

Ударно-волновая модель землетрясения. Формирование ударной волны. Физика очага и афтершоки

В.В. Кузнецов

Институт нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН.

E-mail: ikir@academ.org

(Получена 28 февраля 2011; опубликована 15 апреля 2011)

Обсуждается физика формирования ударной волны в зоне гипоцентра землетрясения. Модель базируется на известных экспериментах по т.н. акустическому сверхизлучению, когда в образце горной породы, находящемся под давлением на прессе, внезапно возникает резкое увеличение акустического фона ($N \rightarrow N^2$), которое затем также резко прекращается. Это явление объяснения не имеет. Попытка найти его за счет высказанной автором идеи взаимодействия раскрывающихся трещин при нагружении образца путем обмена между трещинами акустическими волнами, оказалась не перспективной. Учет времени нарастания фронта землетрясения и размеров его очага показывает непригодность акустического подхода. Предполагается, что взаимосвязь элементов среды (их кооперативность), требуемая для решения этой проблемы, может достигаться только за счет проявления средой её квантовых свойств (квантовой запутанности). Этот подход находит решение многих проблем физики землетрясения. Обсуждается физика очага землетрясения в контексте ударно-волновой модели. При этом находится объяснение механизма генерации сейсмических волн и причины механического, гидродинамического переноса среды с малой скоростью (slip velocity) за счет эффектов, сопровождающих прохождение ударной волны через очаг. Обсуждаются вопросы, связанные с изменением напряженного состояния вещества под воздействием ударной волны. В рамках развиваемой модели, непротиворечивое объяснение находит явление афтершоков. Предпринята попытка найти объяснение явлению, названному «сейсмическими гвоздями». Привлекается внимание к возможной роли водорода в генерации землетрясений. Обсуждаются результаты наблюдений связи между землетрясениями, акустической и электромагнитной эмиссией

Введение

Физика землетрясения, несмотря на то, что эта проблема стоит перед человечеством более 100 лет, до сих пор так и остается не ясной. Как стало недавно известно, одна из десяти тайн Вселенной, по версии экспертов и читателей популярного журнала LiveScience, - сформулирована примерно так: «Что происходит в сердце землетрясения?». В чем же состоит причина и почему эта очень важная проблема, над решением которой работает огромное количество университетов, институтов и компаний во всем мире, не продвинулась практически ни на шаг? Прошло сто лет с первой научной концепции упругой отдачи, высказанной Рейдом в 1906 после разрушительного землетрясения в Сан-Франциско. С тех пор не было выдвинуто не то чтобы теории, - ни одной гипотезы, ни одной модели, которая более или менее адекватно описывала бы наблюдаемые в момент землетрясения явления.

Двадцать лет тому назад автором была предложена ударно-волновая модель землетрясения, которая в цикле настоящих работ рассматривается как последовательность таких механизмов:

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

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

3) выход ударной волны на поверхность Земли и формирование т.н. сильных движений грунта.

В работе [1] автором рассмотрен 3-ий механизм, на примере двух землетрясений: Нортриджского (Калифорния) $M = 6.7$; 17.01.1994 и Чуйского (Алтай) $M = 7.5$; 27.09.2003 предложена новая модель сильных движений грунта при землетрясении. Сильные движения грунта при землетрясении рассматривались как процессы, сопровождающие выход ударной волны на свободную поверхность [1]. Теория этого явления хорошо развита (ссылки в [1]), что позволило найти непротиворечивое объяснение практически всем известным особенностям таких движений поверхности.

Настоящая работа посвящена решению самого главного вопроса, обозначенного выше как первый: как образуется ударная волна в недрах Земли? По мнению автора, ответ на этот вопрос, позволит приблизиться к решению мировой задачи, ранее сформулированной как: «что же происходит в сердце землетрясения?».

