

Глава VIII. СЕЙСМИЧНОСТЬ ЗЕМЛИ, ФИЗИКА ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ

В Главе VIII изложены результаты исследований таких вопросов:

- возникновение когерентности в акустически активной среде взаимодействующих между собой раскрывающихся трещин;
- ударно-волновая (УВ) модель землетрясения;
- сильные движения грунта при землетрясении;
- особенности глубоких землетрясений и природа афтершоков;
- отношение к прогнозу землетрясения.

Ключевой момент главы составляет описание УВ модели землетрясения. Во временном срезе модели можно выделить три взаимосвязанных этапа:

- На первом этапе в нагруженной литосфере происходит образование когерентных структур, основанных на взаимодействии элементов между собой путем обмена звуковыми (акустическими) волнами. Взаимодействие акустических элементов структуры (дилатонов и бризеров) приводит, в конечном счете, к *образованию ударной волны*. На сравнительно малых глубинах когерентные структуры возникают за счет взаимодействия раскрывающихся трещин между собой путем обмена акустическими волнами. На больших глубинах, где реология среды не позволяет протеканию процесса образования трещин, когерентная структура может возникнуть за счет ансамбля схлопывающихся кавитирующих «пузырей», образующихся в глубоких слоях литосферы. Здесь, так же как в первом случае, звуковые импульсы от схлопывающихся пузырей воздействуют на другие пузыри, что приводит к их схлопыванию.
- Второй этап составляет комплекс явлений, связанных с прохождением ударной волны по геологической среде от области её формирования – гипоцентра землетрясения, до поверхности Земли. На этом этапе землетрясение проявляет себя как *излучатель объемных сейсмических волн*. Энергия землетрясения на этом этапе расходуется практически полностью. Этот процесс является общим и для коровых, и для глубоких землетрясений,
- Третий этап включает процессы, происходящие в эпицентре разрушения - районе, где ударная волна выходит на «дневную» поверхность, отражается и взаимодействует с образовавшейся в этом процессе волной разгрузки (разряжения). При этом на поверхности Земли происходит собственно *«трясение» земли*, т.е. возникновение отколов, разрывов поверхности, вспучивание поверхности грунта и т.п.

VIII. 1. Математическая модель акустического сверхизлучения.

Ансамбль излучающих трещин. Модель взаимодействия излучающих звук трещин строится на аналогии этого явления с известным в оптике явлением сверхизлучения. Идея была высказана Дике (Dicke, 1954) и реализована в лазерах. Идея самоорганизации в структурах типа лазера, генерирующих оптическое излучение, рассмотрена Хакеном (1980). В первом варианте, суть модели акустического сверхизлучения была опубликована в работах автора (Кузнецов, 2001-а, 2001-б). Ниже излагается дальнейшее развитие модели.

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.

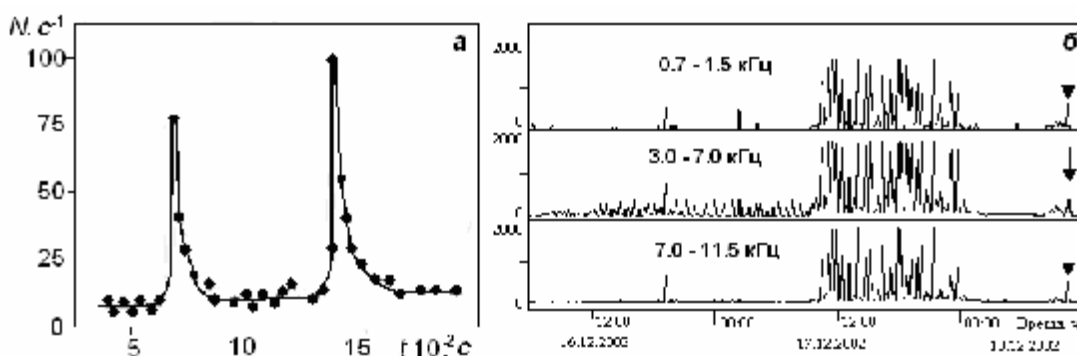


Рис. 8-1. а) Скорость образования трещин в диабазе при действии на образец постоянного одноосного сжимающего напряжения (Журков и др. 1980). б) Геоакустические сигналы, зарегистрированные перед землетрясением 18.12.2002 ($K = 12.1$) на Камчатке (ИКИР). Время события отмечено стрелкой (Купцов, 2006).

Результаты лабораторных экспериментов и натуральных наблюдений (рис. 8-1) 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 τ , находящегося под нагрузкой σ , равна: $\tau = \tau_0 \exp [(U_0 - \gamma\sigma)/kT]$. Здесь k – константа Больцмана, T – температура, U_0 – энергия разрыва межатомных связей, время $\tau_0 = 10^{-13} c$ – совпадает с фундаментальной характеристикой твердого тела – периодом тепловых колебаний атомов в решетке - фононов, γ – коэффициент, пропорциональный

перенапряжению на межатомных связях. Отсюда следует, что напряжение σ , разрывающее образец за время τ :

$$\sigma = 1/\gamma (U_0 - kT \ln \tau/\tau_0) = \sigma_{\max} - (kT/\gamma) \ln \tau/\tau_0. \quad (8.1)$$

Рассмотрим роль ангармонизма в кинетической теории прочности. Представим силу межатомного взаимодействия $F(\Delta)$ (см. рис. 8-2) в виде разложения в ряд Тейлора по величине Δa 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.

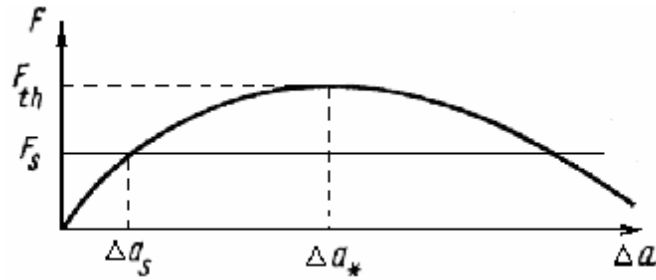


Рис. 8-2. Сила межатомного взаимодействия как функция смещения атомов (Журков, Петров, 1978).

Из рис. 8-2 видно, что максимум силы F_{th} , достигаемый при удлинении Δa^* , 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 $F_g = F_{th} - F_s$:

$$F_s = F_{th} - 2(gkT/f) \ln \tau/\tau_0. \quad (8.2)$$

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

$$\sigma = \sigma_{\max} - (2gkT/fa^2x) \ln \tau/\tau_0, \quad (8.3)$$

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

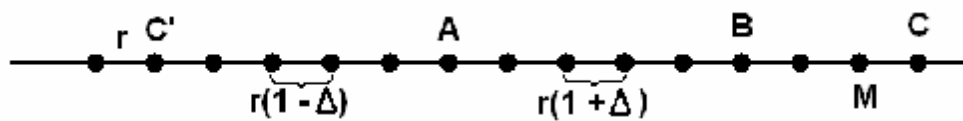
Механизм термофлуктуационного разрыва связи обусловлен ангармоничностью тепловых колебаний и определяется отношением g/f . При $g = 0$ влияние температуры и времени на прочность исчезает. В идеальных телах, подчиняющихся закону Гука вплоть до напряжений теоретической прочности, температурно-временной 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:

$$\Delta\omega/\omega = G\epsilon \quad (8.4)$$

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 (Кусов, 1979). Дилатон – это область дефектов кристаллической решетки, в которой происходит интенсивная генерация фононов. Когда количество фононов за счет ангармонизма решетки достигает критического уровня, дилатон «схлопывается» (решение типа бризер) и превращается в микротрещину, которая, раскрываясь, излучает акустическую волну.



Дилатон Δ - 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 .

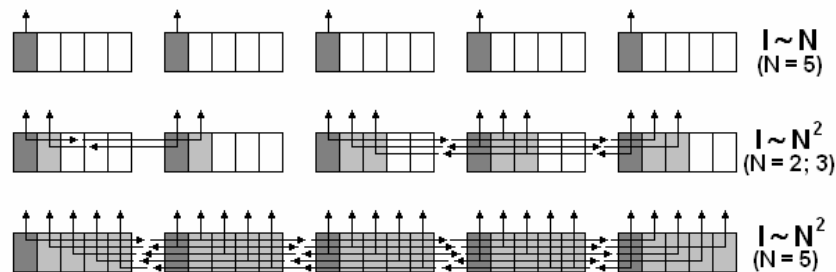


Рис. 8-3. Излучение раскрывающихся трещин (схлопывающихся дилатонов): верхняя панель – излучение акустических волн без связи между дилатонами. Средняя и нижняя панели – акустическая связь между двумя, тремя и пятью дилатонами.

Предположим, что в некотором объеме среды существует n ($n = 5$) дилатонов (рис. 8-3), 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 свержизлучению 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 $\sim N^2$.

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. 8-4).

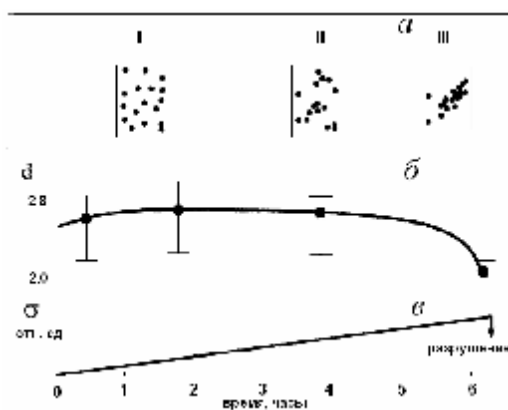


Рис. 8-4. *a* - Распределение гипоцентров акустической эмиссии по мере увеличения сжатия образцов гранита и возникновения фрактальных структур. *б* - изменение фрактальной размерности d . *в* - нагрузка образца до его разрушения (Lei et al., 1992).

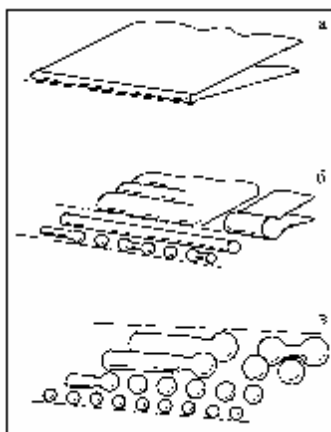


Рис. 8-5. Схема процесса залечивания (зараствания) трещин (Smith, Evans, 1984).

Залечивание трещин. Как известно, часто землетрясения происходят в одном и том же месте геологической среды. Это означает, что среда, если она и разрушалась во время землетрясения с образованием трещин, - восстанавливает свои свойства в течение обозримого промежутка времени, т.е. происходит залечивание трещин. Рисунок 8-5 показывает последовательность процесса залечивания трещин. Наличие этого процесса имеет принципиальное значение в нашей модели, Если трещина не способна к залечиванию, и остается в течение длительного времени открытой, то система оказывается не самоподобной, т.е. в такой среде не может возникнуть акустически активной

структуры. Трещины, возникающие в таких структурах, могут закрываться (залечиваться) при прохождении ударной волны по среде. После прохождения ударной волны, среда вновь оказывается способной к её генерации. Этот процесс в сейсмологии называется афтершоковым.

Пространственная когерентность среды. В напряженной среде с явно выраженным характером нагрузки реализуется критерий разрушения Кулона-Мора (Поль, 1975). Согласно этому критерию, в образце максимальные величины касательных напряжений возникают в плоскостях, наклоненных под углом b к оси нагружения, близким к 45° . Однако, этот угол не всегда равен 45° . Его значение принимается: $b = 45^\circ - j/2$, где $tg j = \kappa$, а κ - коэффициент “внутреннего трения”. Величина угла b не зависит от прочности материала (рис. 8-6).

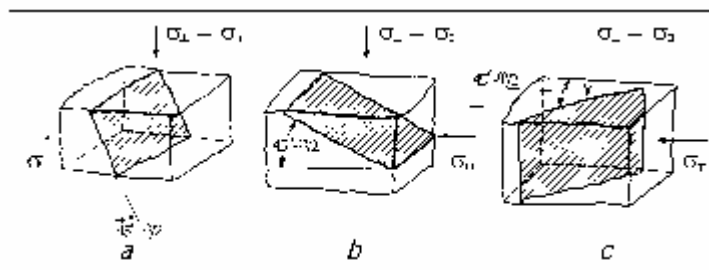


Рис. 8-6. Критерий разрушения Кулона-Мора (Поль, 1975). Максимальные величины касательных напряжений возникают в плоскостях, наклоненных под углом b к оси нагружения, близким к 45° .

В дальнейшем нас будет интересовать лишь та часть теории Кулона-Мора, которая описывает условия формирования пространственного угла образования трещин. Разрушение образца, как известно, происходит именно под этим углом q (рис. 8-6). Кулон обнаружил, что разрушение происходит под углом $q = 45^\circ - j/2$, где угол j можно оценить по известному критерию Кулона-Мора, записанному в главных напряжениях:

$$\sin j = [1/2 \cdot (S_I - S_{III})] / [c \cdot \text{ctg } j - 1/2 \cdot (S_I - S_{III})], \quad (8.5)$$

здесь c - прочность горной породы, S_I и S_{III} - главное и дополнительное напряжения. Из этой формулы следует, что если: $S \rightarrow 0$, то $j \rightarrow 90^\circ$, а $q \rightarrow 0^\circ$ и, наоборот, если: $S \rightarrow \infty$, то $j \rightarrow 0^\circ$, а $q \rightarrow 45^\circ$. Т.о., с увеличением глубины h и, естественно, увеличением литостатической нагрузки S , угол q будет возрастать от 0° до 45° (см. рис. 8-7-а). Полученный результат говорит о том, что в среде, которая “нагружена” только за счет статики вышележащих слоев, не может возникнуть дальний порядок и, очевидно, не может быть землетрясений. Возможно, это не совсем так при больших величинах S ($S \geq 5$ кбар), когда угол j будет очень мал и угол раскрытия трещин $q \approx 45^\circ$. Однако, при меньших величинах S угол q может быть меньше 45° . Для того, чтобы в такой среде возник дальний порядок, необходимо каким-либо способом “довернуть” угол q до необходимого значения. В принципе, это можно сделать с помощью “боковой”, тектонической нагрузки (рис. 8-7-б). Эта нагрузка вызывается глобальными тектоническими причинами, именно она приводит к образованию разломов, дрейфу плит и континентов. Возможно, “довернуть” угол q можно при помощи электрического поля, если считать, что микротрещину можно рассматривать как электрический микродиполь.

Обратим внимание на одно из следствий модели. Величина литостатической нагрузки S составляет несколько килобар, величина тектонической “боковой” - S должна быть примерно того же порядка. Это намного больше, чем величина напряжения, вызываемая лунно-солнечными приливами (7 бар). Возможно, именно в этой разности

величин S и состоит причина отсутствия регулярной для всех сейсмически активных регионов корреляции между приливами и сейсмичностью.

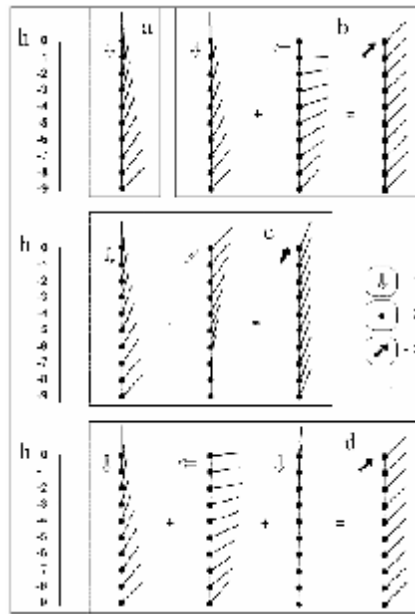


Рис. 8-7. Схема напряжений в литосфере: с увеличением глубины h и литостатической нагрузки S , угол q будет возрастать от 0° до 45° (a); при аддитивном сложении двух напряжений, действующих под углом друг к другу, угол образующихся трещин в зоне их возникновения $q = 45^\circ$ (b), или $q > 45^\circ$, и приближается к 90° (c); рис. 8-7-d иллюстрирует возможность сравнительно небольшой по величине дополнительной нагрузки привести к возникновению дальнего порядка и пространственной когерентности.

Рассмотрим случай, когда угол q определяется литостатической нагрузкой и напряжением, возникающим в зонах субдукции. Здесь S является результатом векторного аддитивного сложения двух напряжений, действующих под углом друг к другу (рис. 8-7-с). Угол образующихся трещин в зоне их возникновения $q > 45^\circ$ и приближается к 90° . Рисунок 8-7-d иллюстрирует возможность сравнительно небольшой по величине дополнительной нагрузки привести к возникновению дальнего порядка* и пространственной когерентности. Этим примером демонстрируется возможность проявления в нашей модели т. н. триггер-эффекта. Этот эффект, как известно, широко обсуждается сейсмологами.

*Дальний порядок – наличие пространственной корреляции микроструктуры вещества в пределах образца. Дальний порядок – упорядоченная фаза. Параметр порядка - спонтанная поляризация, или константа анизотропии диэлектрической проницаемости, или намагниченность в ферромагнетиках, или фаза волновых функций частиц, которая может измениться во всем образце в целом, но не может изменяться независимо в разных его точках.

