ , то при  $F_s < F_{th}$  возможен термофлуктуационный разрыв связи. Он обусловлен ангармоничностью тепловых колебаний атомов, что порождает дополнительную флуктуирующую силу  $F_g = F_{th} - F_s$ :

$$F_s = F_{th} - 2(gkT/f) \ln \tau/\tau_0.$$

Произведя замену силы  $F_s$  на напряжение с помощью соотношения  $F_s/a^2 = x\sigma$ , где  $\sigma$  – среднее напряжение в матрице,  $x$  – коэффициент перенапряжения связи, получим:

$$\sigma = \sigma_{\max} - (2gkT/fa^2x) \ln \tau/\tau_0,$$

Что в точности совпадает с предыдущей оценкой при  $\gamma = fa^2x/2g$ .

Механизм термофлуктуационного разрыва связи обусловлен ангармоничностью тепловых колебаний и определяется отношением  $g/f$ . При  $g \ll 0$  влияние температуры и времени на прочность исчезает. В идеальных телах, подчиняющихся закону Гука вплоть до напряжений теоретической прочности, температурно-временной эффект прочности должен отсутствовать. Учет ангармонизма кристаллической решетки приводит к таким эффектам как тепловое расширение твердого тела и смещение частот фононных мод за счет упругих деформаций твердого тела.

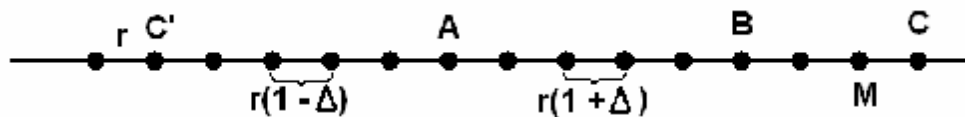
В приближении Грюнайзена изменения частот фононов одинаковы для всех мод и определяются деформацией  $\epsilon = \Delta V/V$  объема кристаллической ячейки:

$$\Delta\omega/\omega = G\epsilon$$

Колебания кристаллической решетки – фононы в силу ангармонизма сталкиваются между собой. Эту ситуацию можно рассматривать как квантовый, или фононный «газ». За счет сжатия твердого тела концентрация фононного газа увеличивается, что приводит к его «конденсации» и образованию «дилатона» или «предтрещины». Размеры дилатона пропорциональны длине свободного пробега фононов. Особенность дилатона состоит в том, что он способен как черпать энергию извне, например из звуковых волн, так и отдавать её в виде звука. При этом длина звуковой волны должна быть пропорциональна длине свободного пробега фононов.

*Физическая модель.* Для объяснения физики разрушения воспользуемся понятием дилатон. Дилатон – это область дефектов кристаллической решетки, в которой

происходит интенсивная генерация фононов. Когда количество фононов достигает критического уровня, дилатон «схлопывается» и превращается в микротрещину.



Дилатон  $\Delta$  - в линейной цепочке атомов

Фононная модель разрушения основана на исследовании устойчивости локальных отрицательных флуктуаций плотности – дилатонов мощности  $\Delta = (r' - r)/r$ , где  $r' > r$  – расстояние между ближайшими атомами в области АВ. При «схлопывании» дилатонов происходит раскрытие трещины. Этот процесс сопровождается излучением акустической волны, причем на её формирование необходимо некоторое пространство, соизмеримое с длиной акустической волны  $l$ . Предположим, что в некотором объеме среды существует  $n$  ( $n = 5$ ) дилатонов (рис. 2), а схлопывание происходит только в одном. Излученная акустическая волна взаимодействует путем обмена энергией с фононами решетки с другими дилатонами, передает им энергию и способствует их схлопыванию. Если характерный размер выделенного объема среды меньше длины волны  $l$ , то в нем взаимодействия с собственной акустической волной не происходит. Рассмотрим  $N$  объемов, в каждом из которых находится  $n$  дилатонов. Если взаимодействия между дилатонами не происходит, то в единицу времени излучается  $N$  импульсов. Если происходит такое взаимодействие, то акустические волны возникающие при схлопывании  $N$  дилатонов «запускают»  $(N - 1)$  дилатон. В результате акустический фон возрастает с  $N$  импульсов в единицу времени до:  $N + N(N - 1) = N^2$ , что и требовалось доказать. По физике, это явление близко к сверхизлучению Дикке (коллективное спонтанное испускание электромагнитного излучения), которое было предложено им задолго до изобретения лазеров. Дикке показал, что система, состоящая из  $N$  инвертированных двухуровневых атомов, может спонтанно перейти в основное состояние за время, обратно пропорциональное числу атомов, что приводит к усилению потока излучения  $\sim N^2$ .

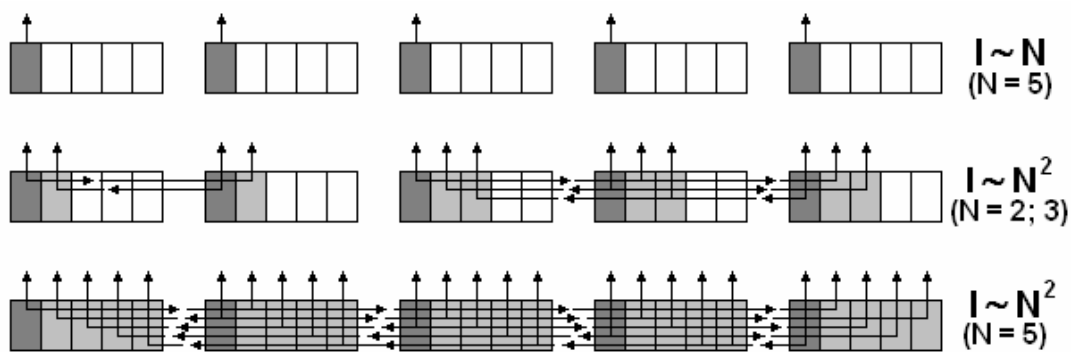


Рис. 2. Излучение раскрывающихся трещин (схлопывающихся дилатонов): верхняя панель – излучение акустических волн без связи между дилатонами. Средняя и нижняя панели – акустическая связь между двумя, тремя и пятью дилатонами.

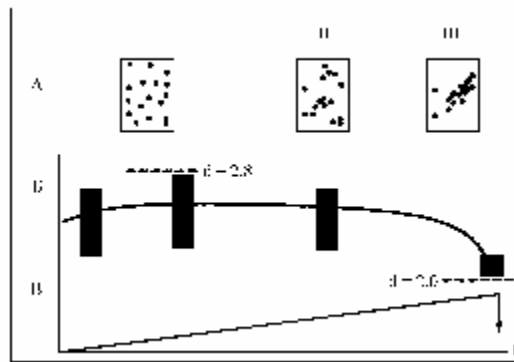


Рис. 3. А - Распределение гипоцентров акустической эмиссии по мере увеличения сжатия образцов гранита и возникновения фрактальных структур. Б - изменение фрактальной размерности  $d$ . В – нагрузка образца до его разрушения (Lei et al., 1992).

При раскрытии трещины излучается звуковой импульс акустической эмиссии (АЭ). Этот импульс “несет” определенную долю энергии и, взаимодействуя с дилатоном (микротрещиной), передает ему энергию, “помогая” раскрыться. Трещина начинает расти и излучает при этом “свой” импульс, который взаимодействует со следующей трещиной и т.д. При этом может наблюдаться эффект лавинного образования трещин, звуковые импульсы которых когерентно складываются, обеспечивая при этом явление усиления звуковой волны (Ishido, Nishizawa, 1984) и возникновение фрактальных структур (рис. 3).