Почему и как образуется ударная волна в недрах Земли - это наиболее сложный вопрос в новой модели землетрясения. Образование ударных волн в природе обычно связано с возникновением быстрого и локального разрыва термодинамических характеристик среды, который характеризует фронт ударной волны. Чем короче фронт и больше величина различий плотности и давления среды, тем больше энергии несёт ударная волна и выше её скорость. Процесс, связанный с возникновением землетрясения и выходом очага на поверхность, согласно сейсмологическим наблюдениям, соответствует тому, что весь процесс, в реализации которого принимает участие огромные объемы литосферы (до 1000 км) ведет себя как точка. Это означает, что занятая в процессе образования ударной волны среда ведет себя как точка. Дело в том, что наблюдаемые этот процесс сейсмостанции, расположенные на различных от гипоцентра землетрясения расстояниях, фиксируют приход сейсмической волны с точностью, меньшей, чем секунда. (Секунда – период сейсмических волн). Отсюда следует, что скорость синхронизации движения для такого огромного тела (до 1000 км) должна быть выше скорости звука на два порядка, что, конечно, не укладывается в каноны механики сплошной среды. Этот вопрос – центральный в физике землетрясения, какова бы модель не рассматривалась. По-видимому, именно это следует считать «сердцем» землетрясения.

Имеется ли в Природе явление, которое заставило бы различные частицы сплошной среды, находящиеся друг от друга на огромных расстояниях (до 1000 км), вести себя как одна частица? Естественно, что такие частицы должны обладать т.н. кооперативными свойствами. В последнее время в ряде университетов исследованы кооперативные свойства природных и искусственных материалов. В ряде случаев этими свойствами обладают вещества, имеющие в своем составе водородные связи. Практически все горные кристаллические породы, в том числе и ряд сегнетоэластиков, имеют в своем составе воду и, естественно, водородные связи. Теоретически и экспериментально было показано, что эти породы при определенных давлениях и температурах способны синхронно изменить структуру водородных связей (расстояния между атомами), что приводит к изменению плотности пород. Единственное известное в физике явление, способное реализовать то, что принято называть кооперативностью, это квантовая запутанность (зацепленность) элементов среды. В нашем случае – протонов водородных связей. Этот вопрос подробно рассматривается в предлагаемой работе. Его решение открывает возможность разобраться в таких явлениях как законы Гуттенберга-Рихтера и Омори, наведенная сейсмичность и др.

В настоящей работе также обсуждается физика очага землетрясения, иначе, находится объяснение механизма генерации сейсмических волн и причины

механического, гидродинамического переноса среды с малой скоростью за счет эффектов, сопровождающих прохождение ударной волны через очаг. Обсуждаются вопросы, связанные с изменением напряженного состояния вещества под воздействием ударной волны. В рамках развиваемой модели, непротиворечивое объяснение находит явление афтершоков. Предпринята попытка найти объяснение явлению, названному «сейсмическими гвоздями», привлекается внимание к возможной роли водорода в генерации землетрясений. Обсуждаются результаты наблюдений связи между землетрясениями, акустической и электромагнитной эмиссией.

Акустическое сверхизлучение

Наша модель базируется на новых подходах в объяснении известных экспериментальных результатов, полученных при исследовании образцов горных пород при сжатии их на мощных прессах. Авторами ряда работ неоднократно наблюдалось явление самопроизвольного усиления интенсивности акустической эмиссии, которое затем, так же самопроизвольно, - прекращалось [2 - 4]. Автором [2] была сделана попытка найти объяснение этому явлению с точки зрения самоорганизации когерентной структуры на основе взаимодействия звуковых волн с раскрывающимися трещинами. Высказано предположение, что эффект усиления акустической эмиссии имеет некоторую общность с оптическим сверхизлучением [5]. 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 (гранодиоритов) двух различных типов: Oshima (fine-grained) и Inada (coarse-grained) показало, что образцы внешне практически не отличаются один от другого, при нагружении их на прессах, - ведут себя по-разному [3]. На серии образцов гранита из месторождения Oshima эффект резкого усиления интенсивности акустической эмиссии, названной нами акустическим сверхизлучением, постоянно присутствует, а на серии образцов гранитов другого типа Inada – эффекта нет. Этот результат, неоднократно подтвержденный экспериментально, дает основание полагать, что и в земных недрах должны встречаться геологические тела, реология которых такова, что в них могут развиваться процессы самоорганизации и генерироваться, в конечном счете, землетрясение, а в других телах, на первый взгляд идентичных первым, таких явлений возникнуть не может.