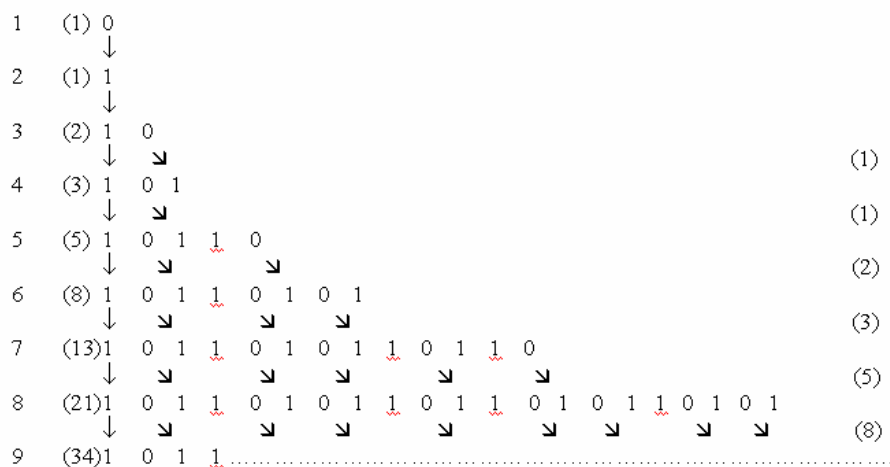
Возникновение временной когерентности. Другой гипотетический способ получения дальнего порядка в модели взаимодействующих трещин, это возможный механизм взаимодействия слабых ударных волн, возникающих в акустически активной среде. Ударные волны, образованные посредством объединения нескольких звуковых импульсов от раскрывающихся трещин, обладают уже более низкой несущей частотой и способны распространяться на расстояния, большие, чем звуковые импульсы от трещин. Такие волны способны объединяться аналогично тому, как это происходит с солитонами,

образуя при этом более мощную ударную волну, длительность импульса (удара) которой достигает секундных времен. Можно рассмотреть два возможных механизма:

- в акустически активной среде заранее «подготовлено» много микротрещин и S-волна, излучаемая при раскрытии трещины, - способствует раскрытию новой трещине;
- каждый раз, когда раскрывается трещина, при этом образуется и микротрещина.

Заметим, что при этом Р-волна возникает при рассеянии S-волны на раскрывшейся трещине, а собственно рассеяние Р-волны на трещине увеличивает длину взаимодействия, иначе, увеличивает длину пробега Р-волны без затухания. Второй способ возникновения когерентности может быть описан последовательностью событий Фибоначчи.

Схема роста числа излучающих микротрещин по Фибоначчи:



Принципы итеративного отображения впервые были высказаны Фибоначчи ещё в 1200 году для описания задачи размножения кроликов (Шредер, 2001). С формальной точки зрения Фибоначчи производил итерированное отображение $0 \rightarrow 1$ и $1 \rightarrow 10$, где 0 в его задаче означает молодую пару кроликов, а 1 – взрослую пару. Как мы отмечали, механизм размножения трещин может быть, в принципе, аналогичен задаче, рассмотренной Фибоначчи. Под 1 будем полагать большую трещину, под 0 – микротрещину, способную раскрыться ($0 \rightarrow 1$) и генерировать при этом звуковой импульс. Результатом этой итерации будет большая трещина и микротрещина, готовая к раскрытию ($1 \rightarrow 10$). Можно получить самоподдерживающуюся лавинообразную последовательность. При этом после каждой операции в цикле лавинного образования трещин количество задействованных трещин равно сумме двух предыдущих операций:

$$N_{n+2} = N_{n+1} + N_n.$$

Числа N_n образуют известную последовательность Фибоначчи (Шредер, 2001) (1, 1, 2, 3, 5, 8, 13 ...). Эта идея иллюстрируется «Схемой роста итераций, т.е. числа излучающих микротрещин по Фибоначчи». Обозначения: единицы – раскрывшиеся, большие трещины, нули – микротрещины. Слева – номер операции. В скобках – общее количество трещин участвующих в процессе. В правом ряду (в скобках) – количество излучающих трещин. Наклонная стрелка соответствует процессу излучения звукового кванта (фонона).

Взаимодействие схлопывающихся пузырей (Модель гидродинамической кавитации). Рассмотрим гидродинамическую кавитацию, как диссипативное явление, близкое явлению образования трещин при «сбросе» упругой тектонической энергии. Кавитация (cavitas) – пустота, разрыв сплошности среды, образование пузырьков, содержащих пар жидкости или «посторонний» газ. Разрабатываемая модель предполагает, что микротрещина, раскрываясь и нарушая сплошность среды, генерирует звуковой импульс, который, распространяясь, рассеивается на другой микротрещине, отдает ей, посредством дилатонов, часть энергии, «помогая» её раскрытию. Микротрещина раскрывается, и этот

процесс вновь вызывает образование волн, он повторяется снова и снова, вплоть до возникновения лавины трещин и волн. При гидродинамической кавитации в потоке капельной жидкости возникают растягивающие напряжения, и в результате местного понижения давления возникает разрыв сплошности среды в виде полости (пузыря). Пузырь, представляющий собой пар жидкости или газ (вероятнее всего водород), находящийся под давлением p_n , увеличивается в размере от начального радиуса R_0 до тех пор, пока местное давление (в области пузыря) будет меньше равновесного внешнего давления p_o . Условие неограниченного расширения пузыря при гидродинамической кавитации:

$$p_{кр} \gg p_n - (\sigma/R_0) [1 + (p_o - p_n) R_0/R]^{-1/2}, \quad (8.6)$$

где σ - поверхностное натяжение жидкости, а R радиус расширяющегося пузыря.

Приведем уравнение адиабатического увеличения объема газа (пара) пузыря:

$$R d^2R/dt^2 + 3/2 (dR/dt)^2 + (1/r) (2\sigma/R) - 1/r(p_o - p_n + 2\sigma/R_0) (R_0/R)^{3\gamma} = 1/r[p - p(t)], \quad (8.7)$$

где γ показатель адиабаты, а r плотность жидкости.

Изменение режима течения жидкости, величины местного давления в потоке или какая-либо другая причина, например интенсивная звуковая волна, приводят к схлопыванию кавитационных пузырьков. Это явление сопровождается излучением звукового импульса (ударной волны), причем, чем меньше газа содержит пузырек, тем интенсивнее звуковой импульс. Образовавшиеся при схлопывании пузырей плоские акустические волны рассеиваются на других пузырях и их зародышах.

Падение плоской звуковой волны $p_m \exp(ikr)$ на единичный пузырь, радиус которого много меньше длины звуковой волны, представляется (Красильников, Крылов, 1984) в виде суммы двух членов:

$$p(r) \gg p_m \exp(ikr) + f_1 p_m \exp(ik|r - r_1|/|r - r_1|), \quad (8.8)$$

где r_1 - координата центра пузырька, f_1 - амплитуда рассеяния. При $R \ll l$ амплитуда рассеяния сферически симметрична и не зависит от угла падения волны на пузырь. Она выражается формулой:

$$f_1 = R_0 / (w_0^2/w^2 - 1 - id), \quad (8.9)$$

где d - затухание волны, а w_0 - резонансная частота пузырька. Поглощение звука происходит эффективнее всего на резонансных частотах. Таких пузырей становится в системе все меньше и меньше и, наконец, происходит т.н. "просветление" системы. При этом амплитуда звуковой волны неограниченно возрастает. Волна из слабой акустической может превратиться в мощную уединенную, ударную волну.

Таким образом, в системе, включающей кавитирующие пузыри, возможна генерация мощной ударной волны. Известны данные по экспериментальному подтверждению существования таких систем, а так же известна реакция систем на ударные волны. Сошлемся, например, на работу (Борисов и др., 1977), в которой авторы наблюдали эффект усиления ударных волн в кипящих криогенных жидкостях - азоте и фреоне. Пузырьки пара при воздействии на них слабой ударной волной, начинали интенсивно конденсироваться и исчезать. При этом происходило усиление ударной волны. Механизм усиления ударной волны, считают авторы, состоит в том, что при схлопывании пузыря повышается давление на фронте ударной волны. Авторы не обсуждают возможности волнового характера воздействия на кавитирующие пузыри, однако, нет причин не рассматривать и такой механизм усиления ударной волны. Реально, по всей видимости, происходит более сложный процесс, например, такой, как кавитационное усиление волны, чем та модель, которую предлагают авторы эксперимента.

Может ли возникнуть явление кавитации в литосфере? Мы показали, что в двухфазной среде, точнее, в жидкости с пузырьками, содержащими пар или газ, возможна генерация и усиление ударной волны. Можно ли соотнести сказанное выше к той части литосферы, где формируются очаги глубокофокусных землетрясений? Попробуем ответить на этот вопрос. Очевидно, что гидродинамической кавитации в литосфере возникнуть не может, так как причина этого явления состоит в наличии в системе быстрого потока жидкости, движущегося со скоростью v и создающего противодействие p равное: $p \gg \rho v^2/2$. Этот параметр в литосфере ничтожно мал и на нем кавитации астеносферы не получишь. Напомним, что основным условием возникновения кавитации является возможность возникновения в системе противодействия. Как отмечалось, на глубинах порядка 700 км литостатическое давление достигает 240 кбар, а температура, порядка 2800 К. Принято считать, что вещество при таких pT -условиях находится в состоянии частичного плавления. При этом в пузыре возникает газокINETическое давление $p = nkT$. Подставляя в эту формулу величины p , k и T , получим необходимую величину плотности и молекулярного веса газа, т.к. $p = r/mn$, где m масса протона ($m = 1.6 \cdot 10^{-24}$ г), а n молекулярный (атомный) вес. Легко показать, что газокINETическое давление, близкое по порядку величины с литостатическим, может создать газ, обладающий атомным весом $m = 1$. Иначе, только наличие свободного водорода в веществе мантии может быть причиной возникновения противодействия, сравнимого по порядку величины с литостатическим. В такой системе могли бы образоваться пузыри, наполненные водородом и окруженные частично расплавленным веществом мантии. В этом случае, их рост и последующее схлопывание, связанное с генерацией акустических волн, могли бы быть причиной процессов, постулированных в нашей модели. Возникает вопрос, может ли находиться водород в мантии, причем, в необходимом количестве? Имеется ли какая-либо информация о том, что водород действительно был обнаружен? К чему может привести его наличие в веществе Земли? В каком виде он может присутствовать? Ответы на эти вопросы можно найти в 5-ой главе этой книги.

VIII. 2. Ударно-волновая модель очага землетрясения.

Образование ударной волны. Модель №1. Может ли возникнуть УВ в твердой оболочке Земли, если сейсмический фон стационарен и нет внешних взрывных возмущений? В работах (Кузнецов, 1992; 2001-а; 2001-б) идея возникновения УВ в литосфере Земли обосновывалась тем, что при нагрузке в твердом упругом и прочном геологическом теле возникают трещины, которые, при раскрытии, генерируют звуковые импульсы. Эти импульсы, распространяясь по среде и достигая готовой к раскрытию новой микротрещины, стимулируют ее раскрытие и генерацию еще одного импульса (Си, Либовиц, 1975; Кузнецов, 2001-а) и т.п. Если в среде микротрещин много, то первый импульс одновременно “запускает” раскрытие других трещин и возникает очень много импульсов, интенсивности которых складываются. Таким образом, в среде, в которой могут образоваться микротрещины, определенным образом ориентированные, возможно осуществление режима “сверхизлучения”, впервые предсказанного для оптики Р. Дикке (Dicke, 1954) еще до открытия лазеров, и практически реализованного уже после их широкого распространения. Если предположить, что в напряженной упругой среде возможен режим акустического сверхизлучения, т.е. фактически стимулированного образования трещин, то звуковые импульсы от синхронно образующихся трещин, когерентно складываясь, могут образовать уединенную акустическую волну, которая, в принципе, может превратиться в волну ударную.

Постулированный нами механизм землетрясения, по сути, очень близок к т.н. режиму лавинного образования трещин. Он отличается от общепринятой его трактовки тем, что в результате лавинного образования трещин, вместо одной большой трещины (по Рейду), в которую объединяются много - много мелких, эти же трещины “объединяют”

свои звуковые импульсы (звуковые, сейсмические волны), формируя при этом отдельную волну (Заславский, Сагдеев, 1988). Такая волна, распространяясь по геологическому телу, может из волны акустической превратится в волну ударную. При этом вместо привычного в физике землетрясения разрыва смещений будет происходить перемещение разрыва характеристик среды на фронте ударной волны, возникает, в терминах Аки и Ричардса (1983), - разрывной источник. Рассеяние УВ на акустических неоднородностях очага землетрясения вызывает генерацию объемных волн, и, таким образом, в ударно-волновой модели реализуется объемный, в терминах Аки и Ричардса (1983), источник.

Принципиальным моментом механизма взаимодействия между трещинами является то, насколько эффективно рассеиваются сейсмические волны на дилатоне (бризере) с генерацией микротрещины и раскрытием трещины. Приведем несколько очевидных соображений, касающихся особенностей рассеяния волны на микротрещине (Аки, Ричардс, 1983), которые следует использовать в дальнейшем:

- Рассеянные волны образуются в результате взаимодействия между первичными волнами и неоднородностями среды – трещинами и микротрещинами.
- Р-волна в направлении своего распространения не создает поля рассеянных S-волн дальней зоны.
- В направлении распространения S-волны рассеянные Р-волны не излучаются.
- Мощность, уносимая рассеянными волнами, определяется тремя основными параметрами: линейным размером объема неоднородной области, характерным размером неоднородности (размером трещины или микротрещины) и длиной сейсмической волны.
- Рассеяние становится пренебрежимо малым, когда размер неоднородности оказывается много меньше длины волны.

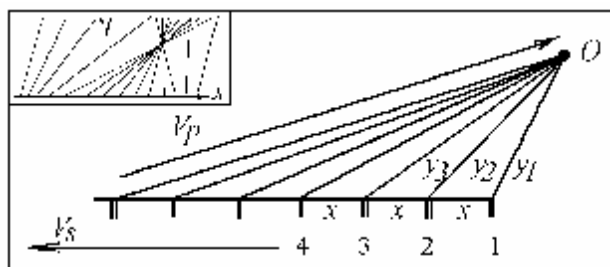


Рис. 8-8. Когерентное сложение Р-волн (в точке О) от раскрывающихся трещин (1, 2, 3, 4 – широкие вертикальные полосы, тонкие полосы - микротрещины) при распространении S-волны.

Иллюстрируем сказанное рисунком (рис. 8-8). 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 Р-волну, распространяющуюся в направлении ориентирования трещин, и S-волну, распространяющуюся поперек луча Р-волны. Рассеиваясь на микротрещине, S-волна приведет к её раскрытию, и каскад явлений повторится. В результате, в этом объеме образуется некоторое количество Р-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 Р-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 Р-волны от трещины 2: *Р-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 величина $x \approx 700$ мкм. (Что вполне реально). Таким образом, эта оценка показывает, что пересечение Р-волн от раскрывающихся микротрещин, расположенных на расстоянии друг от друга порядка 700 мкм, вполне возможно. 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 (О) – вершине волны (рис. 8-8). При этом возникает волна сжатия, в вершине которой плотность вещества среды и давление в волне возрастают. Такая волна может стать ударной.

Случай, когда все сходящиеся характеристики пересекаются в одной единственной точке – предельный. Более вероятна ситуация, при которой появляется целая область пересечений, в которой находится некая точка, называемая точкой возврата. Именно этой точке приписывается возникновение ударной волны. Считается, что в точке возврата появляется произвольный разрыв, при распаде которого, собственно, и возникает ударная волна. Величина начального разрыва может быть весьма малой: $e = (p_2 - p_1)/p$, где e - малый параметр. Разлагая в ряд формулы, характеризующие ударную волну (законы сохранения и адиабату Гюгонио), по параметру e и отбрасывая члены с e^3 , легко показать, что $p_1 \approx p_2$, $r_1 \approx r_2$ и т.д. Оценим величину $e(r)$ для случая возникновения трещин в напряженной среде. Предположим, что в см^3 среды плотностью r_1 образовалось n трещин, каждая длиной $l = 100$ мкм и «шириной» 10 мкм. Расстояние между трещинами $\approx 2l$. Объем одной трещины $\Delta V \approx 10^{-8}$ см^3 . Увеличение объема за счет одновременного возникновения n трещин $\Delta V n \approx 10^{-3}$ см^3 . Масса вещества среды, в которой образовалось n трещин, не изменилась, а объем, занимаемый этой массой, уменьшился на 10^{-3} . Отсюда: $(r_1 - r_2) / r_1 \approx 10^{-3}$, ($e \approx 10^{-3}$).

На рис. 8-8 изображена ситуация, в которой происходит пересечение волн от раскрывающихся трещин. Одновременный приход волн в одну общую точку (О) может привести к возникновению новой высокочастотной волны. Эта волна, по определению, не может распространяться на расстояние, большее 1 см. Как отмечалось выше, расстояние в 1 см определяет ширину фронта УВ (d). Возможно, аналогичная ситуация, когда волны пересекаются, может возникнуть и с «видеоимпульсами» сверхизлучения, если они могут возникнуть одновременно и достаточно близко друг к другу, чтобы эффект пересечения состоялся. В этом случае дальное действие системы трещин будет значительно больше, чем в случае взаимодействия отдельных трещин. Синфазное сложение видеоимпульсов наиболее вероятно, если они проявляют свойства солитонов (Заславский, Сагдеев, 1988). В случае такого сложения высокая частота (10 МГц) определяет ширину фронта УВ. Однако в этом случае условие: $t \sim 1/N$ может не выполняться, и сложение видеоимпульсов уже нельзя рассматривать как сверхизлучение.