### 3. Формирование ударной волны.

Предположим, что в некотором объеме напряженной горной породы образовалась структура параллельных друг другу трещин и микротрещин. Раскрытие одной из микротрещин, сопровождается излучением S-волны. Эта волна, рассеиваясь на трещине, переизлучает P-волну, распространяющуюся в направлении ориентирования трещин, и S-волну, распространяющуюся поперек луча P-волны. Рассеиваясь на микротрещине, S-волна приведет к её раскрытию, и каскад явлений повторится. В результате, в этом объеме образуется некоторое количество P-волн, распространяющихся вдоль направления трещин со скоростью  $V_P$  и S-волн, распространяющихся поперек этого направления со скоростью  $V_S$ . Предположим, что расстояние между соседними трещинами (по лучу S-волн) равно  $x$ . Тогда, если выполняется условие:  $t_1 + t_2 = t_0 + t_3$ , где  $t_1 = y_1/V_P$  – время распространения P-волны от раскрывшейся трещины 1;  $t_2 = x_1/V_S$  – время распространения S-волны от трещины 1 до микротрещины 2;  $t_0$  – время раскрытия трещины;  $t_3 = y_2/V_P$  – время распространения P-волны от трещины 2: P-волны пересекаются в одной точке. Полагая:  $y_2 - y_1 = \Delta y$ , при выполнении условия:  $\Delta y/V_P = -t_0 + x/V_S$ . Оценим величину  $x$ , для чего примем:  $\Delta y = x$ ,  $V_P = 5$  км/с,  $V_S = 3$  км/с,  $t_0 = 10^{-7}$  с, тогда  $x \approx 700$  мкм. (Что вполне реально). Таким образом, эта оценка показывает, что пересечение P-волн от раскрывающихся микротрещин, расположенных на расстоянии друг от друга порядка 700 мкм, вполне возможно. Предположим, что характерный поперечный размер активной среды  $X = xN$  ( $x \sim 1/N$ ), тогда характерное время:  $t \sim 1/N$ . В такой среде возможно явление акустического сверхизлучения.

Известно, что ударные волны могут возникать не только при разрывных начальных граничных условиях, но и в областях, где движение среды в начале не сопровождается никакими разрывами. Такие случаи «самопроизвольного» зарождения ударных волн всегда связаны с явлением *пересечения одноименных характеристик*. Простейший случай явления пересечения, это образование т.н. центрированной волны, когда несколько простых волн, при их одновременном распространении, пересекаются в одной точке (O) – вершине волны (рис. 4-а). При этом возникает волна сжатия, в вершине которой

плотность вещества среды и давление в волне возрастают. Такая волна может стать ударной.

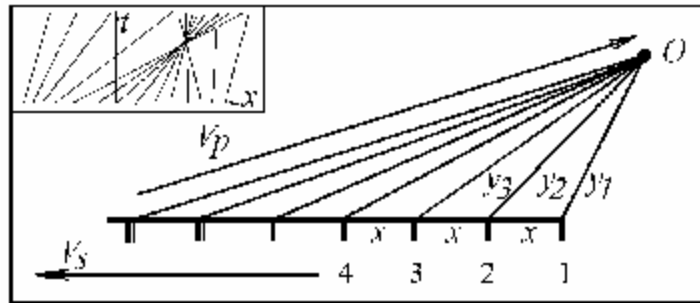


Рис. 4-а. Когерентное сложение акустических импульсов в точке O. Метод пересекающихся характеристик.

Имеются ли данные о взаимодействии ударных волн и волн разрежения в грунте? Известны эксперименты, в которых наблюдалось явление разрушения (откола) грунта при отражении ударной волны от его поверхности и образование волны разрежения. В этих экспериментах ударная волна создавалась при подрыве заряда взрывчатого вещества в скважине. Если волна разрежения по тем или иным причинам не возникала, не наблюдались и отколы. При заглублении сейсмографа на два-три метра в грунт, волна разрежения на нем уже не регистрировалась, хотя при этом на поверхности наблюдались и эта волна и, связанные с её возникновением, - отколы. Этот результат подтверждает факт разрушений грунта только при появлении волны разрежения (разгрузки), а так же то, что эта волна, распространяясь по среде, быстро диссипирует.

Ударная волна обычно описывается приближенными уравнениями, учитывающими нелинейность, дисперсию и диссипативные свойства среды. Широкий класс таких явлений представлен т.н. уравнением Бюргерса-Кортевега-де Фриза:

$$j \frac{\partial}{\partial t} + v_0 \left( j \frac{\partial}{\partial x} \right) = -e j \left( j \frac{\partial}{\partial x} \right) + h \left( j^2 \frac{\partial}{\partial x^2} \right) - b \left( j^3 \frac{\partial}{\partial x^3} \right),$$

где  $e$ ,  $h$ ,  $b$  - константы, отражающие влияние, соответственно, нелинейности, диссипации и дисперсии.

Известно явление укручения фронта УВ за счет того, что материальные частицы, находящиеся в пучности ударной волны (где плотность среды выше), движутся быстрее, чем соседние частицы вне пучности. Волновой профиль укручается настолько, что может привести к опрокидыванию УВ (рис. 4-б).

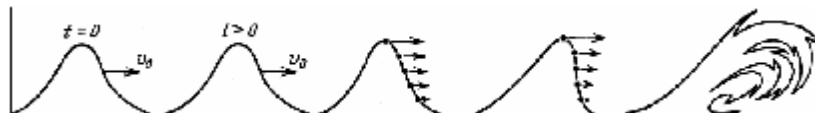


Рис.4-б. Модель укручения и «опрокидывания» солитона (Заславский, Сагдеев, 1988).

#### 4. Общие закономерности при выходе ударной волны на поверхность Земли

Основные соотношения для ударных волн (УВ):

Закон сохранения массы:

$$\rho_0 D = \rho_n (D - u_n) \text{ или } u_n + \varepsilon D = 0,$$

где  $\rho_n$  - плотность вещества на фронте волны,  $\rho_0$  - невозмущенная плотность,  $D$  - скорость распространения фронта волны,  $u_n$  - скорость течения среды за фронтом ударной волны.

Закон сохранения импульса:

$$-\sigma_n = p_n - p_0 = \rho_0 u_n D,$$

где  $p_o$  – начальное давление среды (до прохождения ударной волны),  $p_n$  – давление на фронте ударной волны.

Уравнение сохранения энергии имеет классический вид:

$$E_n - E_o = \frac{1}{2}(p_n - p_o) (v_o - v_n),$$

где  $E_o$  и  $E_n$  – внутренняя энергия до фронта ударной волны и за её фронтом,  $v_o$  и  $v_n$ , соответственно, – удельные объемы ( $v = 1/\rho$ ).

В неподвижной среде ( $u_o = 0$ ) соотношения скоростей на фронте ударной волны представляются в виде:

$$\begin{aligned} D &= [\rho/\rho_o (p - p_o) / (\rho - \rho_o)]^{1/2}, \\ u &= [1/\rho \rho_o (p - p_o) (\rho - \rho_o)]^{1/2}. \end{aligned} \quad (1)$$

Уравнения (1) справедливы для сухого грунта. Если грунт водонасыщенный, то  $D$  и  $u$ , после подстановки уравнения состояния водонасыщенного грунта в виде:

$$\rho = \rho_o \{ \alpha_1 (p/p_o)^{-1/k_1} + \alpha_2 [k_2(p - p_o)/\rho_2 c^2_2 + 1]^{-1/k_2} + \alpha_3 [k_3(p - p_o)/\rho_3 c^2_3 + 1]^{-1/k_3} \}^{-1}$$

где  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$  – содержание компонент (по объему): воздуха, воды и твердого грунта, соответственно, ( $\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 = 0$ ),  $k_1, k_2, k_3$  – показатели изэнтропы соответствующих компонент; будут определяться следующим образом:

$$D^2 = (p - p_o)/\rho_o \{ 1 - \alpha_1 (p/p_o)^{-1/k_1} - \alpha_2 [k_2(p - p_o)/\rho_2 c^2_2 + 1]^{-1/k_2} - \alpha_3 [k_3(p - p_o)/\rho_3 c^2_3 + 1]^{-1/k_3} \}^{-1};$$

$$u^2 = (p - p_o)/\rho_o \{ 1 - \alpha_1 (p/p_o)^{-1/k_1} - \alpha_2 [k_2(p - p_o)/\rho_2 c^2_2 + 1]^{-1/k_2} - \alpha_3 [k_3(p - p_o)/\rho_3 c^2_3 + 1]^{-1/k_3} \}.$$

Пористость грунта, иначе, суммарная концентрация воздуха и воды ( $\alpha_1 + \alpha_2$ ) являются определяющими при оценке величин скоростей  $D$  и  $u$ . Увеличение концентрации заземленного воздуха снижает величину скорости ударной волны  $D$  и приводит к увеличению массовой скорости течения грунта  $u$ .