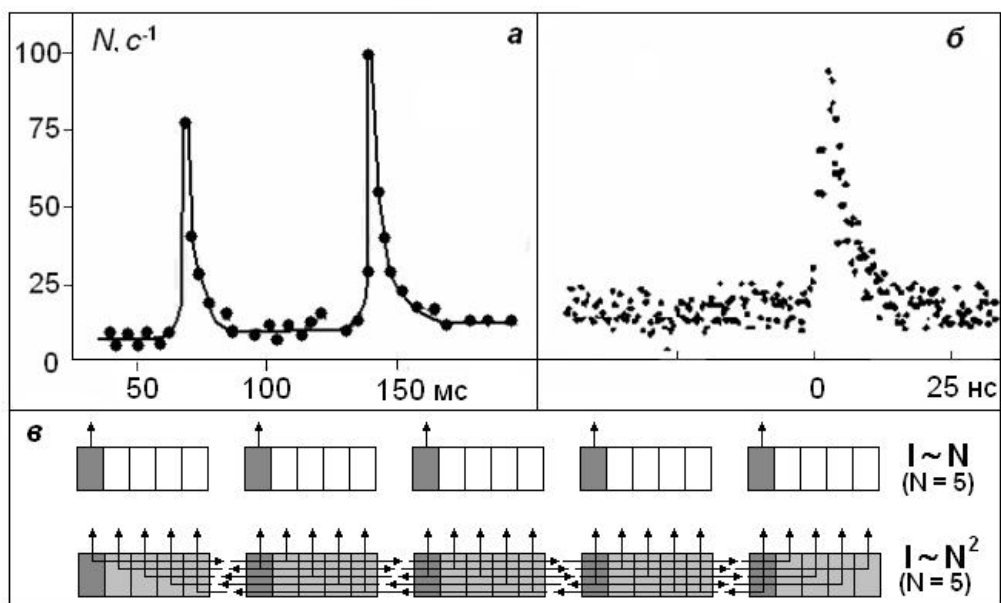


Рис.1. а) Скорость образования трещин в диабазе при действии на образец постоянного одноосного сжимающего напряжения [4]. б) Число зарегистрированных пар фотонов как функция задержки между моментами регистрации двух фотонов. Плоский участок отвечает случайным совпадениям между некоррелированными фотонами, пик соответствует квантовой запутанности [6]. в) Акустическое излучение раскрывающихся микротрещин. На верхней панели – излучение акустических волн без связи между микротрещинами. На нижней панели – акустическая связь между всеми микротрещинами.

Результаты лабораторных экспериментов и натуральных наблюдений (рис. 1-а) показывают, что на фоне постоянного акустического сигнала ($I = dN/dt \sim N$), излучаемого нагруженным образцом горной породы, возникает взрывоподобное нарастание (типа цепной реакции) количества раскрывающихся трещин N (акустических импульсов) в единицу времени t : $dN/dt \sim N^2$ [4]. По аналогии с оптикой, это явление можно считать акустическим сверхизлучением. Ясного понимания физики этого явления пока - нет.

Предположим, что в объеме среды находящейся под внешним давлением - возникает некоторое количество источников акустических импульсов. Это могут быть раскрывающиеся трещины [2], образующиеся дислокации, образование и разрушение водородных связей среды и пр. Каждая такая дислокация в определенных условиях излучает акустический импульс. Сумма таких импульсов составляет акустический фон N . Представим себе ситуацию, в которой такая дислокация связана не очень пока ясной связью с другими дислокациями таким образом, что она (эта дислокация) стимулирует излучение акустического импульса другими. Например, акустические волны, возникающие при разрушении N дислокаций, могут способствовать разрушению других, связанных (сцепленных, запутанных) с ними $(N - 1)$ дислокаций. В результате акустический фон возрастает с N импульсов в единицу времени до $N + N(N - 1) = N^2$, что и требовалось доказать (рис. 1-в). Принципиальным моментом в этой модели остается пока не ясной физика такой связи.

По физике, обсуждаемое нами явление близко к сверхизлучению Дикке (коллективное спонтанное испускание электромагнитного излучения), которое было предложено им задолго до изобретения лазеров [5]. 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 $\sim N^2$.