Аддитивное сложение звуковых импульсов в ударной волне определяет ее энергию:

$$I = N \times (s^2/E) l^3, \quad (8-10)$$

здесь N - число трещин, принявших участие в формировании УВ. После генерации УВ, трещины, образовавшиеся в геологическом теле, «залечиваются» в течение некоторого времени, и затем система вновь готова к генерации ударной волны.

Если допустить, что объем активной геологической среды (объем очага землетрясения) составляет $V = 10 \times 10 \times 100$ км^3 , то $N = 10^{24}$, и энергия УВ: $I = 10^{24}$ эрг. Плотность энергии $I/V = 10^5$ эрг/ см^3 - примерно в 10 000 раз меньше, чем энергия,

запасенная в таком же объеме тротила. Эта энергия эквивалентна нагреву одного см^3 горной породы примерно на $0,01^\circ \text{C}$ и т.п. Соотнесем полученную нами оценку с плотностью энергии очага, принятой в сейсмологии. Например, согласно (Касахара, 1985), для землетрясения с $M = 8.6$, плотность энергии $E/V = 1000 \text{ эрг/см}^3$, что в 100 раз меньше, чем получилось у нас. Этот факт может говорить, например, о том, что достаточно, чтобы в процессе генерации приняли участие только 1 % трещин из всех имеющихся и т.п.

Как известно, энергия УВ в значительной степени сосредоточена в ее фронте. Примем толщину фронта равной 1 см, тогда объем фронта УВ: $V^* = 100\text{км} \times 10\text{км} \times 1\text{см} = 10^{13} \text{ см}^3$. Удельная энергия на фронте: $I^* = 10^{11} \text{ эрг/см}^3$ или, для нормальной плотности горной породы $\rho = 3 \text{ г/см}^3$, $I^* = 3 \text{ кДж/г}$. Давление на фронте УВ $\sim 10^{11} \text{ дин/см}^2$. Естественно, это завышенные оценки, однако, удельная энергия и давление на фронте такого уровня могут привести к сильному сжатию горной породы в ударной волне и её разрушению в волне разгрузки.

Принято считать, что характерное время землетрясения (Касахара, 1985) определяется размером тела (L) и скоростью сейсмических волн (V_p). Если, к примеру, принять: $L = 14 \text{ км}$, а $V_p = 7 \text{ км/с}$, то характерное время $t = 2 \text{ с}$. Отсюда следует, что чем сильнее землетрясение, тем длиннее “импульс” главного удара. Аналогичным образом можно оценить t в нашей модели. Однако для этого сначала необходимо выяснить, с какой скоростью распространяется постулированная нами УВ. По-видимому, можно считать, что ударная волна, вызывающая землетрясение, даже катастрофическое, «не самая сильная», по классификации Зельдовича и Райзера (1966). Такая волна распространяется в твердом теле с «акустической» скоростью $V_o = (V_p^2 - 4V_s^2/3)^{1/2}$, что для: $V_p = 7-8 \text{ км/с}$ и $V_s = 4-4.5 \text{ км/с}$ дает значение скорости УВ V_o примерно 5-6 км/с. Характерное время «импульса» землетрясения (по данным наблюдений) порядка 6-8 с.

Другая ситуация должна была бы наблюдаться, если в землетрясении реализовался бы режим сверхизлучения. Здесь (Dicke, 1954) длительность импульса $t \sim 1/N$, откуда следует, чем больше магнитуда (энергия) землетрясения, тем короче t . (Автоматически это приводит к тому, что мощность землетрясения $P \sim I/t$, оказывается $\sim N^2$). Если это время: $t < t_n$, где t_n - характерное время “накачки” (по аналогии с оптикой) образца горной породы упругой энергией, то реализуется режим сверхизлучения. Если имеет место обратное неравенство: $t > t_n$, то происходит сверхлюминесценция (и УВ не образуется). В случае примерного равенства: $t \approx t_n$, УВ генерируется в виде отдельных коротких импульсов. (Заметим, что практическая сейсмология «располагает» полным набором этих вариантов). Величину t_n можно оценить, привлекая кинетическую теорию прочности (Регель, Слуцкер, 1973).

Наша модель построена на взаимодействии трещин между собой по принципу: “трещина – волна – трещина”. В качестве экспериментального подтверждения такого взаимодействия мы используем тот факт, что в ряде лабораторных экспериментов, как отмечалось выше, обнаружен эффект внезапного, внешне ничем не инициированного, спонтанного роста акустической эмиссии (АЭ) в образцах горных пород при постоянной нагрузке (Журков и др., 1980; Ishido, Nishizawa, 1984). Более того, в этих экспериментах обнаружено, что гипоцентры АЭ в образце с течением времени группируются как во времени, так и в пространстве - объединяясь в кластеры (“пачки” импульсов) в некоторых областях образца (Журков и др., 1980; Lei et al., 1992; Jouniaux et al., 2001). Эти результаты можно считать экспериментальным подтверждением акустического сверхизлучения. По-видимому, мы можем полагать, что обнаруженные в лабораторных экспериментах эффекты возникновения кластеров (сверхизлучения - в нашей интерпретации), могут “проявиться” и в горных породах. Таким образом, можно считать, что идея сверхизлучения (и, как следствие ее, - генерация УВ) лабораторными экспериментами подтверждена.

Формирование ударной волны. Модель № 2. Теоретически проблема образования УВ, как результат кумуляции многих импульсов, рассмотрена в книге Зельдовича и Райзера (1966). Обозначим волновую переменную $j(x, t) = F(x - vt)$ через некоторую функцию аргумента $(x - vt)$, тогда условие постоянства φ при постоянстве аргумента можно записать в дифференциальной форме:

$$dj = (\partial j / \partial x) dx + (\partial j / \partial t) dt = 0. \quad (8-11)$$

При $dx/dt = v$ получается волновое уравнение, играющее фундаментальную роль в теории волновых процессов:

$$\partial j / \partial t + v(\partial j / \partial x) = 0. \quad (8-12)$$

Одним из решений этого уравнения является бегущая плоская гармоническая волна:

$$j(x, t) = A \sin(\omega t - kx - z_0). \quad (8-13)$$

Здесь, A - амплитуда, ω - частота, k - волновой вектор, z_0 - фаза.

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:

$$\partial j / \partial t + v_0(\partial j / \partial x) = -e j(\partial j / \partial x) + h(\partial^2 j / \partial x^2) - b(\partial^3 j / \partial x^3), \quad (8-14)$$

где e , h , b - константы, отражающие влияние, соответственно, нелинейности, диссипации и дисперсии. Относительно УВ возможны два решения: стационарная ударная волна описывается уравнением Бюргерса ($b = 0$) и УВ в виде отдельного импульса (солитона), уравнением Кортевега-де Фриза ($h = 0$). Нас, в дальнейшем, будет интересовать второе решение:

$$j = A \operatorname{sech}^2[(x - vt)/\Lambda], \quad (8-15)$$

где $\Lambda = (12b/eA)^{1/2}$, $v = v_0 + eA/3$, A - амплитуда. Характерная протяженность, "длительность" фронта L , УВ (солитона) тем меньше, чем больше A (условие сверхизлучения). С увеличением амплитуды A , УВ - убыстряется.

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. Стабилизирующим фактором, предохраняющим волну от опрокидывания, является дисперсионный механизм, т.е. наличие нелинейной зависимости частоты фурье-гармоник от волнового числа k :

$$\omega_k = kc - bk^3,$$

где c и b - константы, а c - имеет смысл скорости звука. Нелинейный член bk^3 ограничивает укручение УВ. Характерная ширина фронта УВ (солитона) имеет порядок:

$$\Delta x \sim (b/a)^{1/2},$$

где a имеет физический смысл увеличения скорости распространения УВ, по отношению к местной скорости звука (Заславский, Сагдеев, 1988).

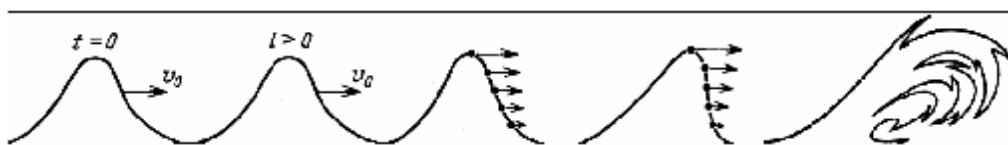


Рис. 8-9. Модель укручения и «опрокидывания» солитона (Заславский, Сагдеев, 1988).

Акустический «портрет» землетрясения. Акустически активную среду, в которой распространяется акустическое излучение, вызванное самой средой и приводящее, в конечном счете, к образованию ударной волны, можно рассматривать как «мутную» среду. Аналогичная ситуация возникает при излучении электромагнитных волн в мутную среду. Эта ситуация называется в физике как взаимное облучение. Принято считать, что

взаимное облучение среды светом имеет когерентную и некогерентную части. Вероятно, такой подход применим и к акустике. В этом случае когерентная часть акустического взаимного облучения может быть отнесена к кооперативным эффектам, которые приводят к качественному изменению характера облучения. В рассматриваемой нами ситуации, - к возникновению лавинного процесса и образованию ударной волны. Некогерентная часть взаимного акустического облучения характеризуется многократным рассеянием и проявляется как акустический фон. Очевидно, что доли когерентного и некогерентного излучения могут изменяться в процессе эволюции акустически активной системы. Смена режима некогерентного излучения на преимущественно режим когерентный, - должна приводить к уменьшению интенсивности излучения, принимаемого за - фоновое. Такой подход находит объяснение известному в сейсмологии эффекту «молчания» среды перед сильным землетрясением. Становится понятным и то, что, чем большие объемы напряженной геологической среды примут участие в когерентном процессе, иначе, чем мощнее будет землетрясение, тем процесс молчания должен быть длиннее.

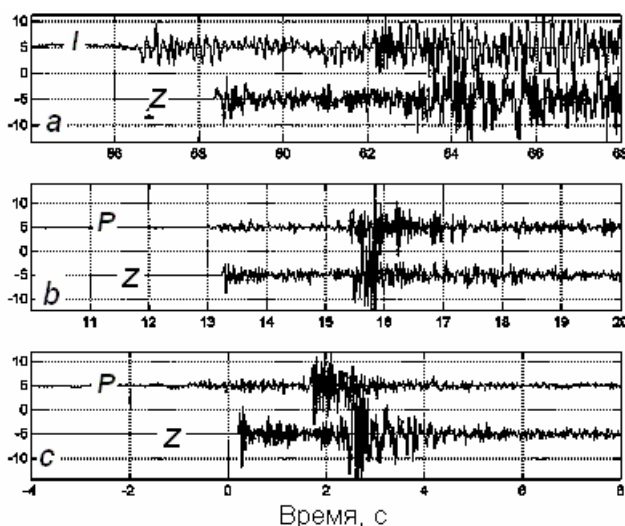


Рис. 8-10. Инфразвуковые сигналы (верхние кривые) и сейсмограммы (вертикальный канал Z, с/с "Акташ") землетрясений 5 ноября (a,b) и 8 ноября (c). Для наглядности кривые смещены по вертикали.

Приведем результаты наблюдений инфразвука, сопровождающего афтершоки Чуйского землетрясения, полученные автором совместно с С.Ю. Хомутовым на Алтае в 2003 году (неопубликованные данные):

- обнаружено, что акустический сигнал предшествовал сейсмическому примерно на 1 секунду и эта задержка не зависела от гипоцентрального расстояния. Вполне возможно, что обнаруженный нами акустический сигнал, предшествующий землетрясению, и есть явление подземного гула, который был иногда слышен перед толчком;
- линейная аппроксимация зависимости: $L = k dt$ по акустическим данным, дает величину коэффициента $k = 7.1$ км/с. Для величины L алтайских землетрясений используется соотношение $L = 8.2 dt$, где $L = [V_P V_S / (V_P - V_S)] dt$;
- временной интервал между первым и вторым вступлениями на звуке всегда больше аналогичного интервала в сейсмике (рис. 8-10). На этом рисунке приведены акустические и сейсмические отображения землетрясений. Видно, что запись сигналов от землетрясения в инфразвуке всегда значительно больше зашумлена, чем сейсмограмма. Кроме этого, в сигнале принятым микрофоном не наблюдается резкого, крутого переднего фронта, как это обычно видно на сейсмограммах. Эти факты свидетельствуют в пользу того, что "портрет" землетрясения в инфразвуке заметно отличается от привычной сейсмограммы.

Особенности распространения ударной волны. Рассмотрим наиболее важные для нашей модели моменты, связанные с характером распространения ударных волн в твердом теле.

Массовая скорость. В ударно-волновой модели землетрясения используется важная особенность физики ударных волн, заключающаяся в том, что распространение ударной волны по сплошной среде сопровождается «течением» этой среды за фронтом ударной волны с массовой скоростью u , которая зависит от интенсивности ударной волны, т.е. от величины ΔS (или p) на её 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 strike-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 (slip) и изменение этой подвижки во время основного удара (slip-velocity). В книге Аки и Ричардса (1983) спонтанное распространение сдвиговой трещины описывается формулой:

$$w(x_o, h_o) \approx - (2\pi m)^{-1/2} \int d\xi / (\xi_o - \xi)^{1/2} \int p(x, h) dh / (h_o - h)^{1/2}, \quad (8-16)$$

$w(x_o, h_o)$ – подвижка трещины в координатах x, h ; m – модуль сдвига; $x(h)$ – траектория движения кончика трещины; $p(x, h)$ – величина сброшенного напряжения.

Интегрирование этого уравнения приводит к формуле для подвижки:

$$w(x_o, h_o) \approx - b p_o t / m$$

$b = (m/r)^{1/2}$ – скорость сдвиговых волн (V_S), t – текущее время процесса.

Положим: $w/t = u$ – скорость распространения трещины: $u = V_S p_o / m$, подставляя значение m , получаем: $u = p_o / V_S r$, или $p_o = u V_S r$ – связь между скоростью распространения трещины, величиной сброшенного напряжения и акустическими параметрами среды. Для параметров среды, соответствующих Нортриджскому землетрясению ($u = 1$ м/с), величина p_o совпадает с $\Delta S = 100$ бар.

Как известно в физике ударных волн, величина сжатия среды Δp после прохождения по ней ударной волны, оценивается (Зельдович, Райзер, 1966):

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

где u , как и раньше, медленная массовая скорость течения среды за фронтом ударной волны, $r c$ – акустическое сопротивление среды. Если принять: $u = 1$ м/с, а $r c = 3 \text{ г/см}^3 \times 5 \text{ км/с}$, то окажется, что величина Δp порядка 100 бар. Совпадение этих оценок не случайно 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 slip 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 УВ, а, в пределе, – длительности импульса УВ.

Заметим, что Аки и Ричардс, обсуждая проблему землетрясения как сейсмического источника, не замыкаются только на образовании 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 землетрясения, 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.

Расщепление ударной волны в очаге землетрясения. Очаг землетрясения в сейсмологии изучается не только по характеру разрушений и направлению подвижек земной поверхности в непосредственной близости от эпицентра разрушений. Значительно больше информации об очаге получают, как правило, по данным наблюдений на удаленных от очага сейсмостанциях. Эта информация переносится объемными волнами. Давно известно, что характер подвижек в окрестности очага (сжатий и разрежений) повторяется в фазе вступления объемных волн. Таким образом, модель очага, претендующая на адекватное описание процессов, должна находить объяснение этому известному факту.

Из физики ударных волн, распространяющихся в твердых телах при движении ударной волны со скоростью $c_0 < V_P$, известно, что на неоднородностях земной коры и литосферы очага землетрясения, может происходить расщепление ударной волны. С расщеплением связано возникновение волны растяжения и, кроме этого, генерация «пластических» и объемных волн. Далекими сейсмостанциями фиксируются именно те объемные волны, которые возбуждаются в очаге при расщеплении ударной волны. По характеру распространения этих волн обычно делается заключение о механизме очага землетрясения.

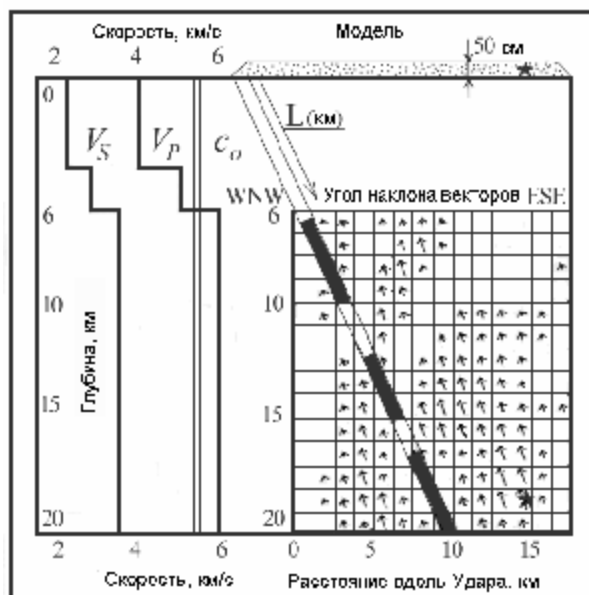


Рис. 8-11. Модель разрывов Нортриджского землетрясения (справа) (Somerville et al., 1996; Zeng, Anderson, 1996). В левой части рисунка - распределение скоростей P-, S-волн и ударной волны c_0 - по глубине (Shen et al., 1996).