Экспериментально неоднократно отмечалось, что при прохождении УВ через среду происходит «размыв» фронта (толщиной  $l$ ). Принято считать, что этот эффект связан с переходом среды в квазизидкое состояние, характеризующееся наличием у среды динамической вязкости. Например, в пресованном порошке соли NaCl, при прохождении ударной волны ( $u = 10^3$  м/с,  $l = 10^{-3}$  м,  $\tau = 10^{-6}$  с) размыв фронта соответствовал вязкости  $\eta = 10^4 - 10^5$  Пз. Вязкость сплошного материала каменной соли имеет порядок  $10^{14} - 10^{15}$  Пз, что на десять порядков меньше вязкости, наблюдаемой в ударных экспериментах. Можно оценить величину вязкости по параметрам колебательного неустойчивого характера сильных движений почвы при Нортриджском землетрясении 1994 г. При этом вертикальный размер пространства, на котором наблюдался колебательный процесс в эпицентре землетрясения:  $a \approx 1$  м, величина напряжения в главном толчке землетрясения:  $\sigma \approx 100$  бар, а скорость колебаний частиц грунта  $v$  достигала 1 м/с. Знание этих параметров позволяет оценить величину вязкости «жидкой» среды:  $\eta = \sigma a/v \approx 10^5 - 10^6$  Пз. Полученные оценки вязкости показывает, что вещество грунта в момент землетрясения в его эпицентре находится в «квазизидком» состоянии. (Речь идет о том, что в такой среде в момент её нагружения во время удара, величина деформации в зависимости «напряжение-деформация», находится в нелинейной области). Это обстоятельство позволяет воспользоваться формулами Эйлера, Навье-Стокса и Пуазейля для течения жидкости, соответственно:

$$\begin{aligned} dv/dt &= F - 1/\rho \text{ grad } p, \\ dv/dt &= F - 1/\rho \text{ grad } p + \chi dv, \\ v &= \int_S u dS, \end{aligned}$$

где  $F$  – внешняя сила,  $\chi = \eta/\rho$  – кинематическая вязкость.



*Скорости волн.* Воспользуемся подходом, развитым для оценки скоростей перемещений частиц упругой среды под действием силы, приложенной в очаге землетрясения. Этот подход был предложен Кейлис-Бороком и развит Матуямой. Скорость перемещения в горизонтальной плоскости:

$$u = 1/4\pi r [\partial^2/\partial x^2 (\varphi - \psi) + \nabla^2 \psi],$$

где  $\varphi$  и  $\psi$  сферические волны вида:  $\varphi = (1/r) F [t - (r/V_P)]$ ;  $\psi = (1/r) F [t - (r/V_S)]$ . Эти волны распространяются на расстояние  $r$  со скоростями  $V_P$  и  $V_S$ , соответственно. Функция  $F(t)$  связана с силой  $f(t)$ :  $f(t) = d^2 F(t)/dt^2$ . Развитый Матуямой подход имеет значение для нашей ударно-волновой модели в том плане, что речь идет не прямо о Р- и S-волнах, а о волнах, имеющих скорости, близкие к скоростям распространения Р- и S-волн. Ударная волна, в твердом теле распространяется в зависимости от её интенсивности со скоростью:  $D$ , причем:  $V_S \leq D \leq V_P$ .

По-видимому, некоторые авторы допускают ошибку, утверждая, что воздействие на грунт именно S-волны - приводит к разрушениям в гипоцентре землетрясения. Согласно представлений Матуямы, правильнее говорить о волнах, двигающихся со скоростями, близкими (или равными) скоростям Р- и S-волн. Как известно из физики ударных волн, сильная ударная волна распространяется со скоростью  $D$ , близкой к скорости Р- волны. Соответственно, чем слабее ударная волна, тем меньше её скорость распространения, и, в пределе, она может быть равной скорости распространения S-волны:  $D \rightarrow V_S$ . (Утверждение, что ударная волна сжатия, по мере распространения, вырождается в Р-волну, – не совсем верно. Правильнее считать, что ударная волна, распространяясь в твердой среде, рассеивается на её неоднородностях и расщепляется на Р- и S-волны).

## 5. Особенности распространения ударных волн в грунтах

Приведем некоторые данные по особенностям распространения ударных (взрывных) волн в грунтах. При камуфлетном (подземном) взрыве наблюдается так называемое геометрическое подобие (скейлинг) по корню кубическому из энергии взрыва  $E$ . Данные по многим параметрам движения среды при взрыве удается свести к универсальным зависимостям, если использовать в качестве линейного масштаба комбинацию  $(E/\rho c^2)^{1/3}$ . Большое количество проведенных экспериментов по изучению давления в ударной волне от расстояния и количества взрывчатого вещества подтверждает зависимость:

$$p = p_o (C^{1/3}/R),$$

где  $p_o$  – начальное давление в атм.,  $R$  – расстояние от взрыва до точки измерения в метрах,  $C$  – вес взрывчатого вещества в кг.

Для широкого набора различных грунтов, как водонасыщенных, так и сухих, используется следующая формула:

$$p = K(C^{1/3}/R)^\mu,$$

здесь  $K$  и  $\mu$ - коэффициенты, величины которых приведены в Таблице 1.

Для того чтобы перейти от веса взрывчатого вещества к энергии и применить формулу в нашей ситуации, воспользуемся соотношением между энергией и весом тротила. Известно, что удельная кинетическая энергия тротила равна 4 кДж/г. Положим, что сейсмическая энергия и энергии взрывчатых веществ эквивалентны. (Это не совсем точно, т.к. КПД источника не близок к 100%) Энергия землетрясения с магнитудой  $M = 7.5$  равна  $10^{23}$  эрг, ( $10^{13}$  кДж), что эквивалентно  $10^{12}$  г (одна мегатонна) тротила, тогда параметр  $C^{1/3} \approx 10^3 \text{ кг}^{-1/3}$ . Давление  $p$  в очаге (на фронте ударной волны) Чуйского землетрясения ( $M = 7.5$ ), по-видимому, может достигать 1 кбар. Для сравнения, давление на фронте УВ (в нашей интерпретации) при Нортриджском землетрясении  $M = 6.7$ ,  $E = 10^{22}$  эрг, могло достигать 100 бар. Давление на фронте ударной волны (волны сжатия) на расстоянии 650 км от очага, в Новосибирске, если принять самые высокие значения коэффициента  $K$  из

Таблицы 1, оказывается порядка 1 бара. Очевидно, что эта оценка, по-видимому, наиболее высокая из всех возможных. Если, к примеру, параметр  $K$  будет меньше, а  $\mu$  - больше, то давление  $p$  будет меньше чем 1 бар (1 атмосфера) на несколько порядков.

Величина смещения грунта во время главного толчка Чуйского землетрясения на Новосибирской сейсмостанции, составляет примерно 50 микрон. Зная величину смещения, можно попытаться оценить деформацию  $\epsilon$ , производимую проходящей волной:  $\epsilon \approx (1 - 5)10^{-3}$  из следующих ниже соображений. Величина напряжения  $\sigma$  водонасыщенного грунта, соответствующая  $\epsilon = 0.1$ , составляет примерно 500 бар и эта величина возрастает линейно с ростом  $\epsilon$ :  $\sigma \sim \epsilon$ . Эта закономерность дает основание оценить  $\sigma = p \approx 5$  бар при  $\epsilon \approx 10^{-3}$ . Скорость звука в таком грунте  $\approx 400$  м/с. По-видимому, реальная величина  $\sigma$  меньше, однако эти оценки показывают (при различных способах их получения) один порядок величин напряжения в волне. Скорость распространения волны, амплитуда которой составляет 5 бар от очага Алтайского землетрясения (в приближении, что волна плоская) до сейсмостанции Новосибирск, расположенной примерно в 650 км от очага равна 3.6 км/с. Это намного больше, чем местная (в грунте) скорость звука. Возникает вопрос, что это за волна (ударная или нет) приходит к сейсмостанции, расположенной так далеко (650 км) от очага землетрясения? Волна такой амплитуды ударной быть не должна. Однако, если производная  $d^2\sigma/d\epsilon^2 > 0$ , волну можно считать ударной вне зависимости от величины  $\sigma$ . Показано, что если условие  $d^2\sigma/d\epsilon^2 > 0$  не выполняется, - волну можно считать плоской волной сжатия, которая распространяется в упруго-пластической среде.