На рис. 1-б показана картина, очень близкая к 1-а. В отличие от 1-а, здесь показано как ведут себя некоррелированные фотоны в момент возникновения между ними квантовой запутанности [6]. (Об этом немного позже).

Формирование ударной волны

Акустическая модель

Для начала, сошлемся на высказывание Старра (1971), который полагал, что «нелинейная теория идеальных акустических возмущений неизбежно приводит к формированию ударных волн и, следовательно, к изменению формы уравнений, которые до этого были достаточными для описания сплошной среды» [7] (стр. 13).

Предположим, что в некотором объеме напряженной горной породы образовалась некая структура микротрещин. Раскрытие одной из микротрещин, сопровождается излучением S-волны. Эта волна, рассеиваясь на трещине, переизлучает Р-волну, которая распространяется в направлении ориентирования трещин, и S-волну, которая, в свою очередь, распространяется поперек луча Р-волны. Рассеиваясь на микротрещине, S-волна приведет к её раскрытию, и каскад явлений повторится, аналогично приему, используемому в методе пересекающихся характеристик [8]. В результате, в этом объеме образуется некоторое количество Р-волн, вдоль направления трещин со скоростью V_P и S-

волн, - поперек этого направления со скоростью V_S . Предположим, что расстояние между соседними трещинами (по лучу S-волн) равно x . Тогда, если выполняется условие: $\tau_1 + \tau_2 = \tau_0 + \tau_3$, где $\tau_1 = y_1/V_P$ – время распространения Р-волны от раскрывшейся трещины 1; $\tau_2 = x_1/V_S$ – время распространения S-волны от трещины 1 до микротрещины 2; τ_0 – время раскрытия трещины; $\tau_3 = y_2/V_P$ – время распространения Р-волны от трещины 2: *Р-волны пересекаются в одной точке.*

Полагая: $y_2 - y_1 = \Delta y$, при выполнении условия: $\Delta y/V_P = -\tau_0 + x/V_S$. Оценим величину x , приняв: $\Delta y = x$, $V_P = 5$ км/с, $V_S = 3$ км/с, $\tau_0 = 10^{-7}$ с, тогда $x \approx 700$ 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. Предположим, что характерный поперечный размер активной среды $X = x \cdot N$ ($x \sim 1/N$), тогда характерное время: $\tau \sim 1/N$. В такой среде возможно явление акустического сверхизлучения.

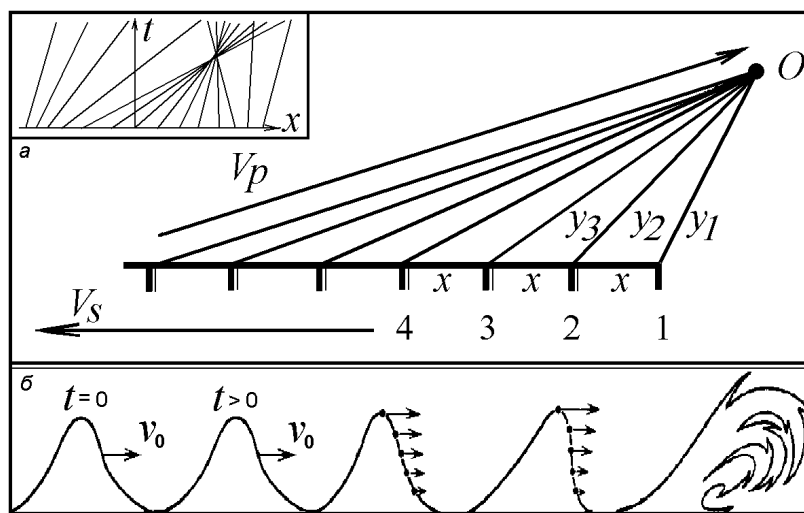


Рис. 2-а. Когерентное сложение акустических импульсов в точке O. Метод пересекающихся характеристик [8]. Рис. 2-б. Модель укрупнения и «опрокидывания» солитона [9].

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

$$\partial \phi / \partial t + v_0 (\partial \phi / \partial x) = -\varepsilon \phi (\partial \phi / \partial x) + \eta (\partial^2 \phi / \partial x^2) - \beta (\partial^3 \phi / \partial x^3),$$

где ε, η, β - константы, отражающие влияние, соответственно, нелинейности, диссипации и дисперсии.