Рассмотрим процессы, сопутствующие распространению УВ по очагу землетрясения, т.е. по геологической среде, от места образования УВ – гипоцентра землетрясения, до поверхности Земли. Положим, что геологическая среда обладает неоднородностями в виде слоистости, трещиноватости, резких изменений плотности и скорости звука и т.п. На принятом в физике ударных волн языке, все неоднородности можно считать слабыми разрывами. Приведем несколько положений теории этих явлений, имеющих непосредственное отношение к физике землетрясения в рамках ударно-волновой модели на примере Нортриджского землетрясения.

На рис. 8-11 справа, изображена модель разрывов Нортриджского землетрясения. В левой части рис. 8-11 показано одномерное распределение скоростей сейсмических P- и S- волн по глубине (Shen et al., 1996). На рис. 8-11 отчетливо видно, что уменьшение скоростей P- и S-волн соответствует глубине 6 км. Отметим, что именно на этой глубине

наблюдается исчезновение векторов slip. Видно, что структура векторов не равномерная, а состоит 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. В работе (Zeng, Anderson, 1996) показано, что главный удар землетрясения в Нортридже, состоит из трех, следующих друг за другом, импульсов. Длительность главного удара землетрясения, по основанию импульса, составляет $t \approx 8$ сек. Скорость разрыва равна $V = L/\tau = 2.8$ км/с. Как следует из (Shen et al., 1996), величины slip векторов 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 $\sim 60 - 70^\circ$.

Согласно наблюдениям, объемные волны возбуждаются на всем протяжении очага - от эпицентра землетрясения, практически до поверхности Земли. Обратим внимание на такую деталь, следующую из работы (Somerville et al., 1996): на глубине двух-трех километров и выше (рис. 8-11), т.е. вблизи земной поверхности, генерации объемных волн не наблюдается.

Для решения этой задачи обратимся к физике распространения УВ и образования ВР в сплошной среде. Волна разгрузки может образоваться не только при выходе УВ на свободную поверхность, а, как показано Зельдовичем и Райзером (1966), и при прохождении ее через вещество, нагруженное внешним давлением. Для этого необходимо выполнение ряда условий: Вещество должно быть сжато внешним давлением до величины порядка предела текучести материала ($p_{кр}$). Амплитуда УВ должна быть больше $p_{кр}$. В этом случае возбуждаются и распространяются по среде две волны, одна - «упругая», со скоростью v_p , другая - «пластическая», со скоростью $c = (K/r)^{1/2}$. УВ расщепляется на упругую и пластическую волны. По нагруженному телу «бежит» ударная волна разгрузки в сторону, обратную распространению УВ. Кроме этого, может образоваться еще и пластическая волна разгрузки, «двигающаяся» вслед за ударной, но с меньшей скоростью.

Описанное явление - не теоретическое предположение, оно реально наблюдалось в экспериментах с боковой разгрузкой ударных волн (Зельдович, Райзер, 1966). Заметим, что если скорость УВ значительно выше, чем местная скорость звука, расщепления волн вообще не происходит.

Соотнесем сказанное к нашей модели. Предположим, что предел текучести материала среды ($p_{кр}$) порядка 1 кбар. Это давление примерно соответствует глубине около 3 км. Кроме этого, по нашим оценкам, скорость УВ примерно (5 - 6) км/с. Скорость распространения Р-волн такого порядка значений, соответствует глубине около 2 - 3 км. Отсюда следует, что на глубинах меньших 2 - 3 км расщепления УВ и генерации ВР происходить не может. Действительно, этот эффект наблюдался при землетрясении в Нортридже. Здесь, на вертикальном разрезе (рис. 8-6), проходящем через гипоцентр землетрясения, определены вектора подвижек, соответствующие интенсивности объемных волн (Somerville et al., 1996). Как следует из этой работы, все волновые векторы направлены под углом $\approx 45^\circ$ к горизонту, а их интенсивности изменяются, от максимальной до нуля, вдоль плоскости разреза. На малых глубинах (2 - 3 км) векторов подвижек нет. Они не наблюдаются так же в некоторых более глубоких областях разреза. Полученный результат можно интерпретировать (в рамках нашей модели) следующим образом: На малых глубинах нет эффекта расщепления УВ, поэтому не возникает ВР, поэтому нет и генерации объемных волн. Факт, что генерации объемных волн в некоторых частях разреза не происходит, может говорить, например, о том, что УВ, на своем пути, встречается с ослабленной зоной среды очага. В этой зоне не происходит расщепления УВ, либо она пересекает область пространства, в которой, по ряду причин, скорость звука значительно ниже скорости распространения УВ, что тоже может служить

препятствием к расщеплению УВ и т.п. Заметим, что развиваемый нами подход находит простое и естественное объяснение еще одному явлению. Речь идет о том, что при взрывах атомных и водородных зарядов, сейсмостанциями регистрируется только волна сжатия и никогда не записывается волна обратного знака. По-видимому, это связано с тем, что ядерные заряды подрывают на таких небольших глубинах, на которых не может происходить расщепления УВ и, соответственно, генерации объемных волн.

Взаимодействие ударных волн на поверхности. Рассмотрим волновую картину процессов формирования в недрах Земли УВ, движение её к дневной поверхности, возникновение ВР и взаимодействие волн. Воспользуемся приемом из практики изучения УВ. Изобразим рассматриваемые процессы на xt -диаграмме, где x - координата, а t - время. Обозначим x_0 , t_0 - координату и время выхода УВ на свободную поверхность (см. рис. 8-7).

Предположим, что в земной коре, на глубине между 40-50 км ($x = 0$) и 15-20 км ($x = x_b$), расположено геологическое тело, обладающее вполне определенными свойствами:

- во-первых, это должно быть прочное тело, способное к накоплению упругой энергии и активному трещинообразованию;
- во-вторых, тело должно быть изотропным, т.е. в нём не должно быть внедрений вещества, со свойствами отличными от свойств тела (плотность и скорость звука);
- характер нагрузки тела (в третьих) должен быть таким, чтобы в нем могла возникнуть пространственно когерентная структура микротрещин или, иначе, - дальний порядок;
- в четвертых, в этом теле должны раскрываться трещины вполне определенного размера, не более 100-200 микрон, которые потом, после события, могли бы “залечиться” так, что тело могло бы быть готово к очередному событию, и т.п.

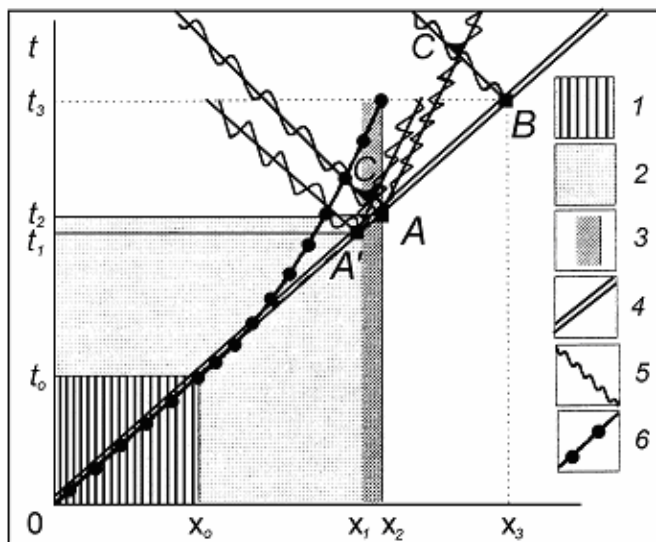


Рис. 8-12. Выход ударной волны (УВ) на свободную поверхность (в точке x_0 , t_0). УВ выходит на свободную поверхность и образует волну разгрузки (ВР), “двигающуюся” в обратном (по отношению к УВ) направлении. Длительность импульса УВ Δt , за это время УВ проходит по земной поверхности расстояние Δx .

При выполнении этих требований в т.н. сейсмоактивной среде такого геологического тела (1 на рис. 8-12) возможно возникновение акустического стимулированного сверхизлучения и образование УВ. УВ возникает, как правило, в тот момент, и в том месте, где скорость распространения волны (6) в среде превысит местную скорость звука. В нашей модели, это, скорее всего, произойдет на границе (3)

геологического тела (2) с окружающей его средой, в которой местная скорость звука ниже, чем в теле.

В точке (x_0, t_0) УВ (4) выходит на свободную поверхность (см. рис. 8-12) и образует ВР (5), “двигающуюся” в обратном (по отношению к УВ) направлении. Длительность импульса УВ Dt конечна, за это время УВ проходит по земной поверхности расстояние Δx .

Обратим внимание на то, что волна разрежения (ВР) в среде с нормальными термодинамическими свойствами образоваться может, но распространяться - нет (теорема Цемплена) (Зельдович, Райзер, 1966). Взаимодействие фронтов УВ и ВР происходит практически в точке возникновения ВР. (Поэтому, выражения типа: “бегущая” волна разрежения, - взяты в кавычки). Как известно, на фронте УВ происходит сжатие вещества среды, а в области фронта ВР - растяжение. Взаимодействие фронтов этих волн приводит примерно к удвоению величины растягивающих напряжений - разрывов. Это явление аналогично тому, как в электромагнитной волне, распространяющейся вдоль линии, возникает удвоение напряжения на ее разомкнутом конце.

Косое падение УВ. Рассмотрим пример, когда УВ подходит снизу к дневной (свободной) поверхности (“падает”) под некоторым углом. Из сейсмических наблюдений этот угол, соответствующий направлению “главного удара” (main shock) землетрясения, находится в пределах 40-50° к горизонту. Например, при Спитакском землетрясении (1988, Армения) угол равен примерно 50°, а при Нортриджском (1994, США, Калифорния) - 40° и т.п. Наша модель позволяет определить область (эпицентр) разрушений такого землетрясения: Расстояние вдоль направления распространения УВ равно $\approx \Delta x$, а поперек направления - равно линейному размеру очага. Например, в Нортридже длительность импульса УВ (в нашей интерпретации) составляла ≈ 8 с, что при скорости распространения УВ $\approx 5 - 6$ км/с, определяет область разрушений $\Delta x \approx (30 - 40)$ км. Причем, что характерно для землетрясений с косым падением УВ, 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 (Harp, Jibson, 1996). Аналогичная ситуация наблюдалась и в Спитаке, и во многих других землетрясениях.

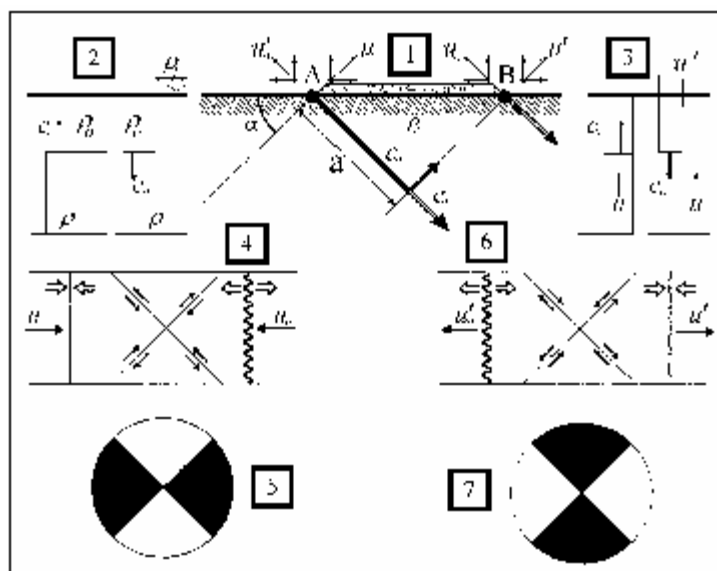


Рис. 8-13. Выход фронта ударной волны (шириной a) на поверхность Земли под углом α к линии горизонта. Пояснения в тексте.

Акцентируем внимание на процессах, сопровождающих выход не слишком сильной ударной волны на поверхность (см. рис. 8-13). Выход ударной волны под углом к линии горизонта изображен на рис. 8-13-1. Здесь фронт ударной волны, шириной a ,двигающийся со скоростью c_o , подходит под углом α к земной поверхности, вещество которой обладает плотностью r . 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_o . При отражении возникает быстро затухающая волна разгрузки (разрежения, растяжения), движение которой сопровождается перемещением вещества со скоростью u_o . 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 во время Чуйского (Геодаков и др., 2003) и Нортриджского землетрясений (Shen et al., 1996).

На участке АВ может возникнуть система сил, направленных друг навстречу другу соответственно тому, как направлены горизонтальные компоненты массовых скоростей: $u - u_o$ (рис. 8-13-4), либо $u' - u_o'$ (рис. 8-13-6).

На рис. 8-13-2 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 r_1 (меньшей r_o) находится выше начального уровня. Аналогичная картина представлена на рис. 8-13-3, где изображены скорости в нормально падающей ударной волне со скоростью c_o и массовые скорости u и $u' \gg 2u$ до выхода ударной волны на поверхность (слева) и после её выхода на поверхность. На рисунках 8-13-5 и 8-13-7 изображены разломные диаграммы, соответствующие ситуациям, изображенным на рисунках 8-13-4 и 8-13-6. Темные секторы диаграмм показывают области сжатия, светлые – растяжения.

Таким образом, 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 (система GPS).

Взаимодействие ударных волн с преградой. Отколы и разрушения. Предложим принципиально новый механизм сильных движений среды при землетрясении. Он основан на известной физике взаимодействия волн, возникающих при выходе ударной волны на «свободную» поверхность твердого тела. Наиболее полно этот вопрос рассмотрен в книге (Забабахин, 1997), 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 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. При выходе ударной волны на поверхность твердого тела 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. В книге (Забабахин, 1997) рассмотрены четыре возможных типа распада разрыва, из которых нас будет интересовать лишь четвертый. Все типы распада разрыва изображены на рис. 8-14 (сверху вниз):

- Образование двух ударных волн. Такой тип распада встречается при выходе УВ из более «мягкого» вещества в более «жесткое».

- 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.

- 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. 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.

- Образование двух волн разрежения и разрыва сплошного вещества возможно 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.

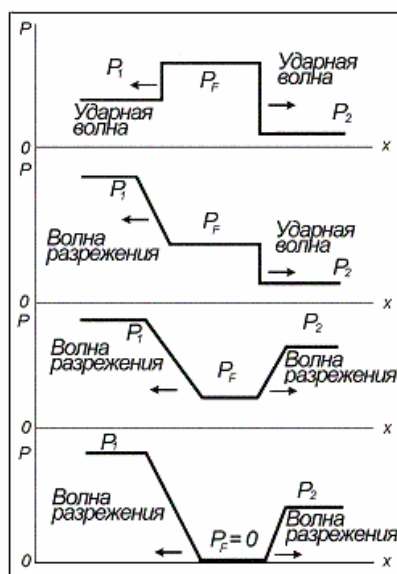


Рис. 8-14. Возможные типы распада разрыва (Забабахин, 1997). Давления P_1 и P_2 – на фронтах УВ и ВР, давление P_F – в теле, после прохождения по нему этих волн. Стрелки – направления распространения волн.

VIII. 3. Особенности сильных движений при землетрясении.

В течение последних 10 – 15 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 Анжелеса было зарегистрировано примерно 150 приемниками GPS (Global Positioning System) 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° СВ от разлома Сан Андреас, в момент Паркфилдского землетрясения 1966 г. Зависимость ускорения, скорости и величины смещения, грунта Паркфилдского землетрясения 1966 г., приведены в книге Аки и Ричардса (1983). 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 неё 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 метрах от разлома более 50 см/с), волновое число $k = w/u \approx 0.1$ см⁻¹. Величины k и w для волн на поверхности жидкости связаны дисперсионным уравнением:

$$w = [g k + (a k^3)/r]^{1/2},$$

где r - плотность среды, g – ускорение силы тяжести, a - 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 a оказывается порядка 10⁵ дин/см (для сравнения a : воды ≈ 70 дин/см, литосферы $\approx 10^{19}$ дин/см). 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.

Откольные явления в грунтах. Приведем результаты экспериментов по исследованию явлений отколов в грунтах, возникающих при взрывах в скважинах, выполненных более 30 лет тому назад (Гвоздев, Кузнецов, 1967). Эксперимент состоял в регистрации коротких импульсов от взрыва небольших зарядов взрывчатых веществ (ВВ), 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 ВВ, на регистраторе появлялся второй импульс, следующий за первым, причем обратной полярности. С появлением второго импульса наблюдались отколы. Расположение 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.

Особенности сильных движений землетрясений. Физику землетрясений нельзя понять, если базироваться только на теоретических моделях, натуральных 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.