Таблица 1

Характеристика грунта	$K$	$\mu$
Водонасыщенный песок с $\alpha = 0$	600	1.05
Водонасыщенный песок с $\alpha = 5 \cdot 10^{-4}$	450	1.5
Водонасыщенный песок с $\alpha = 10^{-2}$	250	2.0
Водонасыщенный песок с $\alpha = 4 \cdot 10^{-2}$	45	2.5
Неводонасыщенный песок с $\rho = 1.6 - 1.7$ г/см <sup>3</sup>	15	2.8
Неводонасыщенный песок с $\rho = 1.5 - 1.6$ г/см <sup>3</sup>	7.5	3.0
Неводонасыщенный песок с $\rho = 1.4 - 1.5$ г/см <sup>3</sup>	2.5	3.5

## 6. Явления на поверхности Земли, связанные с выходом на неё ударной волны

Акцентируем внимание на процессах, сопровождающих выход не слишком сильной ударной волны на поверхность (см. рис. 3). Выход наклонной к линии горизонта ударной волны изображен на рис. 3-1. Здесь фронт ударной волны, шириной  $a$ ,двигающийся со скоростью  $c_0$ , подходит под углом  $\alpha$  к земной поверхности (с плотностью  $\rho$ ). Распространение ударной волны сопровождается сравнительно медленным движением сплошной среды с массовой скоростью  $u$ . Ударная волна отражается на участке АВ 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 приводят к разуплотнению, расширению грунта и подъему его относительно начального уровня на высоту порядка метра, как это, например, наблюдалось при Чуйском и Нурт ridжском землетрясениях.

На участке АВ может возникнуть система сил, направленных друг навстречу другу соответственно тому, как направлены горизонтальные компоненты массовых скоростей:  $u - u_0$  (рис. 3-4), либо  $u' - u_0'$  (рис. 3-6).

На рис. 3-2 изображено распределение плотности до (слева) и после выхода нормально падающей ударной волны (справа). Видно, что после выхода ударной волны и отражения её от поверхности, вещество с плотностью  $\rho_1$  (меньшей  $\rho_0$ ) находится выше начального уровня. Аналогичная картина представлена на рис. 3-3, где изображены скорости в нормально падающей ударной волне со скоростью  $c_0$  и массовые скорости  $u$  и  $u' \gg 2u$  до выхода ударной волны на поверхность (слева) и после её выхода на поверхность. На рисунках 3-5 и 3-7 изображены разломные диаграммы, соответствующие ситуациям, изображенным на рисунках 3-4 и 3-6. Темные секторы диаграмм показывают области сжатия, светлые – растяжения.

По данным сейсмологической сети ИОЦ ГС РАН определен механизм основного толчка Чуйского землетрясения, который практически совпадает с диаграммой, изображенной на рис. 3-5, что может говорить в пользу предлагаемой модели.

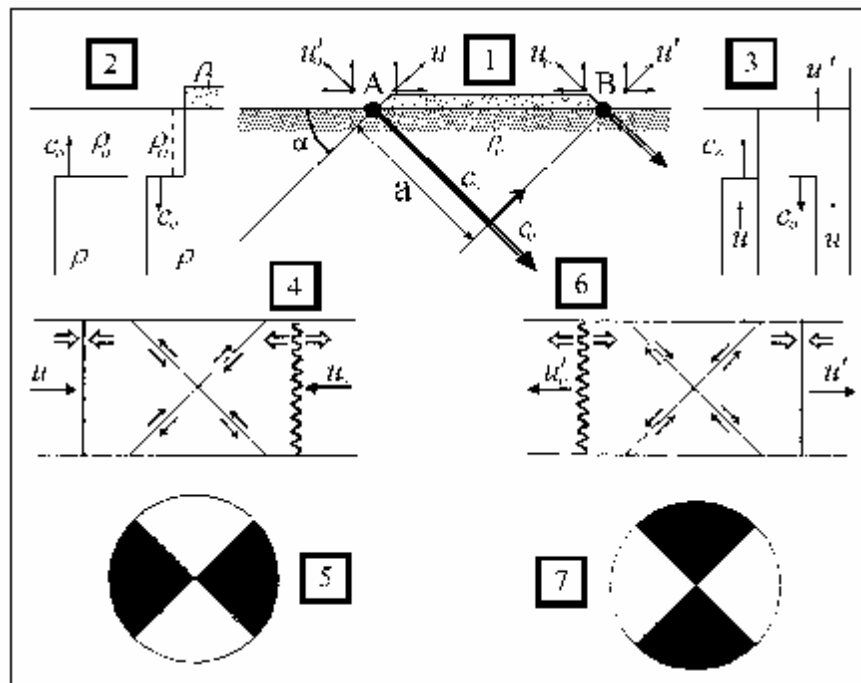


Рис. 3. Выход ударной волны (шириной  $a$ ) на поверхность Земли под углом  $\alpha$  к линии горизонта. Пояснения в тексте.

### 7. Угол выхода ударной волны на поверхность

Гипоцентр Чуйского землетрясения по уточненным данным расположен на глубине 18 км. «Ось овала зоны активности» афтершоков практически совпадает с разломом Кускуннур. Область первичных разрушений отстоит от этого разлома примерно на 5-7 км. Это может означать, что главный удар землетрясения (его очаг) выходит на поверхность под углом порядка 65 градусов. Несовпадение области эпицентра землетрясения с эпицентром разрушений является свойством многих землетрясений. Например, в уже упоминаемом выше Нортриджском землетрясении угол, под которым происходил главный удар, составлял примерно 40 градусов. Величину этого угла можно оценить таким же способом, а можно по анализу пространственной структуры расположения афтершоков. Обе оценки совпадают.

Рассмотрим, к каким выводам можно прийти, если известна величина этого угла. Как следует из ударно-волновой модели, в сейсмически активной, напряженной геологической среде кроме литостатической нагрузки должна быть еще одна (или несколько) других напряжений, которые, взаимодействуя со средой, приводят её в некоторое, названное нами, - когерентное состояние. Если среда находится в таком состоянии, то в ней может развиваться процесс лавинного образования трещин и генерации при этом акустических волн, которые, взаимодействуя с трещинами, помогают им раскрыться в едином процессе. В результате, в среде может возникнуть разрыв характеристик среды (например, плотности) и образоваться ударная волна. Угол выхода ударной волны на поверхность не случаен. Он определяется рядом обстоятельств, связанных с характером нагрузок и реологией среды: Во-первых, это литостатическая нагрузка, величина которой пропорциональна глубине. Она приводит к возникновению трещин, углы раскрытия которых относительно вектора напряжений, направлены, согласно закона Кулона-Мора (см. рис. 4-а). В среде, напряженной только литостатическим давлением, углы раскрытия трещин сильно различаются по глубине. В такой ситуации когерентной структуры возникнуть не может. К литостатической нагрузке «добавим» напряжение, возникающее в результате приложения силы, действующей в горизонтальном направлении. Если распределение нагрузки окажется таким, что в результате сложения литостатической и боковой, углы раскрытия трещин окажутся одинаковыми и направленными примерно под углом в 45 градусов, то и ударная волна подойдет к поверхности Земли снизу под этим углом к горизонту (рис. 4-b).

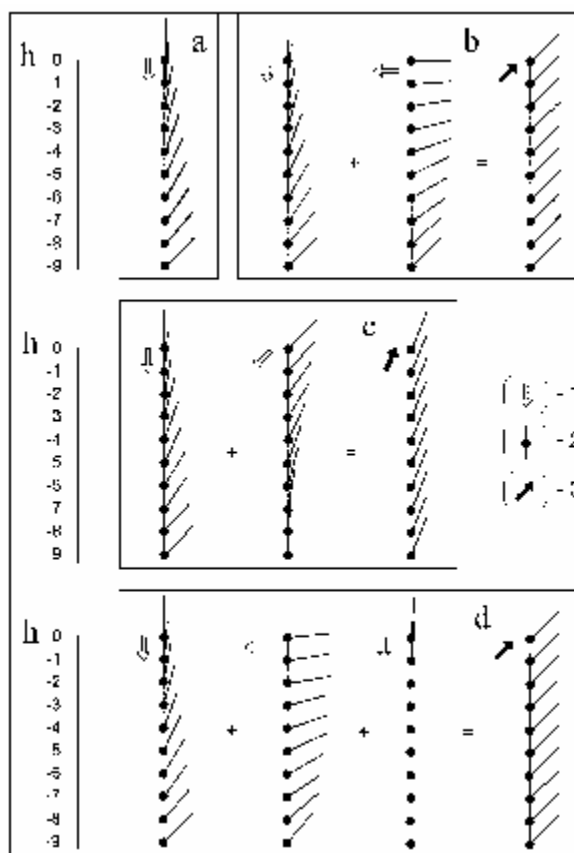


Рис. 4. Изменение угла образования трещин при вариации характера нагрузки на среду: а - вертикальная, литостатическая; б - литостатическая + боковая; с - литостатическая + “под углом”; d - то же, что “b” + дополнительная, внешняя. Дальний порядок и пространственная когерентность возникают в случаях: “b, c” и “d”. 1 - направление

действия нагрузки; 2 - положение трещины и ее направление; 3 - направление пространственной когерентности.