Известно явление укрупнения фронта уединенной волны за счет того, что материальные частицы, находящиеся в пучности этой волны (где плотность среды выше), движутся быстрее, чем соседние частицы вне пучности. Волновой профиль становится круче настолько, что может привести к образованию ударной волны и даже её опрокидыванию (рис. 2-б) [9].

Неадекватность акустического подхода

Попытки автора решить проблему возникновения ударной волны за счет коллективных акустических процессов взаимодействия типа: волна-трещина особым успехом не увенчались. Главное препятствие в решении проблемы генерации ударной

волны состоит в том, что она, по модели, возникала в результате взаимодействия акустических волн, обладающих конечной скоростью распространения не более 10 км/с. Землетрясение же образуется одновременно на масштабе до 1000 км за характерное время, меньшее секунды. Возникает неразрешимая в механике сплошной среды проблема: как можно синхронизовать объем очага землетрясения такого размера за столь малые времена? Для этого скорость распространения сигнала должна быть не меньше чем 1000 км/с, что в сто раз больше скорости звука. Следовательно, необходимо найти другой (не акустический) механизм приведения огромных объемов среды к когерентности с огромной скоростью. Электромагнитный сигнал для этой задачи не проходит, т.к. высокочастотный сигнал не способен распространяться в проводящей среде литосферы на такие расстояния.

Рассмотрим возможность использования подходов, развитых в квантовой механике и экспериментально реализованных в последнее время, например, в экспериментах по квантовой запутанности и телепортации. Если бы удалось решить задачу взаимной связанности между дислокациями среды с помощью методов многочастичной квантовой запутанности, то это, возможно, открыло бы подход к решению задачи, поставленный во введении: «Что происходит в сердце землетрясения?».

Новый подход

В современной физике в последние годы проблема квантовой запутанности стала широко обсуждаться в физических журналах в основном, в связи с реализацией идеи построения квантового компьютера. Квантовая запутанность (нелокальность, сцепленность) основана на использовании принципа неопределенности Гейзенберга и неслучайности корреляций между двумя наблюдателями, производящими измерения над квантовыми состояниями Эйнштейна-Подольского-Розена. Среда, при её запутанности (нелокальности) становится когерентной (кооперативной). Она может быть описана некой волновой функцией и, когда происходит редукция этой функции (смерть запутанности), то этот процесс распространяется мгновенно независимо от величины объекта, вовлеченного в квантовую запутанность. (По мнению некоторых авторов, скорость редукции волновой функции не должна превышать скорость света, но для нашей модели этот момент не столь принципиален). Кратко рассмотрим далее, как можно использовать эту область физики, которая в течение последних нескольких лет активно развивается как в плане постановки экспериментов, так и в теоретическом плане. Однако прежде решим принципиальную проблему, можно ли генерировать ударную волну в «спокойной» среде, т.е. в среде без скоростных ударов, детонации, взрывов и т.п. Казалось бы – да, если найдется способ создания разрыва термодинамических параметров среды, в частности, - разрыва величины её плотности.

Образование ударной волны на разрыве характеристики среды

Ударная волна - это распространяющийся по среде фронт резкого, почти мгновенного, изменения параметров среды: плотности, давления, температуры, скорости. Ударные волны называют также сильными разрывами или скачками.

Запишем уравнение дивергентного вида:

$$\partial \rho / \partial t + \partial f(\rho) / \partial x = 0,$$

с условием на линии разрыва:

$$-D(\rho_1 - \rho_2) + f(\rho_1) - f(\rho_2) = 0,$$

где ρ_1 и ρ_2 – значения плотности на разрыве, а $D = dx(t)/dt$ - наклон линии разрыва – скорость ударной волны: $D = \Delta \rho / \rho \cdot \Delta x / \Delta t$.