Муйское землетрясение ($M = 7.6 - 7.9$, 57/06/27). В районе северного Байкала в 1957 г. не было разветвленной сейсмологической сети, тем не менее, тщательное изучение

геологической структуры этого землетрясения позволяет отнести его к достаточно хорошо изученным. Дело в том, что этот район подробно изучен с помощью методов глубинного сейсмического зондирования - ГСЗ (Крылов и др., 1993). Методы ГСЗ позволяют выявить объемные, трехмерные, глубинные неоднородности литосферы. Одним из наиболее интересных для нас результатов использования этого метода, было детальное изучение пространственных неоднородностей распределения скоростей продольных волн в очаговой области катастрофического Муйского землетрясения, произошедшего 27 июня 1957 г., его магнитуда оценивается в 7.6-7.9, интенсивность - 10-12 баллов, энергетический класс - 17, глубина очага около 15 км.

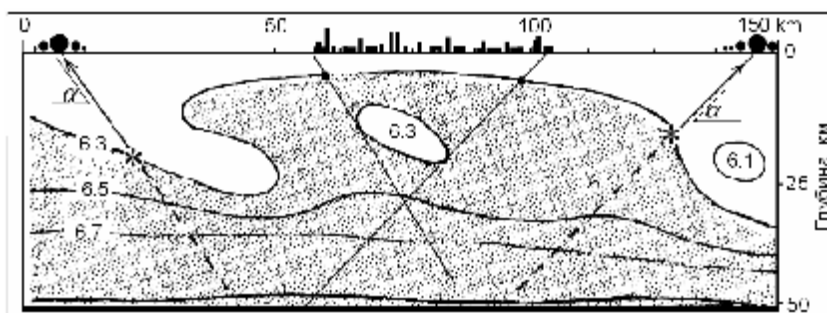


Рис. 8-15. Сейсмический разрез земной коры в Муйском районе Байкальской рифтовой зоны по данным скоростей Р-волн (Крылов и др., 1993).

Сейсмическая активность этого района, по данным наблюдений за период 1962-1979 гг., повышена в западной и северо-восточной частях района (Левая и правая части рисунка). Именно на этих участках располагаются эпицентры инструментально зарегистрированных землетрясений 12-го и более высоких энергетических классов. Подавляющее большинство таких землетрясений произошло после Муйской катастрофы (северо-восток изучаемого района, на рис. справа). В его западной части, сильнейшим было Северобайкальское землетрясение 1917 г. (энергетический класс $K = 16$, магнитуда 6.6-6.7, интенсивность - 9 баллов, на рис. слева), глубина гипоцентра грубо оценивается в 15-20 км. В разделяющей эти участки зоне "сейсмического затишья" (рис. 8-15, между 50 и 100 км, где можно построить «город») в текущем столетии не зарегистрировано ни одного землетрясения с $K > 12$.

В районе эпицентра Муйского землетрясения на территории около 60 тыс. кв. км методом ГСЗ проведены детальные площадные и профильные наблюдения, получено около 1600 зондирований. Выявлена область повышенной скорости, вытянутая в северо-восточном направлении и распространяющаяся в нижнюю часть земной коры вплоть до ее подошвы. Область высокой скорости включает в себя зону сейсмического затишья и два района активизации. Резкие краевые неоднородности области совпадают с гипоцентрами двух сильных землетрясений. Авторы считают эту область глубинным накопителем упругой энергии. В этом случае слагающие ее горные породы должны обладать повышенной прочностью и энергоемкостью. Вероятными местами разрядки накопившейся энергии могут служить ослабленные участки на контактах высокопрочного объема с вмещающей его средой. Авторы при анализе записей колебаний сдвиговых волн не обнаружили эффектов их расщепления на SV- и SH-составляющие, что позволяет считать среду изотропной. Надо сказать, что отображение крупных черт глубинного строения по Р- и S-волнам близки. Рассматриваемое тело, несмотря на существование в нем локальных внутренних неоднородностей, в целом характеризуется относительным увеличением плотности и обоих упругих модулей. В его пределах модуль сдвига увеличен на 15-20 % от среднего значения в изученной области. Как следует из рисунка 8-15, в рассматриваемом нами сейсмически активном теле (области) скорость Р-волн, от слоя М в

направлении к земной поверхности, вплоть до границы тела с вмещающей средой, постепенного уменьшается, а на его границе - убывает довольно резко.

Таких примеров, когда гипоцентры сильных землетрясений совпадают с акустической границей геологического тела, можно привести довольно много. Сюда можно с уверенностью отнести землетрясения в Нортридже и Лома Приета (США), в Кобе (Япония), в Спитаке (Армения) и т.д. Допустим, нагрузка на геологическое тело представляет собой сумму нагрузок: литостатической и тангенциальной. Главный «удар» землетрясения может произойти под углом 45° к горизонту. Если, кроме этих сил, на среду действует ещё какая-то другая сила, например, такая, как в случае с Паркфилдским землетрясением, то суммарная нагрузка может оказаться не нормальной к горизонту, как раньше, а иметь угол наклона её вектора порядка 45° . Главный удар такого землетрясения может произойти вертикально вверх, - вдоль плоскости разлома. Очевидное условие возможности такой ситуации, следующее из нашей модели, заключается в том, что сила и характер литостатической нагрузки должны соответствовать сдвиговой, или иначе, касательному напряжению. Гипоцентры Байкальских и Калифорнийских землетрясений приурочены к некоторой скоростной, акустической «границе» геологического тела. Такая ситуация просматривается для всех хорошо изученных в последнее время землетрясений.

Нортриджское землетрясение ($M = 6.7$ 94/01/17). Любая теория явления, а так же 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 BSSA (Northridge, 1994)

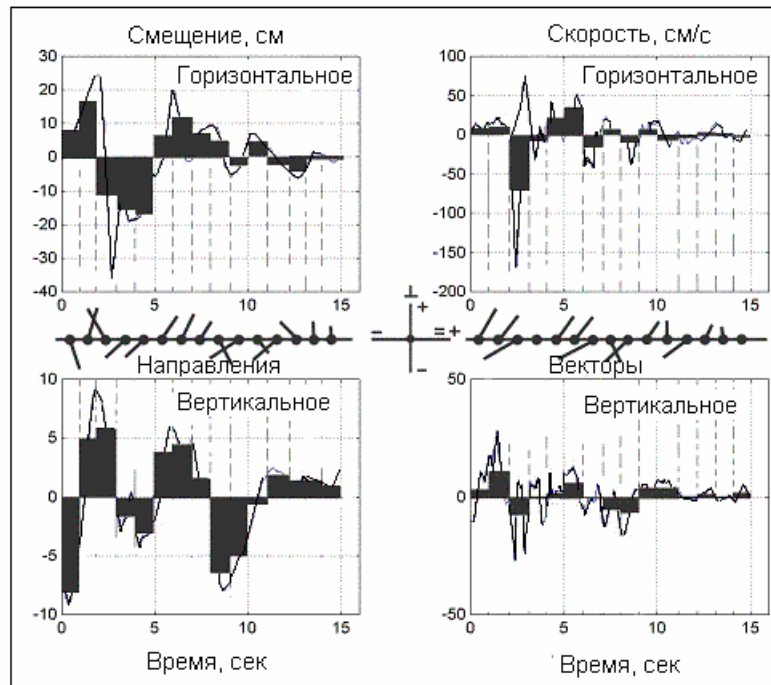


Рис. 8-16. Временная зависимость продольных компонент (transverse, vertical) скоростей и смещений, записанных на станции Van Norman Complex (Bardet, Davis, 1996).

Нортриджское землетрясение, одно из наиболее изученных, - было выбрано для проверки нашей модели. Оно произошло вблизи 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 (Bardet, Davis, 1996), 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., координаты гипоцентра: 32.2° N ; 118.5° W ; глубина 16.6 км. Сейсмический момент $1.2 \cdot 10^{26}$ дин см. Ориентация strike: 131° ; dip: 50° ; rake: 115° . Размеры разрывов 20×20 км. Скорость разрывов 2.8 км/с. Сброс давления $\Delta S = 100$ бар (Anderson, Yu, 1996). Рисунок 8-16 показывает величины вертикальных и горизонтальных (long) амплитуд и скоростей перемещений грунта, измеренных на Van Norman Complex (Bardet, Davis, 1996). Черные прямоугольники на рис. 8-16 соответствуют усредненным за 1 секунду величинам направлений смещений и векторов скоростей. Анализируя амплитуды и скорости перемещений грунта, приведенные на рис. 8-16, 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/l не менее $1/5$, что говорит о неустойчивости волн (Условие устойчивости: $h/l < 1/2\pi$).

Чуйское землетрясение на Горном Алтае ($M = 7.5$, 03/09/27). На юге Горного Алтая, на территории Кош-Агачского района, 27 сентября 2003 г. в 11 час. 33 мин. по Гринвичу произошло сильное землетрясение с магнитудой 7.5. Землетрясение сопровождалось афтершоками, наиболее сильные из них два: первый - 27.09.03 в 18 час. 52 мин. по Гринвичу с магнитудой $M = 6.4$ и второй - 1.10.03 в 1ч. 03 мин.28 сек. по Гринвичу с магнитудой 7.0. Главный удар афтершока 1 октября произошел в районе пос. Акташ (место расположения сейсмостанции), где отмечались повреждения зданий 7-ми, 8-ми бальной интенсивности.

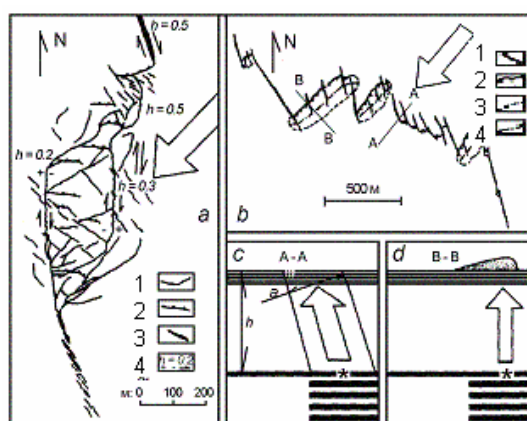


Рис. 8-17. Слева: (a) структура сейсморазрыва на водоразделе рек Чаган и Елангаш: 1 – закрытые трещины и разрывы, 2 – валы вспучивания, 3 – сейсморвы, 4 – амплитуда (м) и направления смещения. Большая стрелка – направление главного удара, параллельные стрелки – направления подвижек почвы. Справа сверху: (b) структура сейсморазрыва на водоразделе р. Талдура-Кускуннур. 1 – сейсморвы; 2 - бровки валов вспучивания; 3 – контуры валов вспучивания; 4 – оси валов вспучивания (Геодаков и др., 2003). Справа внизу: (c, d) разрезы по А-А и В-В, звездочка – гипоцентр, стрелка – направление главного удара, а - фронт УВ.

Очаг землетрясения, в ходе вспарывания земной коры, «вышел на поверхность» в виде системы первичных сейсморазрывов. Эта система прослеживается на протяжении 20 км в бассейне р. Чаган-Узун на восточном погружении Северо-Чуйского хребта (рис. 8-17). Первичный характер разрывов характеризуется их морфологией и то, что эти трещины представляют собой систему параллельных рвов, секущих различные формы рельефа. Эта система вытянута в северо-западном направлении на протяжении 20 км.

Сеймотектонические разрывы представляют собой эшелонированную систему трещин сжатия и расширения, укладываемую в линию СЗ простирания. Такая структура сеймотектонического разрыва, по мнению авторов (Геодаков и др., 2003), 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 СЗ ориентировки (рис. 8-12-а). 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, так же как современные, были следствием разрядки одного и того же очага. 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.

VIII. 4. Глубокофокусные землетрясения.

Каков же механизм землетрясений глубинных? Известно, что ни одна из когда-либо рассматриваемых моделей очага не способна ответить на него вразумительно...

Будем исходить из того, что высказанная нами УВ модель верна и, действительно, и разрушения на земной поверхности, и генерация объемных волн в очаге землетрясения, и причина появления афтершоков, - всё это следствия одного явления - генерации ударной волны в области очага землетрясения. В этом случае, естественно, возникает вопрос, каким образом может возникнуть УВ на глубине 700 км, где среда ведет себя скорее как жидкость, чем как кристаллическое тело? Будем иметь ввиду гениальную мысль, высказанную Ньютоном: «Природа проста и не роскошествует различными причинами вещей». Вспомним, что землетрясение, это способ сброса и перераспределения энергии тектонических напряжений. В основе этого способа положены механизмы разрыва сплошности среды путем образования трещин. Это общепринятая точка зрения. Она используется и в нашей модели.

Если в литосфере на глубине 500 - 700 км могут возникнуть разрывы сплошности, то это, скорее, будут уже не трещины, а «пузыри». По аналогии с раскрывающейся трещиной, при схлопывании пузыря также возникает звуковой импульс (кавитация, или холодное кипение). Предположим, что звуковые импульсы от схлопывающихся «пузырей» могут возникнуть одновременно и когерентно, и, складываясь, могут образовать УВ. В качестве подтверждения того, что эта идея имеет основания, приведем данные, где показано, что ударная волна усиливается при прохождении слоя кавитирующих пузырьков (Накоряков, Донцов, 2000). По-видимому, можно полагать, что раз УВ усиливается в такой среде, то она может там и возникнуть.

Проблема физики землетрясений, гипоцентры которых приходятся на глубины 300-700 км, всегда занимала сейсмологов. Разрушения, производимые этими землетрясениями, ничем не отличаются от разрушений, вызываемых землетрясениями, произошедшими на

небольших глубинах. То же самое можно сказать и о волновой картине очага. Естественно, землетрясение, произошедшее на глубине в несколько сотен километров, оказывало влияние на значительно большие площади и ощущалось на значительно больших расстояниях. Известно, что глубокие землетрясения отличаются от неглубоких тем, что у глубокофокусных землетрясений отсутствуют афтершоки. Среди сейсмологов принято считать, что основная причина глубоких землетрясений состоит в том, что на глубинах 500-660 км (Willemann, 1991) происходит фазовый переход оливин-шпинель, который и формирует сейсмическую зону и служит причиной разрыва сплошности среды. Именно этим объясняется зависимость интенсивности сейсмичности от глубины, имеющей явный максимум на глубине 580-600 км (Willemann, 1991). Напряжение s в этом случае зависит от величины энтальпии фазового перехода U и температуры окружающей среды T :

$$s = (e/A) \exp(U/nRT).$$

Соотношение между величинами U и T определяет глубину максимальной сейсмичности.

Особенности глубокофокусных землетрясений. Анализ глубин, на которых чаще всего происходят глубокофокусные землетрясения, проведенный большим количеством авторов (сошлемся на одну из самых последних работ, статью Горькавого и др., (1999)), показал, что они распределены по глубине далеко неравномерно. Как правило, землетрясения в основном происходят на малых глубинах, и с ростом глубины их становится всё меньше и меньше. Однако в этой зависимости наблюдается некоторая странность. Многие авторы в своих работах выделяют область заметного увеличения числа землетрясений на глубинах 550-650 км относительно их количества на меньших глубинах. Чем же характеризуется эта область мантии? Действительно, эти глубины характеризуются рядом особенностей.

Глубина 650 км была впервые выделена Кардером при анализе данных ядерных взрывов по резкому изменению скорости Р-волн (Буллен, 1978). Многочисленные последующие исследования подтвердили присутствие аналогичных изменений скоростей продольных волн на этих глубинах. В связи с этим обстоятельством, Буллен разделил зону мантии S , на две: S_1 и S_2 с границей между ними на глубине 650 км. Согласно РЕМ модели Земли (Жарков, 1983) на глубине 670 км плотность увеличивается на 0.3 г/см^3 (от 4 г/см^3 до 4.3), скорости Р- и S-волн, соответственно, от 10 до 10.9 и от 5.4 до 6.1 км/с. Величина литостатического давления на глубине 670 км составляет примерно 240 кбар. Температура вещества мантии (Жарков, 1983) увеличивается на границе 670 км от 2000 К до почти 2800 К, максимально приближаясь в этой области к кривой плавления. Следует обратить внимание на то, что таких границ, где скорость сейсмических волн резко возрастает, в мантии две. Первая находится на глубине 420 км, вторая – на глубине 670. В отличие от 670 км границы, около границы 420 км, как известно, увеличения концентрации землетрясений не наблюдается. В сейсмически активных регионах можно выделить ещё две сейсмических границы, на которых происходит не увеличение скоростей сейсмических волн, а, наоборот, их понижение. Это т.н. зона Гутенберга (80 – 100 км) и зона Леман (200 км). Именно эти зоны принято считать астеносферой. Особенностей изменения концентрации землетрясений с глубиной в этих зонах не наблюдается. Объяснение физики глубокофокусных землетрясений должно найти причину их приуроченности к границе 670 и «игнорирование» других сейсмически выделенных границ в мантии. Такое объяснение, если оно, возможно, должно найти и физику появления самих сейсмических границ. Только в этом случае модель можно считать приемлемой.