Представим себе, что в формировании угла выхода ударной волны, иначе, выхода основного удара - «угла когерентности» принимает участие напряжение, действующее под углом к поверхности Земли. Это напряжение может быть, связано, например, с влиянием разломов (рис. 4-с). В этом случае угол выхода ударной волны оказывается больше чем  $45^\circ$  и приближается к углу  $90^\circ$ . На рис. 4-d изображена ситуация, в которой когерентность среды достигается путем небольшой добавки, обязанной, например, действию атмосферных возмущений, или влиянию лунных приливов и пр. Эту ситуацию принято считать триггерным эффектом.

Таким образом, угол когерентности, это угол относительно поверхности Земли, определяющий направление раскрытия трещин и распространения волн, которые участвуют в раскрытии этих трещин.

## **8. Взаимодействие волн, возникающих при выходе ударной волны на поверхность**

Рассмотрим волновую картину процессов формирования в недрах Земли УВ, движение ее к дневной поверхности, возникновение ВР и взаимодействие волн. Воспользуемся приемом из практики изучения УВ. Изобразим рассматриваемые процессы на  $x$ - $t$ -диаграмме, где  $x$  - координата, а  $t$  - время. Обозначим:  $x_0$ ,  $t_0$  - координату (глубину гипоцентра) и время формирования ударной волны в геологическом теле (см. рис. 5). Предположим, что в земной коре, на глубине между  $x = 0$  и  $x = x_0$ , и, далее, до  $x_1$ , находится геологическое «тело», обладающее определенными уникальными акустическими свойствами: во-первых, это должно быть прочное тело, способное к накоплению упругой энергии и активному образованию трещин; во-вторых, оно должно быть изотропным. В таком теле не должно быть неоднородностей, у которых заметно различаются между собой плотность и скорость звука ( $\rho c$ ). На таких неоднородностях происходит рассеяние (расщепление) УВ и генерация объемных волн. Характер нагрузки (напряжений) тела (в-третьих) должен быть таким, чтобы в нем могла возникнуть пространственно когерентная структура микротрещин или, иначе, - возникнуть (на языке физики когерентных структур) дальний порядок. В-четвертых, в этом теле должны раскрываться трещины, участвующие в процессе, - вполне определенного размера, не более 100 - 200 микрон, которые потом, после события, могли бы «залечиться» так, чтобы тело могло быть готово к очередному событию. (Это условие не исключает присутствие трещин других размеров). При выполнении этих требований в т.н. сейсмоактивной среде такого геологического тела возможно возникновение акустического стимулированного сверхизлучения (режима лавинного образования трещин) и возбуждение сильной акустической, централизованной волны, а затем и ударной волны.

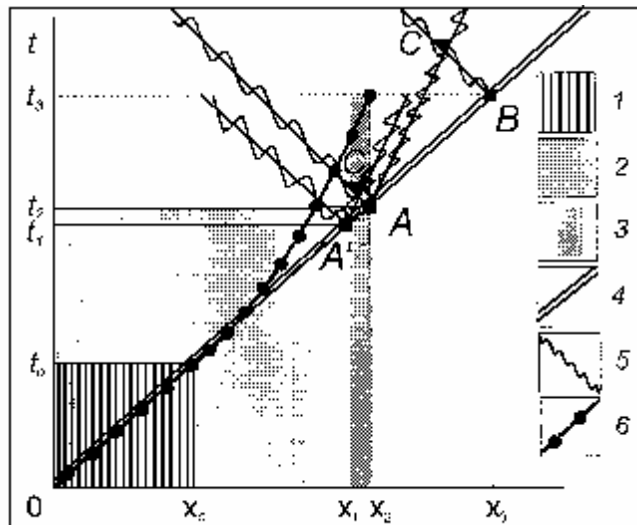


Рис. 5. Волновая картина формирования ударной волны, волны разрежения и их взаимодействия в геологическом теле и на его поверхности. 1 - геологическое тело; 2 - земная кора; 3 – поверхность; 4 - фронт УВ; 5 - фронт волны разрежения (ВР); 6 - кривая распределения скоростей Р-волн по глубине.

В точке  $(x_1, t_1)$  УВ выходит на границу между геологическим телом и рыхлым грунтом, а в точке  $(x_2, t_2)$  - на земную (свободную) поверхность. В каждой из этих точек происходит отражение УВ и возникновение волн разрежения (ВР), “двигающихся” в обратном (по отношению к УВ) направлении. Длительность импульса (удара) УВ конечна (обозначим ее  $\Delta t$ ). За это время УВ охватывает пространство на земной поверхности  $\Delta x = V_x \times \Delta t$  – в точке  $(x_3, t_3)$ , где так же может возникнуть ВР. Таким образом, на поверхности Земли, в области эпицентра землетрясения, в пространстве  $(x_1 - x_3)$ , - возникает ансамбль волн: ударных и разрежения. Эти волны, взаимодействуя между собой и с окружающим пространством, вызывают комплекс сложных волновых и гидродинамических явлений, приводящих, в конечном счете, к разрывам поверхности, разуплотнениям, вспучиваниям и проседаниям грунта, излиянию на поверхность жидкой фазы (мокрого песка и глины) в виде грифонов и т.п. На рис. 5 черным кружком (точка С) отмечено место пересечения ВР, в котором могут возникнуть разрывы сплошной среды. Рассмотрим эти явления подробнее.

## 9. Взаимодействие ударной волны с преградой, приводящее к возникновению отколов и разрушений поверхности

*Взаимодействие волн.* Рассмотрим механизмы взаимодействия волн, возникающих при выходе ударной волны на «свободную» поверхность твердого тела.

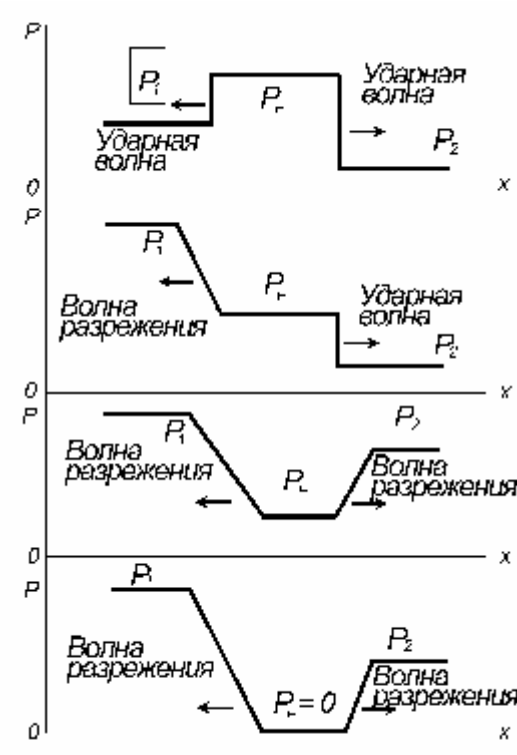


Рис. 6. Возможные типы распада разрыва. Давления  $P_1$  и  $P_2$  – на фронтах УВ и ВР, давление  $P_F$  – в теле, после прохождения по нему этих волн. Стрелки – направления распространения волн.