Предположим, что нам, каким-либо способом, например, путем генерации спонтанной деформации кристаллической решётки в сегнетоэластике [10] удалось резко увеличить плотность вещества, например, на 10 % ($\Delta\rho/\rho = 0.1$). Предположим, что увеличение плотности среды происходит в некотором слое толщиной $\Delta x = 10$ см, за время порядка $\Delta t = 10^{-6}$ с. Резкое увеличение плотности в тонком слое – это разрыв параметров среды. Разрыв параметров среды - эквивалентен прохождению (или формированию) ударной волны, обладающей скоростью $D = 10$ км/с. В такой ситуации, проблему генерации ударной волны можно переформулировать как задачу поиска физически правдоподобного механизма, приводящего к мгновенному изменению плотности среды в слое литосферы, расположенном на глубине, характерной для возникновения землетрясений. Наша идея состоит в привлечении физически допустимых механизмов для создания локального разрыва термодинамических характеристик среды, в частности – плотности. Подобное явление может происходить при структурном фазовом переходе первого рода. Очевидно, что в основе такого явления должно быть выполнение условия возникновения некоторого синхронизма больших объемов среды, называемого - кооперативностью. Известно, что таким качеством обладают вещества, в составе которых имеются т.н. водородные связи.

Водородные связи

Водородная связь

Водородная связь - особый вид связи, возникающий за счет того, что атом водорода, связанный с сильно электроотрицательным элементом (азотом, кислородом, фтором и др.), испытывает недостаток электронов и поэтому способен взаимодействовать с неподеленной парой электронов другого электроотрицательного атома этой же или другой молекулы. Водородная связь - разновидность невалентного взаимодействия между атомом водорода Н, ковалентно связанным с атомом А группы А-Н молекулы RA-Н и электроотрицательным атомом В другой молекулы. Наличие водородных связей и их кооперативные свойства, в частности, в воде приводит к тому, что её свойства изменяются в зависимости от количества водородных связей. Так, например, во льду водородных связей много, их количество уменьшается по мере того, как лед тает. В талой воде водородных связей – меньше, ещё меньше их в нагретой воде и практически нет – в воде кипящей. Если бы вода полностью лишилась возможности образовывать водородные связи, то превратилась бы в пар, конденсирующийся в жидкость при - 100 °С. Водородные связи присутствуют не только в воде, но и в литосфере, определяя её особые свойства. Природа водородной связи состоит в том, что электронная плотность на линии Н...О (N, F и т.п.) смещается к отрицательному атому. Это способствует сближению электронов отрицательных атомов соседних молекул. В результате расстояния: О - О, О - N и т.п. становятся значительно меньше, чем они были бы без атома Н. Явление укорочения длины атомных связей двух молекул А и В: А - В (без водорода) и А - Н...В (с присутствием атома водорода), иллюстрирует таблица.

Н - связь	энергия ккал/моль	расстояние в Å А - В	расстояние в Å А - Н...В
слабая	0.1 - 1.0	3.0 - 3.5	2.0 - 2.5
средняя	5.0 - 15.0	2.7 - 3.0	1.7 - 2.0
сильная	20 - 60	2.2 - 2.5	1.1 - 1.2

Из таблицы следует, что наличие (сильной) водородной связи приводит к тому, что расстояние между атомами уменьшается примерно вдвое.

Перестройка водородных связей
Лед

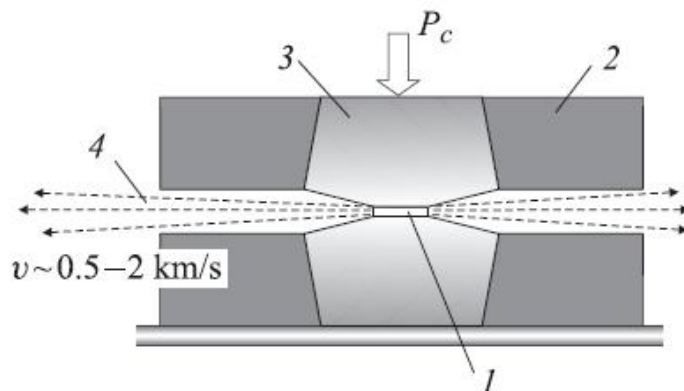


Рис. 3. Схема системы сжатия образца льда (1) между двумя наковальнями Бриджмена (2) со сверхтвердыми вставками (3), необходимыми для получения взрывного эффекта с высокоскоростным выбросом (4) части материала льда за пределы системы [11].