Физика глубокофокусных землетрясений. Отметим ряд проблем, связанных с физикой глубокофокусных землетрясений. Гутенберг (1963) утверждал, что Берч связывал глубокофокусные землетрясения с гипотетическими фазовыми превращениями в мантии. Однако существуют различные доказательства, считал Гутенберг, того, что глубокие

землетрясения вызываются теми же системами напряжений и сдвиговыми процессами, что и неглубокие. Анализ первых движений в волнах, приходящих от землетрясений, показывает, что и в мелких, и в глубоких землетрясениях превалирует один и тот же механизм движения в источнике.

Надо сказать, что большинство сейсмологов считает, что в целом механизм очага глубокофокусных и землетрясений средней заглубленности аналогичен механизму более мелкофокусных (Касахара, 1985). Этот вывод базируется на том основании, что картины излучения очагом Р- и S-волн идентичны для мелкофокусных и глубокофокусных землетрясений. Принято считать, что механизм очага глубокофокусного землетрясения связан с разрушениями сдвигового типа, происходящими на большой глубине. В этом случае особо оговаривается, что разрушения не могут быть хрупкими, как это считается принятым для мелкофокусных землетрясений. При разработке физики очага глубокого землетрясения Касахара рекомендует учитывать эффекты, связанные с высокими давлениями и температурой. Эти эффекты состоят в следующем: а) предельно высокое трение, препятствующее скольжению, б) хрупко-пластический переход, в) релаксация напряжений при пластическом течении. Процессы, приводящие к возникновению землетрясений на глубине 600 км, где прочность пород оценивается в 400 кбар, должны быть связаны с механизмами пластических течений и разрушений. Фрикционное разрушение принятое как механизм очага мелкофокусных землетрясений неприменимо для - глубокофокусных. Все механизмы глубокофокусных землетрясений делятся между собой по тому, существенна ли для них сдвиговая неустойчивость или нет, а так же по тому, какой тип разрушения в них принят – хрупкое или вязкое. Как правило, при построении модели очага глубокофокусного землетрясения используются давно известные механизмы, в частности, такой как, прерывистое скольжение, основанное на дегидратации горных пород. Проще, речь идет об использовании выделения воды из породы для обеспечения необходимой для скольжения смазки. Другим возможным механизмом считается пластическое разрушение под давлением. Этот механизм основан на идее сдвигового плавления, локального увеличения температуры, скорости диссипации энергии. Считается, что сейсмологические данные не подтверждают механизм плавления в области очага землетрясения. Как некоторую модификацию этого механизма можно рассматривать идею Моги относительно частичного плавления в очаге. Ранее рассматривалась гипотеза о возможности взрывных фазовых переходов как механизма очага. Этот механизм предполагал изменение жесткости среды, в то время как плотность и сжимаемость изменяться не должны. Всё это противоречило принятой в сейсмологии картине глубокофокусного землетрясения, так как не вписывалось в квадрантный тип излучения очагом сейсмических волн. Обсуждая различные модели очага, Касахара признает, что вопрос о механизме глубоких землетрясений остается открытым, несмотря на оживленные дискуссии среди сейсмологов. С момента выхода книги Касахары прошло около 15 лет. В ней он высказывал надежду на то, что успехи плитной тектоники подскажут механизм очага глубокофокусных землетрясений. Этого так и не произошло, и в наше время механизм глубокофокусных землетрясений остается не менее загадочным, чем ранее. Подобная ситуация обязана стимулировать разработку иных, принципиально новых гипотез.

Оценки величины энергии глубокофокусного землетрясения. В более ранних УВ моделях землетрясений автором использовалась идея о «квантовом» характере акустического излучения. Воспользуемся этим подходом для сравнения энергии одно «кванта» акустической энергии при схлопывании пузырька. Величина одного «кванта» акустической энергии звуковой волны, образующейся при раскрытии одной трещины принималась равной ~ 1 эрг. Для ориентировочных оценок энергетики кавитирующей среды, примем эту же величину. Давление в пузыре с водородом должно быть порядка литостатического: $p = 2.4 \cdot 10^{11}$ дин/см². Схлопывание пузыря уменьшает его объем на ΔV ,

причем $pDV \approx 1$ эрг, отсюда получаем величину $\Delta V \approx 10^{-12}$ см³, что соответствует размеру пузыря ≈ 1 мкм. В пузыре такого объема содержится примерно 10^{12} атомов водорода, а если учесть нашу оценку концентрации трещин и принять её равной концентрации пузырей (10^6 в см³), то это будет соответствовать концентрации водорода $n \approx 10^{18}$ см⁻³ и концентрации акустической энергии 10^6 эрг см⁻³. Параметр H/Si (Глава V) оказывается равным 10^{-4} . Это очень грубый, ориентировочный расчет, тем не менее, он показывает, что вполне реально, имея параметр H/Si порядка 10^{-4} , получить в объеме $V \approx 10 \times 10 \times 10$ км³ акустическую энергию порядка 10^{24} эрг. Наши оценки, естественно, предполагали, что каждый пузырь схлопываясь, приводил к возникновению акустической волны, которая, когерентно складывалась с другими звуковыми импульсами, одновременно испускаемыми другими пузырями. Такие оценки, очевидно, завышены, но и параметр H/Si может быть несколько выше, больше может быть объем, больше размер пузыря. Таким образом, в УВ модели и модели горячей Земли, можно найти вполне правдоподобное объяснение физики глубокофокусных землетрясений.

VIII. 5. Афтершоки.

Как известно, после сильного землетрясения в области его очага возникает рой повторных землетрясений, глубина гипоцентров которых, как правило, находится выше, чем плоскость основного удара. Согласно нашей модели, для образования объемных волн, возникающих при прохождении УВ от гипоцентра к земной поверхности, на ее фронте должны развиваться давления порядка предела текучести вещества, через которое распространяется УВ. Очевидно, что в таком случае на фронте УВ должно происходить “закрытие” (залечивание) трещин, наличие которых препятствовало (по нашей модели) возникновению акустически активной среды и образованию землетрясения. После такого “закрытия” трещин, - среда оказывается вновь способной к генерации ударных волн.

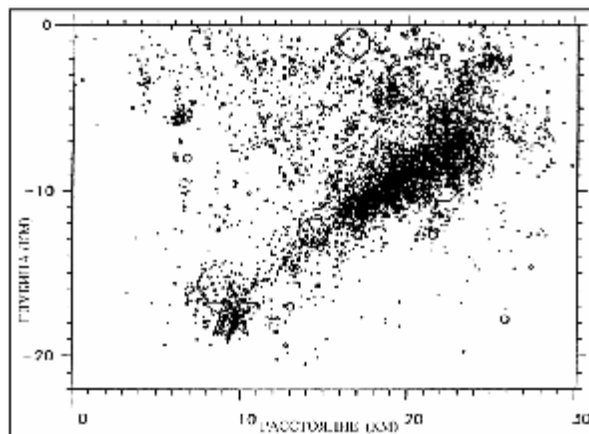


Рис. 8-18. Афтершоки Нортриджского землетрясения 1994 г. “повторяют” структуру “основного удара” этого землетрясения (Wald et al., 1996).

Однако по прошествии определенного времени, пространство очага постепенно вновь заполняется незалечивающимися трещинами и перестает быть способным к генерации УВ. Эта идея является очевидным следствием нашей модели. В качестве подтверждения её правомерности приведем рис. 8-18 (Wald et al., 1996), из которого следует, что после Нортриджского землетрясения 1994 г. максимальная концентрация афтершоков соответствует плоскости главного удара этого землетрясения. Звезда на этом рисунке показывает положение гипоцентра, угол подхода главного удара к дневной поверхности, как мы отмечали раньше, составляет примерно 40-45°. Максимум разрушений Нортриджского землетрясения располагается строго на север от гипоцентра

(эпицентра) землетрясения, в то время как максимум афтершоков немного (градусов на 20) повернут в восточном направлении (в сторону Голливуда). Рисунок 8-18 показывает, что проекция афтершоков на дневную поверхность приходится на область между гипоцентром землетрясения и эпицентром максимальных разрушений, т.е. в области максимальных значений амплитуды ударной волны, как это и должно следовать из нашей модели.

Обратим внимание на хорошо известный сейсмологам факт: после глубокого землетрясения афтершоки практически отсутствуют, однако, и эта закономерность иногда нарушается. Авторам (Wiens et al., 1994) после глубокого (564 км) землетрясения 9 марта 1994 г. (с магнитудой $M_w = 7.6$) в районе Тонга удалось наблюдать с помощью восьми широкополосных сейсмографов первую серию афтершоков. Афтершоки (82 события) затухали после главного толчка по степенному закону в течение 42 суток и имели магнитуды от 3.8 до 6.0. Главный толчок и большинство афтершоков локализованы вдоль вертикальной плоскости главного удара с максимальным расстоянием от нее не более 5 км, что так же, как в первом случае, подтверждает нашу модель.

Подход к землетрясению как к комплексу явлений сопутствующих генерации ударной волны, распространению её по геологической среде при формировании очага и выходу волны на поверхность Земли, позволяет найти логическое решение задачи, связанной с выяснением характера распределения афтершоков во времени и пространстве. Как известно, после сильного землетрясения в пространстве, занимаемом очагом землетрясения, возникает последовательность более мелких, чем основной удар землетрясений, называемых афтершоками. Спад числа афтершоков во времени после главного удара характеризуется гиперболической зависимостью (закон Омори):

$$N(t) \sim 1/t^\zeta, \text{ где } \zeta > 1.$$

Зависимость, аналогичную закону Омори, можно получить, если представить, что ударная волна в момент землетрясения, проходя по частично разрушенной предыдущей сейсмичностью среде, закрывает микротрещины и поры, чем способствует генерации роя мелких землетрясений. Если принять полное число афтершоков N_0 , то их изменение со временем можно описать формулой убывания люминесценции (фосфоресценции):

$$N(t) = N_0 \exp(-\lambda t),$$

где $1/\lambda$ - характеризует среднее время жизни возбужденного состояния, равное обратной величине вероятности спонтанного перехода в единицу времени. Иногда фосфоресценция приближенно аппроксимируется известной гиперболой Беккереля:

$$B = B_0/(1 + at)^\alpha,$$

где B_0 – начальная яркость, t - время, прошедшее после прекращения возбуждения, a и α – константы ($\alpha \leq 2$). Эта формула выражает и закон Омори, что, вполне возможно, показывает на некоторую общность между этими процессами. Тем не менее, нельзя не отметить и принципиальную разницу между ними. Если фосфоресценция является типичным представителем релаксационных процессов, то афтершоки происходят при наличии постоянно присутствующей вынуждающей силы – суммы литостатического и тектонического давлений.

VIII. 6. К вопросу о прогнозе.

Все системы прогноза базируются, как правило, на использовании уже сравнительно давно выявленных признаков. Трудно назвать какой-либо из признаков, о котором не было бы написано в известной книге Т. Рикитакэ (1979). Среди “прогнозных” признаков, предлагаемых к обсуждению, особую роль играют признаки, основанные на использовании электромагнитных полей. Сюда можно отнести:

- регистрацию электромагнитного излучения (эмиссии) - ЭМИ из зоны очага;
- возрастание сейсмoeлектрической активности, регистрируемой в теллурических токах (используемой в т.н. VAN-методе);

- изменение величины атмосферного электрического поля и, возможно, связанные с ним явления свечения неба и даже воды (Моргунов, 1998) перед сильными землетрясениями;
- изменения в магнитном поле Земли и
- изменения, фиксируемые в ионосфере.

Кроме этого, имеет смысл упомянуть о регистрации акустических (“ужасный гул”) и сейсмических (микросейсмы) сигналов перед сильными событиями. Можно отметить признаки, связанные с изменением наклона земной поверхности, величины силы тяжести, амплитуды деформаций и т.п. Перечисляя признаки, нельзя не остановиться и на серии так называемых реологических, регистрирующих, например, отношение скоростей продольных и поперечных волн и т.д.

Ни один из признаков готовящегося землетрясения не получил пока ясной интерпретации и связи его с процессом подготовки землетрясения, да и с самим явлением. Дело в том, что до сих пор так и нет, как мы неоднократно отмечали, понимания природы сейсмичности и физики землетрясения. Известные в настоящее время модели очага землетрясения в той или иной форме связаны с генерацией сейсмических волн. Ни одна из моделей не обходится без использования механизма “лавинного трещинообразования”. Совершенно неясен физический механизм этого явления, но, если что-либо подобное происходит в земных недрах, и это “что-то” связано с интенсивным образованием (раскрытием) трещин, то, очевидно, что очаг землетрясения можно уподобить объемному источнику сейсмических волн. Известна модель очага, в которой он является источником сейсмических волн, а разрушения на земной поверхности обязаны их усилению за счет интерференции (Rial et al., 1992). Наша ударно-волновая модель очага землетрясения предполагает, что в акустически-активной среде возникают сейсмические волны, которые предшествуют землетрясению и могут быть зафиксированы и как “ужасный гул”, и как микросейсмы. Более того, из этой модели следует такая особенность, как возникновение в зоне очага когерентной структуры, обладающей “дальним порядком”. Это открывает возможность для привлечения к объяснению физики происходящих процессов таких явлений, как генерация электрических полей, за счет их когерентного “сложения” от раскрывающихся трещин, изменение величины магнитного поля, за счет упорядочения ферромагнитных структур и т.п. Кроме этого, здесь могут иметь место различного рода сейсмoeлектрические и сейсмамагнитные эффекты, как результат воздействия сейсмической волны на упругую среду, как “носителя” магнитных и электрических “зарядов”.

Сейсмическая волна, выходя на земную поверхность, будет генерировать акустическую волну, которая, распространяясь в атмосфере, способна переносить информацию об очаге, например, на ионосферные высоты, где, взаимодействуя с ионизированным воздухом, вызывать возмущения. Другим возможным “переносчиком” возмущений в атмосфере, от границы с твердой землей вплоть до ионосферных высот, вызываемых готовящимся землетрясением, может быть электрическое поле. Как показано в (Плоткин, 1992), электрическое поле может проникать из хорошо проводящей земной коры в плохо проводящую атмосферу, за счет преобразования вертикальных компонент поля в тангенциальные и обратно. Возможно, действию этого механизма “обязано” появление таких электрических явлений перед землетрясениями, как свечения неба, воды и т.п. Электрическое поле способно проникать и на ионосферные высоты (Kuznetsov et al., 1995), где может вызывать те самые явления, которые фиксируются как ионосферные предвестники землетрясения.

Землетрясения представляют собой наиболее распространенный естественный источник акустических и электромагнитных возмущений, которые активно изучаются. Считается, что при землетрясениях источником акустических возмущений в атмосфере является релеевская волна, распространяющаяся вдоль земной поверхности со скоростью нескольких километров в секунду (Suzuki et al., 1969). В этом случае акустическая волна излучается в атмосферу почти вертикально. Соответствующие периоды акустических

колебаний по измерениям (Ichinose et al., 1982) составляют десятки секунд. Инфразвуковые волны столь низких частот испытывают весьма малое поглощение в атмосфере, распространяются на большие расстояния и оказывают акустическое воздействие на ионосферу (Липеровский и др., 1992; Calais, Minster, 1998).

Однако землетрясения, особенно сильные, происходят не часто, случайным образом, и детально изучить предшествующие им и сопровождающие их явления затруднительно. Другой важный путь изучения сейсмоионосферных явлений связан с искусственным возбуждением сейсмических колебаний земной поверхности и применением всех возможных способов излучения инфразвука. Инфразвук хорошо распространяется в приземном волноводе, испытывая отражения от различных слоев атмосферы. В исследованиях дальнего распространения инфразвука принято называть лучи, отражающиеся в тропосфере - звуком первого рода, отражающиеся вблизи озонового слоя на высотах 40-50 км - звуком второго рода, а если поворот луча осуществляется в термосфере на высотах 100 км и более, то говорят о звуке третьего рода. При этом выводы делаются на основании оценок времени распространения регистрируемых акустических сигналов. В (Balachandran et al., 1977) регистрировался аномальный звук третьего рода от полетов сверхзвуковых самолетов на горизонтальных удалениях от 165 до 1000 км. Излучатели инфразвука, применявшиеся в установках радиоакустического зондирования, имели частоты не ниже 80 Гц (Francel, Peterson, 1976), поэтому их дальность не превышала 3 км по высоте. Интенсивные инфразвуковые и сейсмические возмущения наблюдались во время старта и посадки американских космических аппаратов "Шатл" (Calais, Minster, 1998; Qamar, 1995). Обзор явлений, наблюдаемых в верхней атмосфере при излучении инфразвука различными природными и искусственными источниками, дан в (Blanc, 1985). Хорошую возможность для изучения сейсмоионосферных связей предоставляют явления, наблюдающиеся при мощных взрывах (см., например, Jacobson et al., 1986; Blanc, Rickel, 1989; Calais et al., 1998). В (Blanc, Rickel, 1989) приведена простая физическая модель, объясняющая наблюдаемые искажения доплеровских спектров радиоволн, распространяющихся через область спорадического E-слоя ионосферы, возмущаемого мощным наземным взрывом. В соответствии с этой моделью, акустическая волна в ионосфере на высотах ~ 100 км распространяется почти горизонтально во все стороны от области над точкой взрыва. Различные аспекты взаимодействия акустических и сейсмических волн, наблюдаемых при атмосферных (на высотах 4, 6 и 8 км), наземных и подземных взрывах рассмотрены в работе (Kitov et al., 1997).