Как известно, ударная волна, это волна сжатия, на очень узком фронте которой, термодинамические характеристики претерпевают разрыв. Эта волна при прохождении через твердое тело приводит к его уплотнению и, при расщеплении на неоднородностях тела, - к генерации и излучению объемных волн. Ударная волна отличается от обычных акустических (сейсмических) волн ещё и тем, что вслед за фронтом УВ происходит движение (течение) вещества твердого тела, причем массовая скорость этого течения значительно меньше скорости УВ, и, чем интенсивнее ударная волна, тем выше массовая скорость. Совсем другая ситуация возникает, например, при выходе ударной волны на поверхность твердого тела. При этом образуется волна разрежения, двигающаяся в сторону, обратную движению УВ. Образование волн, идущих в обе стороны от «свободной» поверхности принято называть распадом разрыва. Разрыв в начальных условиях распространения УВ действительно исчезает, так как образуются два других разрыва. Обычно рассматриваются четыре возможных типа распада разрыва, из которых нас будет интересовать лишь четвертый. Все типы распада разрыва изображены на рис. 6 (сверху вниз): 1) Образование двух ударных волн. Такой тип распада встречается при выходе УВ из более «мягкого» вещества в более «жесткое». 2) Образование ударной волны и волны разрежения. Это происходит при выходе УВ из более жесткого вещества в более мягкое. Массовая скорость частиц более жесткого вещества удваивается и в нем 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 разрежения, которая 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 сплошного вещества. Такое

движение возможно, как и в ситуации 3, но при слабом начальном сжатии. При интенсивной волне разрежения элементы вещества начинают двигаться друг от друга в противоположных направлениях, т.е. происходит откол, - разрушение ранее целого и компактного вещества.

*Смыкание откола.* При соблюдении некоторых условий образовавшийся откол (разрыв сплошности материала) может сомкнуться. Для этого в материале должна возникнуть волна сжатия, т.е. ударная волна, которая может остановить процесс откола. Условия возникновения УВ могут быть связаны как с внутренними причинами, т.е. особенностями распространения волны разгрузки, так и внешними, - заключающимися в особенностях волновой обстановки вокруг материала, претерпевающего откол. Возможно, подобное явление, т.е. раскрытие трещины и, следующее за ним, смыкание её, наблюдал очевидец (пастух) во время Чуйского землетрясения в районе с Чибит. По словам очевидца, скорости раскрытия трещины и последующего её смыкания были сравнительно невелики, а сам процесс хорошо различался во времени. Опытные сейсмологи утверждают, что подобные случаи встречались и раньше, например, на Памире. Для объяснения этих фактов необходимо в рамках модели сильных движений получить оценки времени и скорости образования сейсморазрывов, различимых глазом, которые должны быть сравнимы со скоростями прихода к сейсморазрывам ударных волн.

*Влияние прочности материала на скорость откола.* Обсуждая проблему откола (разрыва), предполагалось, что для проявления этого явления достаточно того, чтобы плотность вещества после выхода ударной волны на поверхность оказалась ниже исходной. Действительно, это не совсем верно. Для начала откола необходимо, чтобы плотность оказалась меньше заданной, заранее определенной. Это связано с тем, что вещество, через которое распространяется УВ, обладает прочностью  $\sigma_p$ .

*О прочности грунта.* Известно, что теоретическая прочность на разрыв твердого тела  $\sigma_p \approx 0.1 E$ , где  $E$  – модуль Юнга. Учитывая справочные данные, скорости сейсмических волн в грунте и его плотность, можно с уверенностью считать, что величина  $E \approx 1$  кбар. Фактически прочность меньше чем  $\sigma_p$  примерно в 100 – 1000 раз. Для грубых, качественных оценок примем  $\sigma_p = 1 - 10$  бар, или  $10^6 - 10^7$  дин/см<sup>2</sup>, что соответствует давлению вышележащих слоев грунта  $p = \sigma_p = \rho gh$  на глубине  $h$  порядка нескольких метров (обычная для землетрясений глубина разрыва поверхности).

*Скорость сейсморазрыва.* Будем полагать, что возникновение первичных трещин сейсморазрывов в грунте идентично появлению откола в твердом теле при воздействии на него ударных волн. В этом случае можно написать формулу для величины скорости раздвижения трещины  $U$ :

$$U = 1/\rho_0 \times \partial P/\partial x \Delta t,$$

где  $\partial P/\partial x$  – градиент давления,  $\Delta t$  - время процесса. Очевидно, что  $\partial P/\partial x = \sigma_p/\delta x$ , где  $\sigma_p$  - растягивающее напряжение, при котором происходит откол,  $\delta x$  - толщина слоя откола (ширина трещины сейсморазрыва). Полагая  $\Delta t$  – время выхода ударной волны на поверхность до момента образования откола:  $\Delta t = \delta x/C$ ,  $C$  – скорость звука, получаем выражение для скорости  $U$ :

$$U = \sigma_p / \rho_0 C,$$

что позволяет оценить порядок величины скорости (в нашей интерпретации) раскрытия трещины-разлома  $U$ . Скорость оказывается порядка нескольких метров в секунду. По-видимому, это несколько заниженная оценка, так как, со слов очевидцев, раскрытие трещины происходит, как говорится, «на глазах у свидетеля». По-видимому, человеческий глаз способен различить скорость порядка 100 м/с. Это потребует корректировки (увеличения ~ в 10 раз) величины  $\sigma_p$ , что вполне правдоподобно. Важно, что скорость



раскрытия трещины прямо связана с прочностью материала, что так же вполне правдоподобно.

## 10. Энергетика разрушений в эпицентре Алтайского землетрясения

Рассмотрим два различных подхода к оценке энергии разрушений в эпицентре землетрясения: один, - с точки зрения теории упругости, другой - гидродинамики. Обратим внимание на то, что в преобладающем большинстве работ по физике землетрясения принято считать потери на разрушения очень малыми, - менее одного процента от полной энергии землетрясения. Выясним, насколько справедливо это утверждение в случае Чуйского землетрясения.

*Сейсмическая энергия.* В механике землетрясения принято считать, что сейсмическая волна, достигая поверхности Земли, вызывает смещение земной поверхности  $x$ :

$$x = a \cos(2\pi t/T_0),$$

тогда скорость движения грунта:

$$V = -(2\pi a_0/T_0) \sin(2\pi t/T_0).$$

Удельная энергия:

$$e = (\rho/4) (2\pi t/T_0)^2,$$

Кинетическая энергия, излучаемая очагом:

$$E = 3\pi^3 h^2 c t_0 \rho (a_0/T_0)^2.$$

Здесь  $a_0$  и  $T_0$  – амплитуда и период волны,  $h$  - глубина очага,  $c$  – скорость распространения волны,  $t = nT_0$  – длина цуга волн.

Оценим величину  $(a_0/T_0)$ , принимая:  $c = 3,6$  км/с,  $h = 18$  км,  $\rho = 2,7$  г/см<sup>3</sup> и  $E = 10^{23}$  эрг. Величина  $(a_0/T_0)$ , иначе, скорость движения грунта,  $V \approx (5 - 10)$  см с<sup>-1</sup>. По-видимому, эту оценку можно принять как некоторое усреднение, т.к. в эпицентре 7.5 бального землетрясения скорость движения грунта значительно (в 10 – 20 и более раз) выше, хотя, конечно, это утверждение измерениями не обосновано. Тем не менее, такая оценка полезна, и в дальнейшем, обсуждая параметры сильных движений в эпицентре Чуйского землетрясения, будем ориентироваться на неё.

Характерно, что в формуле для  $E$  нет расстояния до места прихода излучения от очага. По-видимому, это имеет глубокий смысл. Например, если оценить величину  $\sigma = \rho c V$ , где  $c$  – скорость звука, то оказывается, что напряжение  $\sigma$  соответствует примерно 1 бар. Как было оценено выше, напряжение в волне в 1 бар было зарегистрировано на сейсмостанции в Новосибирске (4 балла). Однако, главный толчок Чуйского землетрясения в Барнауле вызвал сотрясение всего в 2 балла, хотя Барнаул в два раза ближе к эпицентру, чем Новосибирск.

*Энергетика сильных движений.* Воспользуемся формулой:  $p = \rho D u$ , где примем:  $D = 3,5$  км/с,  $u = 1$  м/с,  $p = 100$  бар (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  $u$ , соответственно, выше.