Приведем экспериментальные данные, полученные при сжатии льда между наковальнями с открытыми границами. Согласно этим данным [11], в таком эксперименте, в области высоких давлений ($P \sim 0.1 - 10 \text{ ГПа}$) между двумя наковальнями происходит высокоскоростной выброс льда, находящегося в мелкодисперсном состоянии. Схема эксперимента изображена на рис. 3. Подобные взрывные неустойчивости возникают при переходе упругой энергии сильно сжатого тела в механическую работу со сверхбыстрой объемной разгрузкой системы после достижения в ней некоторых критических P - T параметров. Для каждого материала существует свой характерный порог давления и температуры, при которых он испытывает такой вид неустойчивости, получивший название эффект Бриджмена.

Проявление этого эффекта в природе известно. В подтверждение цитируем работу [12]: «При раздавливании отдельных монолитных образцов (льда), не содержащих трещин, пузырьков воздуха или других структурных особенностей, в условиях температур, начиная от -5°C до -11°C , проявляется эффект взрывного разрушения с разлетом осколков и дроблением до состояния «мучной пыли». Подобное свойство байкальского льда проявляется в природных условиях в виде динамического разрушения ледяного покрова, которое мы назвали ледовыми ударами, по аналогии с горными ударами» (стр. 291). В работе [12] исследовалась суточная вариация микросейсмичности (акустической эмиссии) льда. Суточные вариации уровня микроколебаний коррелируют с температурой. Максимум соответствует ночным колебаниям. Авторы зарегистрировали мощные импульсы, которые происходили в дневное время в момент максимальной температуры воздуха. Именно в это время авторами были зарегистрированы динамические деструктивные процессы, названные авторами ледовыми ударами. В работе оценена магнитуа ледового удара $M = 0.3 - 0.8$ ($E = 10^4 - 10^5 \text{ Дж}$). Длительность цуга колебаний, составляющих удар, равна примерно $0.3 - 0.5 \text{ сек}$.

Согласно развиваемым в работе представлениям, и в первом, и во втором случаях – происходила спонтанная генерация ударной волны. Отметим важный для нашей модели момент: авторы [12] зарегистрировали временную задержку в 9 часов появления ледового удара (ударной волны) после прекращения генерации заметного акустического фона (сейсмическое затишье).

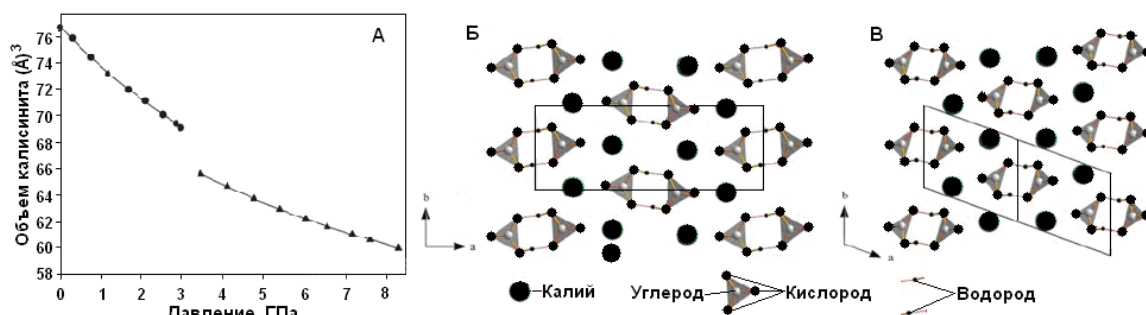


Рис. 4. Изменение удельного объема ($\Delta V/V = 4\%$) в калсините при давлении 3.2 GPa –А, изменение пространственной структуры калсинита – Б, В. [13].

Гидрокарбонат калия

Обратимся к экспериментам по сжатию калсинита – минерала гидрокарбоната калия (KHCO_3). Этот минерал давно изучается как объект, обладающий водородными связями, в которых - проявляются свойства квантовой запутанности. Сжатие калсинита приводит к резкой одновременной по всему объему образца перестройке структуры водородных связей (рис. 4), что вызывает изменение его удельного объема (т.е. плотности). Аналогичные результаты получены и на других образцах горных пород, в составе которых могут находиться атомы водорода и кислорода (азота, фтора и др.). Как отмечалось авторами многих исследований, такие перестройки водородных связей происходят мгновенно в больших объемах, возможно, именно эта особенность и названа их кооперативностью.