Электромагнитные эффекты, сопровождающие рассматриваемые явления, также представляют большой интерес и достаточно подробно рассматриваются в монографиях (Гохберг и др. 1988; Сидорин, 1992). Отметим работу (Iyemori et al., 1996), посвященную наблюдению геомагнитных возмущений, сопровождавших сильное землетрясение в Кобе (Япония) в 1995 году. Эти эффекты интенсивно изучаются сейчас в связи с проблемой поиска предвестников готовящихся землетрясений. Большое внимание к ним уделялось также с целью выяснения возможности идентификации ядерных, обычных взрывов и землетрясений. В (Sweeney, 1996) описывается серия измерений параметров низкочастотного электромагнитного излучения при ядерных и химических взрывах и установлено, что электромагнитные импульсы (ЭМИ), порождаемые этими взрывами существенно различаются. При ядерном взрыве наблюдаются относительно короткие импульсы в магнитном поле в момент детонации, обусловленные гамма-излучением. Природа последующих сигналов в магнитном и электрическом поле, как при ядерных, так и при обычных взрывах, остается пока неясной. Один из возможных механизмов связан с разделением зарядов при образовании разрывов в породах (Yamada et al., 1989; Tomizava, Yamada, 1995; Adushkin, Soloviev, 1996).

Если допустить, что предлагаемой здесь УВ модель землетрясения верна, то следствием этого могут быть несколько практических её применений. Во-первых, в нашей модели необходимо присутствие прочного геологического тела, которое может быть

обнаружено одним из известных сейсмических или электромагнитных способов. Действительно, в тех случаях, когда тщательно изучались разрез, проходящий через гипоцентр землетрясения, направление главного удара, вектора подвижек в очаге и т.п., выяснялось, что гипоцентр, как правило, приурочен верхней границе геологического тела (Крылов и др., 1993). Направление главного удара составляет примерно 45° для суммы вертикальной и боковой нагрузок и $\approx 90^\circ$ - в тех случаях, когда кроме нее присутствует и нагрузка, действующая под острым углом. В качестве иллюстрации сказанному, сошлемся на книгу (Крылов и др., 1995), где утверждается, что в центральной части прочного геологического тела, обнаруженного авторами (см. рис. 8-15) на севере Байкала, сейсмичности нет, хотя на его периферии произошли два сильных землетрясения: Муйское 1957 г. и Северо-Байкальское 1917 г., а также ряд более мелких. Гипоцентры обеих сильных землетрясений точно совпадают с границей геологического тела. Заключение о совпадении гипоцентра с границей высокоскоростного и электропроводящего тела можно сделать на основании материалов (Eberhart-Phillips, Michael, 1993). В этой работе авторами, для района сильнейшего Паркфилдского (Калифорния) землетрясения 1966 г., была построена трехмерная структура распределения сейсмических скоростей. Авторы использовали данные по прохождению по среде Р-волн, возбуждаемых 5251 локальными землетрясениями 1969-1991 г.г. Объемная волновая структура получена для части земной коры в окрестности разлома Сан-Андреас, площадью 60 на 80 км и глубиной 16 км. Выявление таких сейсмоактивных геологических тел, возможно, окажется полезным при сейсмораионировании отдельных особо важных объектов (атомных электростанций, плотин ГЭС и т.п.).

Если допустить, что основная идея нашей модели адекватно описывает явления, происходящие в очаге и при разрушении земной поверхности, то, казалось бы, можно предложить некоторые приемы защиты от разрушительного действия землетрясений. Суть таких приемов всякий раз должна состоять в том, чтобы УВ выходила на свободную поверхность не там, где, например, построено здание или плотина, а в другом, искусственно подготовленном заранее месте, где разрушения не так опасны.

Представим ситуацию, в которой некоторое геологическое тело хорошо изучено. Известно, например, что незначительное увеличение нагрузки на тело, например, в доли атмосферного давления, может привести к возникновению в нем пространственной когерентности и дальнего порядка. В этой ситуации мониторинг надо вести уже не столько сейсмической активности, сколько атмосферного давления, уровня грунтовых вод и т.п.

Согласно нашей модели землетрясения, обнаружив сейсмоактивное геологическое тело, можно попытаться решить ту часть прогноза, которая называется “*определение места*”. Далее, ведя постоянный мониторинг ряда геофизических параметров, можно попытаться “*предсказать время*” очередного события. Все эти гипотетические возможности прогноза “разбиваются” о непреодолимое (на наш взгляд) препятствие. Оно связано с “*прогнозом силы*” (т.е. энергии) землетрясения. В нашей модели этот параметр зависит от того, сколько раскрывающихся трещин “подключится” к ударному импульсу. Заметим, что и в Б-К модели, так же как и в нашей, - сила землетрясений определяется тем, сколько дискретных элементов может “подключиться” одновременно.

Сила землетрясения, по-видимому, величина непредсказуемая в принципе, она совершенно случайна, а *землетрясение*, “уже начавшись, само не знает, каким получится”. Направление главного удара тоже случайно, однако, не случаен угол, под которым выходит на поверхность ударная волна. Эту мысль иллюстрирует рассмотренный нами выше пример, когда после землетрясения в Нортридже, главный удар которого (угол 45° к горизонту) пришелся севернее Лос Анжелеса, рой афтершоков был направлен под тем же углом, но уже в сторону этого города (рис. 8-18). Можно считать, что только благодаря счастливой случайности город почти не пострадал. “Источником” как

основного удара, так и афтершоков, было одно геологическое тело, верхняя граница которого (гипоцентр) находилась на глубине 17 км.

Известно, что трещина, в момент ее раскрытия, является генератором электричества. На ее “бортах” возникают заряды противоположных знаков. Казалось бы, когерентное сложение зарядов может проявиться (при условии, что будет “найден” подходящий способ “транспортировки” поля) на поверхности Земли как аномалия в атмосферном электрическом поле, или в виде усиления (ослабления) теллурических токов. Идея регистрации эффектов вариации теллурических токов перед землетрясением в качестве его прогноза, используется в т.н. VAN-методе (Masood, 1995). Однако, как показано Геллером (Geller, 1991; 1996), этот метод, как прогнозный, не имеет достаточных оснований ни по физике явлений (которая вообще не разработана), ни по его точности и надежности.

VIII. 7. Обсуждение ударно-волновой модели.

Напомним, наша модель называется ударно-волновой, её суть состоит в том, что геофизическая среда, находящаяся под постоянной литостатической нагрузкой, генерирует кратковременный импульс энергии. В принципе, это может быть уединенная волна, солитон. Мы назвали такую волну ударной исключительно потому, что в физике этот тип волн изучен лучше всего. Возможно, землетрясение связано с генерацией ударной волны в том смысле, как это понимается Зельдовичем и Райзером (1966), в любом случае, это не обычная, гуковская Р-, или S-волна. Зельдович и Райзер называют такую волну акустической, скорость её распространения определяется формулой скорости звука в воде $(K/\rho)^{1/2}$. Если эта скорость больше скорости распространения Р-волн, то расщепления волн в зоне очага не происходит и очаг (в нашей интерпретации) «не звучит». УВ распространяется вероятнее всего со скоростью c : $V_p > c > V_s$. В этом случае, в зоне очага происходят различные взаимодействия её со средой и генерация волн, фиксируемых удаленными от землетрясения сейсмостанциями. Амплитуда колебаний частиц среды и грунта, при выходе УВ на поверхность, в такой волне может быть достаточно большой, значительно большей, чем обычно фиксируемые в сейсмических волнах. Заславский и Сагдеев (1988) считают, что амплитуда такой волны может быть линейно связана со скоростью её распространения. Можно ли что-нибудь сказать о том, насколько реальна волна подобного типа, или это всего лишь теоретическая абстракция?

Магнитуда землетрясения (M) пропорциональна логарифму: сейсмического момента M_o , энергии объемных волн E_v , площади поверхности разлома S , площади области афтершоков S_A , периоду (длительности главного удара) T , объему очага землетрясения V (Касахара, 1985). Обсудим, как эти зависимости могут быть объяснены в рамках нашей модели...

Как отмечалось в ранних работах по УВ-модели, энергия УВ: $I = N \cdot (S^2/E) l^3$. Вместо N : подставим: $N = nLS_A$, где n - концентрация трещин, LS_A - объем геологического тела, в котором образуются трещины (т.е. $I \sim S_A$). Энергия излучения объемных волн зависит от полной энергии УВ, объема очага ($V = S h / \sin \alpha$, где h - глубина гипоцентра) и коэффициента преобразования энергии УВ в объемные волны: k . Энергия объемных волн в нашей модели:

$$E_v \gg I k V / h^3.$$

Сделаем очевидную замену: $T = L/v_p$, где v_p - скорость Р-волн в геологическом теле, получаем: $I \sim T$.

Принято считать, что $T \sim L/v$, отсюда $I \sim T$. Однако это, как мы отмечали, должно противоречить идее сверхизлучения, используемой в нашей модели, согласно которой $I \sim 1/T$. Как известно, корреляции (прямой или обратной) между I и T вообще не наблюдается. Здесь T - время нарастания (Приложение I в книге Касахара, 1985). С точки зрения нашей модели, этот факт можно объяснить тем, что в момент образования УВ, ее амплитуда (интенсивность) “связана” с длительностью ее фронта (“импульса”)

соотношением: $I \sim 1/T$. Однако длительность импульса УВ за счет влияния дисперсионных эффектов среды возрастает до величины в несколько секунд и оказывается независимой от величины начальной интенсивности.

Очаг землетрясения в сейсмологии изучается не только по характеру разрушений и направлению подвижек земной поверхности в непосредственной близости от эпицентра разрушений. Значительно больше информации об очаге получают, как правило, по данным наблюдений на удаленных от очага сейсмостанциях. Эта информация переносится объемными волнами, которые возбуждаются в объеме очага - от гипоцентра землетрясения практически до поверхности Земли. Известно, что характер подвижек в окрестности очага (сжатий и разрежений) повторяется в фазе вступления объемных волн. Таким образом, модель очага, претендующая на адекватное описание процессов, должна находить объяснение этому известному факту.

Как мы отмечали выше, на глубине двух-трех километров и выше, т.е. вблизи земной поверхности, генерации объемных волн, как правило, не наблюдается (Somerville, et al., 1996). Это явление в сейсмологии однозначного объяснения не находит. Как мы показали, наша модель объясняет это явление: Волна разгрузки образуется, как было показано выше, при прохождении УВ через вещество, нагруженное внешним давлением. Для этого необходимо выполнение ряда условий: Вещество должно быть сжато внешним давлением до величины порядка предела текучести материала ($p_{кр}$). Амплитуда УВ должна быть больше $p_{кр}$. Скорость распространения УВ должна быть ниже, чем скорость Р-волн: $V_{ув} < V_p$. В этом случае возбуждаются и по среде бегут две волны, одна - "упругая", со скоростью V_p , другая - акустическая (пластическая), со скоростью $c = (K/r)^{1/2}$. Ударная волна расщепляется на упругую и пластическую волны. При этом по нагруженному телу "бежит" волна растяжения в сторону, обратную распространению УВ. Кроме этого, может образоваться еще и пластическая волна разгрузки, "двигающаяся" вслед за ударной, но с меньшей скоростью.

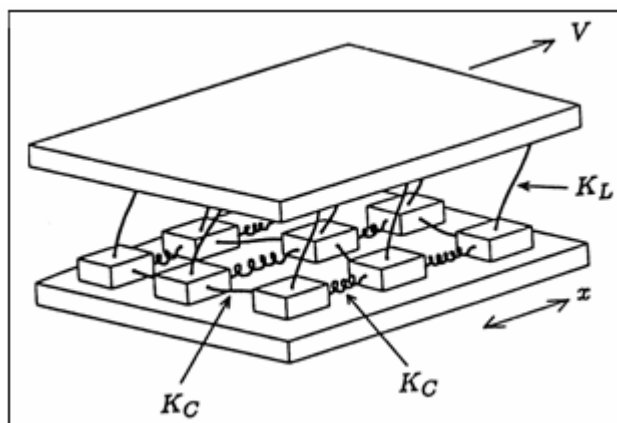


Рис. 8-19. Модель землетрясения Барриджа и Кнопова.

Ударно-волновая модель удовлетворяет известным экспериментальным зависимостям между собой параметров: энергия землетрясения, длительность импульса (период), площади областей афтершоков и разрушений и т.п., что позволяет считать высказанную выше идею не совсем безнадежной. Для того чтобы по возможности объективно оценить "плюсы" и "минусы" нашей модели, имеет смысл сопоставить ее с одной из моделей землетрясения, общепринятой, и в настоящий момент, - наиболее популярной. Наибольший интерес у геофизиков и физиков-теоретиков вызывает spring-block модель Барриджа и Кнопова (Б-К). Механистическая Б-К модель представляет собой систему, состоящую из дискретных элементов, каждому из которых приписаны определенные значения массы, упругости, трения и вязкости. Дискретные элементы механически (посредством пружин) "связывают" две пластины, одна из которых

движется, другая – неподвижна. Кроме этого, они “связаны” между собой. В зависимости от реологии (жесткости пружин и трения) и скорости движения пластины, дискретные элементы перемещаются по неподвижной пластине “прыжками”, причем, количество элементов, одновременно “прыгающих”, различается для разных режимов скольжения. Когда их много, это эквивалентно “главному удару” землетрясения. Следующие за главным ударом “прыжки” - афтершоки, предыдущие - форшоки.

Для физиков-теоретиков эта задача представляет интерес, как система, в которой возможно проявление самоорганизации, т.к. дискретные элементы взаимно завязаны через механические пружины (реологические параметры). В ключе самоорганизации, Б-К модель очень близка к нашей модели, в которой организуются трещины, влияя друг на друга через механизм АЭ, и собираясь в пространственные и временные кластеры. Трудно себе представить, чтобы Б-К модель имела реальное физическое воплощение, например, в виде “прыгающих” под давлением в десяток килобар отдельных блоков в глубине земной коры и литосферы, несмотря на то, что модель с т.н. прерывистым скольжением (stick-slip) общепринята и широко развивается. Брэйс и Байерли показали (Приложение 10), что на поверхности трещин, уже существующих в горной породе, может иметь место серия скачкообразных подвижек в условиях сохранения давления, и назвали это явление прерывистым скольжением (stick-slip). Однако, несмотря на это, представляется, что более реальным физическим явлением, происходящим на глубинах в десятки и сотни км, могут быть либо раскрытие трещин, либо перемещение дислокаций, проявляющиеся, например, в дилатантных моделях. Если допустить, что приемлемой физической реальностью Б-К модели могут оказаться не “мифические” отдельные блоки земной коры, а всего лишь трещины, то наша модель и Б-К модель - идентичны.

Все модели очага в своей основе базируются на том, что разрушается горная порода на огромной площади, на глубине 10 км и протяжении в 100 км. В момент разрушения, очаг излучает объемные волны, которые, распространяясь на огромные расстояния, несут информацию об очаге. Эта идея была высказана Рейдом около 80 лет тому назад. Сейсмологи, которым не импонировала идея Рейда, но, в то же время они наблюдали, что в момент землетрясения происходит разрушение поверхности, рано или поздно приходили к заключению, что очаг, находящийся где-то глубоко, излучает сейсмические волны, которые, усиливаясь, вызывают разрушения поверхности. Наша модель практически повторяет эту идею, наполнив ее новым содержанием, которое хорошо известно в той части физики, которая занимается ударными волнами и их взаимодействием со средой. Попутно заметим, что все модели воспринимают очаг как некую плоскость. В нашей модели, это объем среды, который начинает излучать объемные волны в момент прохождения через него УВ. Обратимся к наблюдениям землетрясения в Нортридже. Здесь, как уже упоминалось, фиксировалась и плоскость очага и, с другой стороны, плоскость векторов подвижек, нормальная к плоскости очага, т.е. объем. Анализ роя афтершоков так же показывает, что очаг представляет собой не плоскость, а объем. Это заключение ближе к нашей модели, чем к общепринятой. Обратим внимание на такой момент. В нашей модели становится понятной физика нодальной плоскости. Это та часть пространства, где осуществляется взаимодействие фронтов двух волн УВ и ВР. Как мы отмечали, именно в этом месте удваивается амплитуда волны разрежения и происходит разрывы и разломы.

В книгах по сейсмологии неоднократно приводится один эпизод, связанный с подвижками дома, построенного в непосредственной близости от разлома Сан-Андреас. Этот дом разворачивало таким образом, что его стена, обращенная на юго-запад, к океану, перемещалась в северо-западном направлении. Когда произошло известное землетрясение в Сан-Франциско, то оно разрушило этот дом, причем его удар был именно в том направлении, что и медленное перемещение вдоль разлома. Этот случай, якобы послужил

Рейду для формулирования его идеи упругой отдачи, когда медленный крип сменяется резким сбросом (отдачей) с «выходом» трещины на поверхность. Эта связь направления основного удара с направлением течения литосферы до сих пор так и не опровергнута и даже подтверждается наблюдениями многих сильных землетрясений. По-видимому, это свойство Земли можно считать неким своеобразным тестом для проверки моделей очага землетрясения. Естественно, мы должны убедиться в том, что наша ударно-волновая модель землетрясения обладает таким свойством.