Предположим невероятный случай, что вся энергия землетрясения  $E$  пошла, например, на разуплотнение грунта на поверхности  $S = 10 \times 10$  км<sup>2</sup> под действием волны разрежения. В этом случае глубина слоя разуплотнения грунта была бы равна  $E/pS = 10$  метрам. Эта оценка показывает масштаб явления. Грубая оценка суммарной длины сейсморазрывов, Алтайского землетрясения примерно 5 км. Если принять глубину разрывов 5 м, а ширину – 20 м, то объем, который подвергся разрушению, равен  $5 \cdot 10^5$  м<sup>3</sup>.

На эту «операцию» было затрачено примерно  $5 \cdot 10^{19}$  эрг. Оценим объем грунта, подвергнувшегося 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  $10^{20}$  эрг 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  $V(\text{см}^3/\text{с})$ , изливающейся через круглое отверстие радиусом  $R$ , длиной «трубы»  $l$ , вязкостью «жидкости»  $\eta$  и под давлением  $\Delta p$ :

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

Подставляя  $R = 10^2$  см,  $\eta = 10^5 - 10^6$  Пз,  $l = 10^2$  см,  $\Delta p = 10^8$  дин/см<sup>2</sup>, получаем:  $V = 10^8$  см<sup>3</sup>/с. Учитывая, что время «работы» грифона порядка нескольких минут, масса (объем  $\Delta V$ ) выброшенного материала может достигать:  $m \geq 1000$  т, что согласуется с приведенной выше оценкой. Линейная скорость переноса массы  $m$  порядка  $v = 10^4$  см/с, что позволяет сделать грубую оценку кинетической энергии работающего грифона:  $E = 10^{17}$  эрг. Величину  $E$  можно оценить и по формуле:  $E = \Delta p \Delta V$ . Подставляя:  $\Delta p = 10^8$  бар,  $\Delta V = 10^9$  см<sup>3</sup>, получаем ту же величину  $E$ . Даже если допустить, что во время Чуйского землетрясения «работало» 100 таких грифонов, их суммарная энергия ( $E = 10^{19}$  эрг) оказывается значительно меньше (в сто раз), чем энергия, которая пошла на образование сейсморазрывов.

## 11. Результаты исследования особенностей землетрясения в Нортридже (США)

Нортриджское землетрясение было выбрано как одно из наиболее изученных. Оно произошло вблизи Голливуда, пригорода Лос Анжелеса, 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, а так же результаты исследования величины и направления подвижек в очаге землетрясения.

Нортриджское землетрясение 6.7 баллов (энергия  $\sim 10^{22}$  эрг) произошло 17 января 1994 г. Epicenter 32.2 ° N; 118.5 ° W; depth 16.6 km. Seismic moment 1.2  $10^{26}$  dyne-cm. Fault orientation strike: 131°; dip: 50°; rake: 115°. Fault dimension 20×20 km. Repture velocity 2.8 km/sec. Fractal dimension D = 2. Stress drop for subevents  $\Delta\sigma = 100$  bars.

На рисунке 7 изображено расположение GPS станций в районе Northridge Earthquake и величины перемещений грунта в момент толчка в горизонтальном направлении. Точками выделен прямоугольник размером 20×20 км<sup>2</sup>, 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.

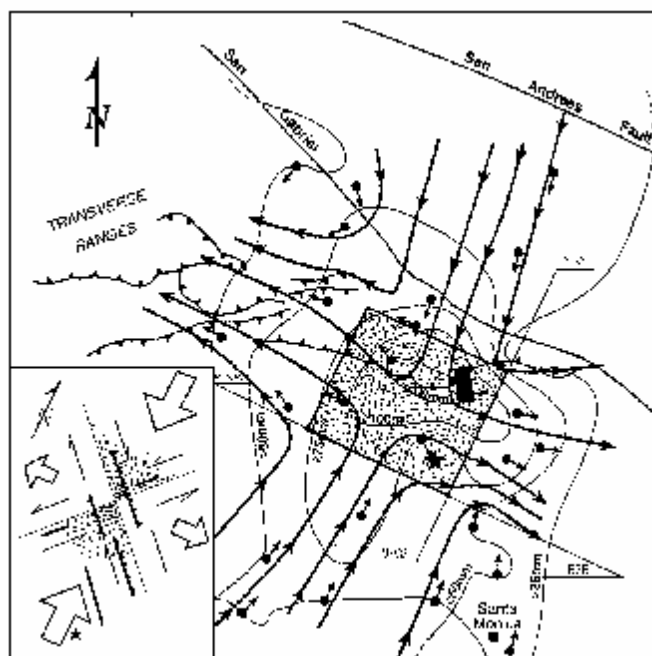


Рис. 7. Расположение GPS станций в момент Northridge earthquake. Magnitude of horizontal displacement is indicated by contour lines.

Рисунок 8 показывает величины вертикальных и горизонтальных (long) амплитуд и скоростей перемещений грунта, измеренных на Van Norman Complex. Черные прямоугольники на рис. 2 соответствуют усредненным за 1 секунду величинам смещений и скоростей. Directions and Vectors это направления смещений и векторов скорости. Анализируя амплитуды и скорости перемещений грунта, приведенные на рис. 8, можно выделить некоторую квазипериодичность процесса  $T \approx 2-3$  сек. 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. Максимальная амплитуда горизонтальных движений - до 40 см. Условная длина волны вертикальных колебаний  $\lambda \approx$  не более 50 см. Отношение  $h/\lambda$  не менее 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. 7 прямоугольнике максимальных разрушений (размером  $20 \times 20$  км<sup>2</sup>) в момент толчка произошло поднятие (см. рис.9) грунта на высоту  $\approx 50$  см.

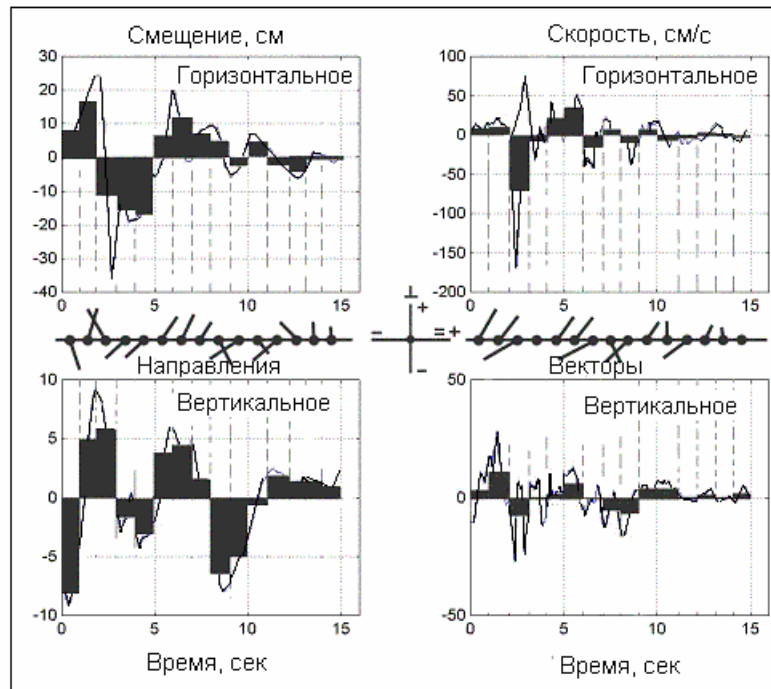


Рис. 8. Временная зависимость продольных компонент (transverse, vertical) скоростей и смещений, записанных на станции Van Norman Complex (Bardet, Davis, 1996).

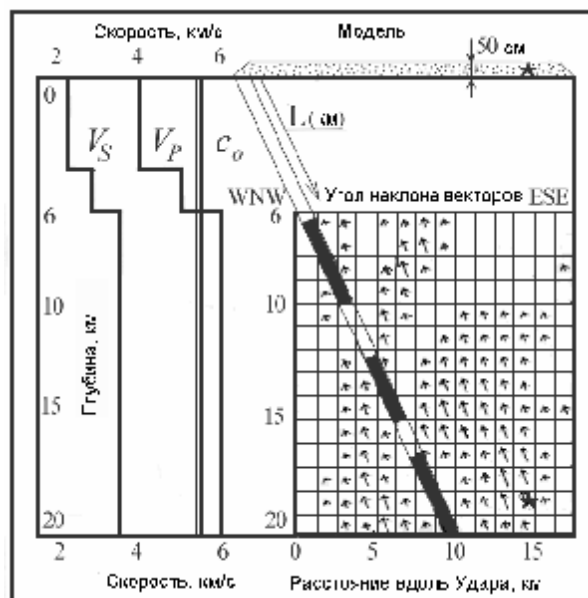


Рис. 9. Модель разрывов Нортриджского землетрясения (справа) (Somerville et al., 1996; Zeng, Anderson, 1996). В левой части рисунка - распределение скоростей P-, S-волн и ударной волны  $c_0$  - по глубине (Shen et al., 1996).