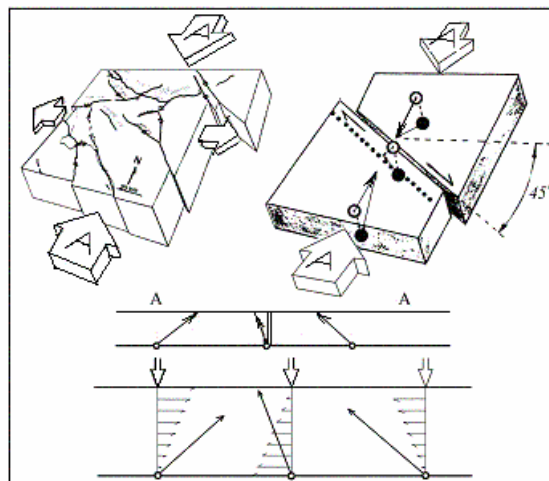


Рис. 8-20. Схемы напряжений « σ » и направлений перемещений литосферы в Южной Калифорнии (Walls et al., 1998), - слева вверху; в районе разлома Сан Андреас, - справа вверху. Направления «главных ударов трех землетрясений (разрез по линии «AA»)). Схема напряжений в районах очагов этих землетрясений, «обеспечивающая» удары в заданных направлениях.

Воспользуемся схемой направлений нагрузок (напряжений) « σ » и направлений перемещений литосферы в Южной Калифорнии, в частности, в районе разлома Сан Андреас (Walls et al., 1998). Эта схема приведена в левой части рис. 8-20. Справа изображена часть схемы, относящаяся непосредственно к этому разлому. Напряжения обозначены буквами «А». Направление напряжений в этом районе совпадает с направлением вдоль меридиана, а перемещения плит происходят, как и следует из закона Кулона-Мора, под углом 45 градусов к меридиану. На правой части рисунка изображены три землетрясения. Одно из них произошло в подвижной южной части и направление главного удара ориентировано на север. Например, это может быть Нортриджское (Northridge) землетрясение 1994 г. По нашей схеме, другое землетрясение находится на противоположной (северной) части, за разломом, и его удар ориентирован в южном направлении. В качестве примера такого землетрясения, можно рассмотреть землетрясение Коалинга (Coalinga) 1983 г. Между ними, на линии «AA», непосредственно в зоне разлома, происходят землетрясения, эпицентры разрушений которых «выстраиваются» в линию, параллельную разлому Сан Андреас (см. рис. 8-20). К таким землетрясениям, гипоцентр которых приходится непосредственно на зону разлома, можно отнести известные землетрясения: Паркфилдское (1966) и Лома Приета (1989). Главный удар этих землетрясений направлен практически вертикально вверх, в отличие от первых двух, у которых он приходится к горизонту примерно под углом 40-50°. Как видно из рисунка, литостатическая (вертикальная) нагрузка одинакова для всех трех случаев. Горизонтальные (касательные) напряжения (нагрузки) отличаются. Причина таких отличий заключается, на наш взгляд, в том, что собственно «течет» только самый верхний слой литосферы, поэтому на удалении от русла, которым является в данном случае сам разлом, чем меньше глубина, тем больше напряжение. Совсем по-другому ведет себя

касательное напряжение непосредственно в области разлома (русла), где скорость течения максимальна, а, как известно, касательное напряжение тем меньше, чем выше скорость течения.

Рисунок 8-20 демонстрирует одно из важнейших следствий нашей модели землетрясения, состоящей в том, что характер его импульсного воздействия на земную кору в виде подвижек и разрушений, повторяет и, более того, точно соответствует направлению подвижек и разрушений, вызываемых медленным перемещением блоков земной коры и литосферы. Как мы отмечали выше, именно это свойство привело Рейда к модели землетрясения, как упругой отдачи. Оказывается, что такой эффект находит объяснение совсем с других, чем у Рейда, позиций. Эта особенность землетрясений, основанная на взаимодействии в области их очага двух напряжений: литостатического и касательного, связанного с “течением” литосферы, позволяет использовать её в модели самоорганизации.

И, в заключение, подводя итоги обсуждения ударно-волновой модели землетрясения, сошлемся на мнение строителя, специалиста по разрушению зданий во время землетрясений профессора С.Б. Смирнова, обосновавшего концепцию ударно-волнового сейсмического разрушения (Смирнов, 1992). Смирнов учитывает, 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, автор приходит к мнению, 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 нами ударно-волновой модели землетрясения. По всей видимости, трудно найти более убедительные аргументы в поддержку нашей модели.

Литература

- Аки К., Ричардс П. Количественная сейсмология: Теория и методы. М.: Мир. 1983.
- Борисов А.А., Гельфанд Б.Е., Губайдулин А.А. и др. Усиление ударных волн в жидкости с пузырями пара. В сб. Нелинейные волновые процессы в двухфазных средах. Новосибирск: Институт теплофизики СО РАН. 1977. С. 67-74.
- Буллен К.Е. Плотность Земли. М.: Мир. 1978. 442 с.
- Гвоздев А.А., Кузнецов В.В. Откольные явления в грунтах, наблюдаемые при сейсморазведке. Изв. АН СССР. Физика Земли. 1967. N. 5. С. 21-27.
- 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» № 1 (21) 2003, М.: ОИФЗ РАН, 2003. URL: http://www.scgis.ru/ruaaian/cp1251/h_dgggms/1-2003/screp-8.pdf
- Горькавый Н.Н., Левицкий Л.С., Тайдакова Т.А., Трапезников Ю.А., Фридман А.М. О зависимости корреляции между региональной сейсмичностью Земли и неравномерностью её вращения от глубины очагов землетрясений. Физика Земли. 1999. № 10 . С. 52-66.
- Гохберг М.Б., Моргунов В.А., Похотелов О.А. Сейсмоэлектромагнитные явления. М.: Наука. 1988. 174 с.
- Гуттенберг Б. Физика земных недр. М.: ИЛ. 1963. 263 с.
- Жарков В.Н. Внутреннее строение Земли и планет. М.: Наука. 1983. 415 с.

- Журков С.Н., Петров В.А. О физических основах температурно-временной зависимости прочности твердых тел. ДАН. 1978. Т. 239. № 6. С. 1316-1319.
- Журков С.Н., Куксенко В. С., Петров В.А. и др. Концентрационный критерий объемного разрушения твердых тел. Физические процессы в очагах землетрясений: Сб. науч. тр. М.: Наука, 1980. С. 78-85.
- Забабахин Е.И. Некоторые вопросы газодинамики взрыва. Снежинск: РФЯЦ-ВНИИТФ. 1997.
- Заславский Г.М., Сагдеев Р.З. Введение в нелинейную физику. М.: Наука. 1988. 368 с.
- Зельдович Я.Б., Райзер Ю.П. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. 1966. М.: Наука. 686 с.
- Касахара К. Механика землетрясений. М.: Мир. 1985. 262 с.
- Красильников В.А., Крылов В.В. Введение в физическую акустику. М.: Наука. 1984. 400 с.
- Крылов С.В., Мишенькин Б.П., Мишенькина З.Р. и др. Детальные сейсмические исследования литосферы на Р- и S-волнах. Новосибирск: Наука. 1993. 198 с.
- Кузнецов В.В. Физика земных катастрофических явлений. 1992. Новосибирск: Наука. 96с.
- Кузнецов В.В. Модель самоорганизации ансамбля излучающих звук трещин. ПМТФ. 2001-а. Т. 42. № 4. С. 184-189.
- Кузнецов В.В. Ударно-волновая модель очага землетрясения. Науки о Земле: Современные проблемы сейсмологии. М.: Вузовская книга. 2001-б. С. 47-62.
- Купцов А.В. Особенности высокочастотной геоакустической эмиссии на заключительной стадии подготовки землетрясения. Кандидатская диссертация. ИКИР. 2006.
- Кусов А.А. Фононная модель разрушения нагруженной атомной цепочки. ФТТ. 1979. Т. 21. № 10. С. 3095-3099.
- Липеровский В.А., Похотелов О.А., Шалимов С.Л. Ионосферные предвестники землетрясений. М.: Наука, 1992, 304 с.
- Моргунов В.А. Электрические явления, предшествующие Шикотанскому землетрясению и его афтершокам. ДАН. 1998. Т. 359. № 1. С. 102-105.
- Накоряков В.Е., Донцов В.Е. Усиление ударной волны в насыщенной пористой среде. ДАН. 2000. Т. 373. № 4. С. 477-478.
- Плоткин В.В. Ионосфера как нагрузка глобальной атмосферной электрической цепи. Известия вузов. Радиофизика. 1992. Т. 35. № 11-12. С. 900-913.
- Поль Б. Макроскопические критерии пластического течения и хрупкого разрушения, в сб. Разрушение т. 2. Ред. Г. Либовиц. М. Мир.: 1975. 764 с.
- Регель В.Р., Слуцкер А.И. Кинетическая природа прочности. В кн. Физика сегодня и завтра. Л.: Наука. 1973. С. 90-175.
- Рикитаке Т. Предсказание землетрясений. М.: Мир. 1979. 286 с.
- Си Г., Либовиц Г. Математическая теория хрупкого разрушения, в сб. Разрушение т. 2. Ред. Г. Либовиц. М.: Мир. 1975. 764 с.
- Сидорин Л.Я. Предвестники землетрясений. М.: Наука. 1992. 192 с.
- Смирнов С.Б. Ударно-волновая концепция сейсмического разрушения сооружений. Энергетическое строительство. 1992. № 9. С. 70-73.
- Хакен Г. Синергетика. М.: Мир. 1980. 404 с.
- Шредер М. Фракталы, хаос, степенные ряды. Миниатюры из бесконечного рая. Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика». 2001. 528 с.
- Adushkin V.V., Soloviev S.P. Generation of low-frequency electric fields by explosion crater formation. J. Geophys. Res. 1996. V. 101. P. 20165-20173.
- Anderson J.G., Yu G. Predictability of strong motion from the Northridge, California Earthquake. Northridge Earthquake. January 17, 1994. Bulletin Seismological Society of America (BSSA). 1996. V. 86. N. 1B. P. 100 – 114.
- Balachandran N.K., Donn W.L., Rind D.H. Concordance of sonic booms as an atmosphere probe. Science. 1977. V. 187. P. 47-49.

- Bardet J.P., Davis C. Engineering observations on ground motions at the Van Norman Complex after the 1994 Northridge Earthquake. Northridge Earthquake January 17, 1994. Bull. Seism. Soc. Am. 1996. V. 86. N. 1B. P. 333-349.
- Blanc E. Observations in the upper atmosphere of infrasonic waves from natural or artificial sources: a summary. Ann. Geophys. 1985. V. 3. P. 673-688.
- Blanc E., Rickel D. Nonlinear wave fronts and ionospheric irregularities observed by HF sounding over a powerful acoustic source. Radio Sci. 1989. V. 24. № 3. P. 279-288
- Calais E., Minster J.B. GPS, earthquakes, the ionosphere, and the Space Shuttle. Phys. Earth Planet. Inter. 1998. V. 105. P. 167-181.
- Calais E., Minster J.B., Hofton M.A., Hedlin M.A.H. Ionospheric signature of surface mine blasts from Global Positioning System measurements. Geophys. J. Int. 1998. V. 132. P. 191-202.
- Dicke R.H. Coherence in spontaneous radiation processes. Phys. Rev. 1954. V.93. N. 1. P. 99-110.
- Eberhart-Phillips D., Michael A.J. Three-dimensional velocity structure, seismicity, and fault structure in the Parkfield region, Central California. J. Geophys. Res. 1993. V. 98. N. B9. P. 15737-15758.
- Francel M.S., A.M.Peterson. Remote temperature profiling in the lower troposphere Radio Sci. 1976. V. 2. № 3. P. 157-166.
- Geller R.J. Shake-up for earthquake prediction. Nature. 1991. V. 352. 275-276.
- Geller R.J. VAN: a critical evaluation, in Critical review of VAN, ed. J. Lighthill, World Scientific. 1996. P. 155-238. Singapore.
- Harp E.L., Jibson R.W. Landslides triggered by the 1994 Northridge, California, earthquake. BSSA. 1996. V.86. N.1B. P. S 319-S 332.
- Ichinose T., Takagi K., Tanaka T., Oquzawa T., Shibata T., Sato Y., Nagasawa C., Ogawa T. HF Doppler observations of acoustic waves excited by the earthquake Middle Atmosphere Program, Handbook for MAP. 1982. V. 18. P. 310-318.
- Ishido T., Nishizawa O. Effect of zeta potential on microcrack growth in rock under relatively low uniaxial compression J. Geophys. Res. 1984. V. 89, N B6. P. 4153-4159.
- Iyemori T., Kamei T., Tanaka Y., et al. Co-seismic geomagnetic variations observed at the 1995 Hyogoken-Nanbu earthquake. J. Geomag. Geoelectr. 1996. V. 48. P. 1059-1070.
- Lei X., Nishizawa O., Kusunose K., Satoh T. Fractal structure of the hypocenter distributions and focal mechanism solutions of acoustic emission in two granites of different grain sizes // Phys. Earth. 1992. V. 40, P. 617-634.
- Jacobson A.R., Carlos R.C., Argo P.E., Rickel D.G. Radio wave diffraction during the passage of an acoustic shock through a sporadic E layer. Radio Sci. 1986. V. 21. № 4. P. 752-760.
- Jouniaux L., Masuda K., Lei X., et al. Comparison of the microfracture localization in granite between fracturation and slip of a preexisting macroscopic healed joint by acoustic emission measurements. J. Geophys. Res. 2001. V. 106. NO. B5. P. 8687-8698
- Kitov I.O., Murphy J.R., Kusnetsov O.P., Barker B.W., Nedoshivin N.I. An analysis of seismic and acoustic signals measured from a series of atmospheric and near-surface explosions. Bull. Seism. Soc. Amer. 1997. V. 87. P. 1553-1562.
- Kuznetsov V.V., Plotkin V.V., Izraileva N.I. The investigation of electromagnetic interactions between regions surrounding the Earth. J. Atmos. Terr. Phys. 1995. V. 57. № 13. P. 1639-1660.
- Lei X., Nishizawa O., Kusunose K., Satoh T. Fractal structure of the hypocenter distributions and focal mechanism solutions of acoustic emission in two granites of different grain sizes // Phys. Earth. 1992. V. 40, P. 617-634.
- Masood E. Greek earthquake stirs controversy over claims for prediction method. Nature. 1995. V. 375. P. 617.
- Northridge Earthquake January 17, 1994. Bulletin Seismological Society of America 1996. V. 86. N.1. Part B.
- Qamar A. Space Shuttle and meteoroid - tracking supersonic objects in the atmosphere with seismographs. Seism. Res. Lett. 1995. V. 66, № 5. P. 6-12.

- Rial J.A., Saltzman N. G., Ling H. Earthquake-induced resonance in sedimentary basins. *American Scientist*. 1992. V. 80. November-December. P. 566-578.
- 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.* 1996. V. 86. N.1, Part B, P. 39- 48
- Smith D.L., Evans B. Diffusional crack healing in quartz. *J. Geophys. Res.* 1984. V. 89. P. 4125-4135.
- Somerville P., Saika C., Wald D., Graves R. Implications of the Northridge earthquake for strong ground motions from thrust faults. 1996. *BSSA*. V. 86. N. 1B. P. S115-S125.
- Suzuki R.K., Yuen P.C., Weaver P.F. Continuous traveling coupling between seismic waves and the ionosphere evident in May 1968 Japan Earthquake Data . *J. Geophys. Res.* 1969. V. 74. № 9. P. 2256-2264.
- Sweeney J.J. Low-frequency electromagnetic measurements as a zero-time discriminate of nuclear and chemical explosions - OSI research final report: Lawrence Livermore National Laboratory, Livermore, CA, report UCRL-ID-126780. December. 1996. 23 p.
- Tomizava I., Yamada I. Generation mechanism of electric impulses observed in explosion seismic experiments. *J. Geomagn. Geoelectr.* 1995. V. 47. P. 313-324.
- Wald D.J., Heaton T.H., Hudnut K.W. The slip history of the Northridge, California, earthquake determined from strong-motion, teleseismic, GPS, and leveling data. *BSSA*. 1996. V. 86. P. S49-S70.
- Walls C., Rockwell T., Mueller K., et al. Escape tectonics in the Los Angeles metropolitan region and implications for seismic risk. *Nature*. 1998. V. 394. P. 356-360.
- Wiens D.A., McGuire J.J., Shore P.JU., et al. A deep earthquake aftershock sequence and implications for the reapture mechanism of deep earthquakes. *Nature*. 1994. V. 372. P. 540-543.
- Willemann R.J. A simple explanation for the depth distribution of deep earthquakes. *Geoph. Res. Lett.* 1991. V. 18. P. 1123-1126.
- Yamada I., Masuda K, Mizutani H. Electromagnetic and acoustic emission associated with rock failure. *Phys. Earth Planet. Int.* 1989. V. 57. P. 157-168.
- Zeng Y., Anderson J.G. A composite source model of the 1994 Northridge Earthquake using genetic algorithms. *Bull. Seism. Soc. Am.* 1996. V. 86. N.1, Part B. P. 71-83