На рис. 9 справа, изображена rupture model of the Northridge earthquake. В левой части рис. 9 показана 1D P- and S-wave velocity structure for the area [3']. На рис. 9 отчетливо видно, что уменьшение скоростей P- and S-wave соответствует глубине 6 км. Отметим, что именно на этой глубине наблюдается исчезновение векторов slip. Видно, что структура векторов не равномерная, состоящая из трех отдельных друг от друга участков. Это демонстрирует наклонная линия, в которой наличие slip, проектируемое на эту линию, отмечено черным цветом. Предположим, что изображенная картина векторов, это временной «срез» явления. «Разрыв» происходит вдоль этой линии, длина которой  $L$

примерно 22 км. Вдоль этой линии можно изобразить временную шкалу, на которой выделяются три, следующих один за другим удара. Известно, что main shock Northridge earthquake состоит из трех, следующих друг за другом импульсов, общей длительностью  $\tau$  (по основанию) порядка 8 сек. Скорость разрыва в этом случае равна  $V = L/\tau = 2.8$  км/с. Величины векторов Slip максимальны и равны 4 м в районе гипоцентра землетрясения, их величина меняется в очаге в интервале от 0.5, до 3 м, а выше 6 м векторов вообще не наблюдается, угол наклона векторов к горизонту  $\sim 60 - 70^\circ$ .

**Особенности.** Анализируя приведенные данные, выделим несколько особенностей. Во-первых, **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 (см. рис. 8). 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:  $s \approx 100$  бар. Знание этих параметров позволяет оценить величину вязкости «жидкой» среды:  $h = sa/v \approx 10^7$  Па с. Оценка вязкости показывает, что **вещество** верхнего слоя почвы действительно находится в момент землетрясения **в квазижидком, пластическом состоянии**. Во-вторых, следует отметить, что **slip регистрируется только ниже глубины 6 км** (рис.9) и именно на этой глубине наблюдается резкое уменьшение величин P- и S-скоростей сейсмических волн. В третьих, **slip максимален в области гипоцентра**, где достигает 4 м, по мере уменьшения глубины, величина rake vectors уменьшается до нуля, затем вновь увеличивается, показывая, что strike неравномерен в плоскости сечения очага землетрясения. Можно ещё раз отметить, что **на глубине, меньшей 6 км, slip вообще отсутствует**. В-четвертых, следует отметить, что **гипоцентр Northridge earthquake 1994 не совпадает с центром разрушений**, это можно видеть и на рис. 7. В-пятых, **угол прихода main shock равен  $40^\circ$** , в то время как угол rake vectors  $\approx 70^\circ$ . И, наконец, пространственная структура афтершоков (рис.10), произошедших после Northridge earthquake 1994, так же как и структура rake vectors, показывают, что **очаг землетрясения представляет собой трехмерное тело с характерным линейным размером порядка 10 – 20 км**.

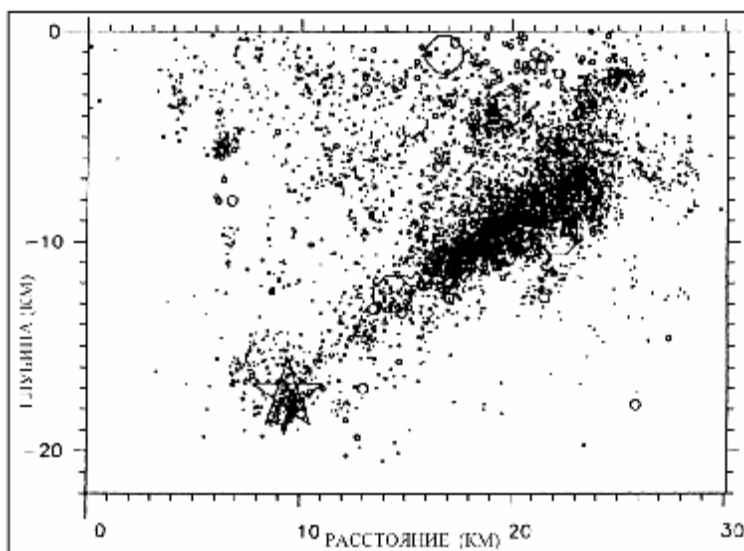


Рис. 10. Афтершоки Нортриджского землетрясения 1994 г. “повторяют” структуру “основного удара” этого землетрясения (Wald et al., 1996).

## Заключение

В заключение, подводя итоги обсуждения ударно-волновой модели землетрясения, сошлемся на мнение строителя, специалиста по разрушению профессора МИСИ С.Б. Смирнова, обосновавшего концепцию ударно-волнового сейсмического разрушения. Смирнов утверждает, что многочисленные наблюдения сейсмических разрушений зданий 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, Смирнов приходит к заключению, что такие разрушения могут производиться только ударной волной. Свою концепцию автор обосновывает расчетами и многочисленными примерами из практики сейсмических разрушений.

Работа Смирнова свидетельствует в пользу предлагаемой ударно-волновой модели землетрясения. По всей видимости, трудно найти более убедительные аргументы в поддержку настоящей модели.

Каков же выход из создавшегося положения? И есть ли он? Очень многие серьезные ученые и инженеры полагают, что в настоящее время у человечества существуют всего два пути: один, это хорошо строить и быть готовым к тому, что такое событие может произойти в любое время, и второй, – заниматься физикой явления. Причем оба пути должны развиваться одновременно, быть тесно связаны, а не противопоставляться друг другу.

Если окажется, что развиваемая ударно-волновая модель адекватна реально происходящим событиям, то остается ещё один путь – путь активной защиты некоторых опасных зданий и строений, таких как плотины гидростанций, атомные электростанции, уникальные памятники и пр. В качестве примера реализации такой «защиты», образованной самой природой, приведен рис. 11, на котором показано, что сильные землетрясения в районе Байкальской рифтовой зоны происходили вблизи отметок 0 и 150 км и их не было в интервале 50 – 100 км. Причина, с точки зрения ударно-волновой модели состоит в том, что в области пониженных скоростей (6.3 км/с) ударные волны рассеивались, отражались и не достигали поверхности Земли. В этом регионе можно строить город и рассчитывать на то, что здесь землетрясений не будет. Такие «рассеиватели УВ» можно, по всей вероятности, - создавать искусственно.

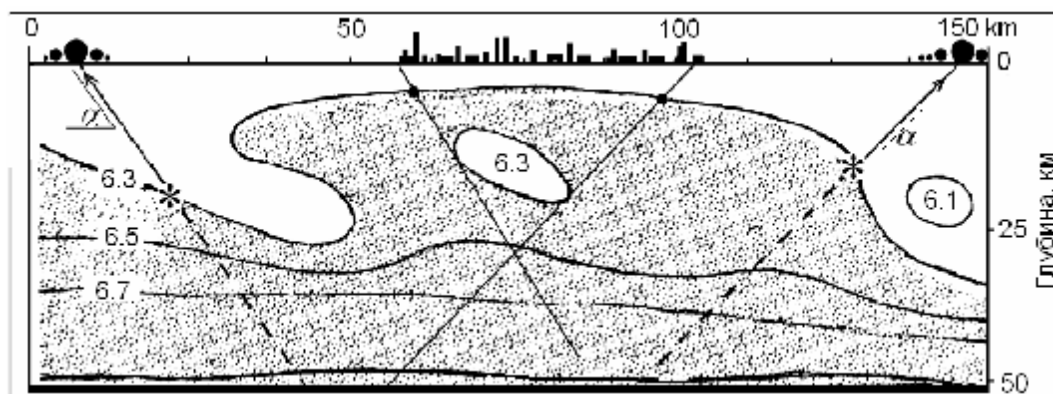


Рис. 11. Сейсмический разрез земной коры в Муйском районе Байкальской рифтовой зоны по данным скоростей Р-волн (Крылов и др., 1993).