Силикат магния

Исследованы структурные и физические свойства вещества D-слоя мантии при высоком давлении [14]. Авторы полагают, что в этом слое находится в основном силикат магния ($\text{Mg}_2\text{Si}_2\text{O}_6\text{H}_2$). Предполагается, что это вещество обладает высокой стабильностью под давлением и является одним из наиболее подходящих кандидатов на роль источника воды в нижней мантии Земли. Оказалось, что расчеты и эксперименты поведения $\text{Mg}_2\text{Si}_2\text{O}_6\text{H}_2$ под давлением очень похожи. При 40 GPa была обнаружена симметризация водородных связей (рис. 5). Эта индуцированная давлением симметризация водородной связи сильно влияет на поведение фазы D при сжатии. При структурном изменении возрастает модуль сжатия примерно на 20%. Авторами ранее на примере $\delta\text{-AlOOH}$ сообщалось о подобной индуцированной давлением симметризации водородной связи.

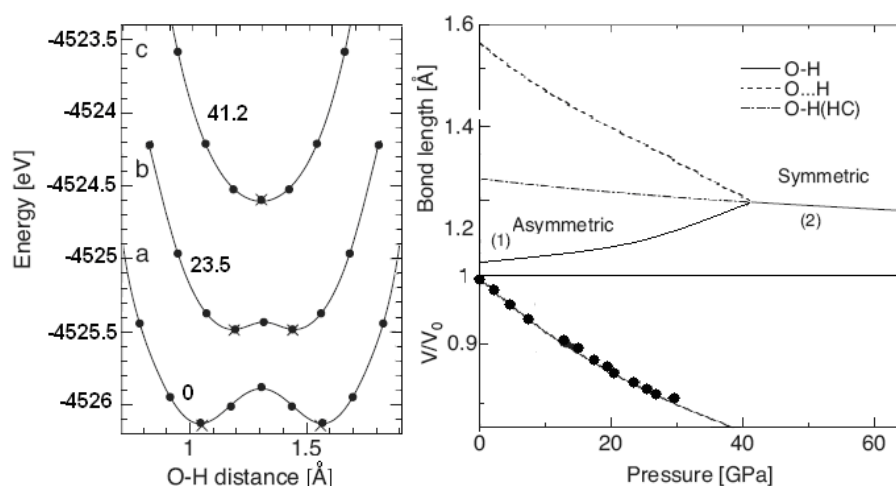


Рис. 5. Изменение потенциала Морса водородной связи О-Н (в ангстремах) под действием внешнего давления: 0, 23.5, 41.2 ГПа вдоль направления О...О. Слева: потенциал обозначен в электрон-вольтах, хотя приведены величины в см⁻¹. Справа сверху показан характер изменения расстояния между атомами для различных типов связи, - от величины давления. Относительное уменьшение объема кристаллической структуры с увеличением давления (справа внизу) [14].

Протон водородной связи одновременно притягивается к двум атомам кислорода. Он должен иметь два устойчивых положения равновесия на водородной связи: вблизи одного или другого атома кислорода. Потенциальная энергия протона описывается функцией с двумя минимумами (рис.5). При локализации протона в одном из них водородная связь приобретает дипольный момент.

Если вещество находится в состоянии протонного стекла, в котором не происходит упорядочения системы случайно распределенных диполей в жесткой изотропной матрице, то каждый *диполь помнит свою первоначальную ориентацию неопределенно долго* [15]. (Наличие «памяти» среды - важное для нашей модели свойство). Такие вещества относятся к разряду сегнетоэластиков.

Роль водорода

Известно, что в магматических породах содержатся практически все химические элементы, среди которых присутствует и водород. Самый распространенный среди них – это кислород, он составляет в среднем половину веса магматических пород. Из нашей модели следует, что сейсмичность должна быть связана с наличием водорода (иначе, водородных связей) в горной породе. Оказывается, это хорошо известный в практической сейсмологии факт. В качестве его подтверждения сошлемся на рис. 6.

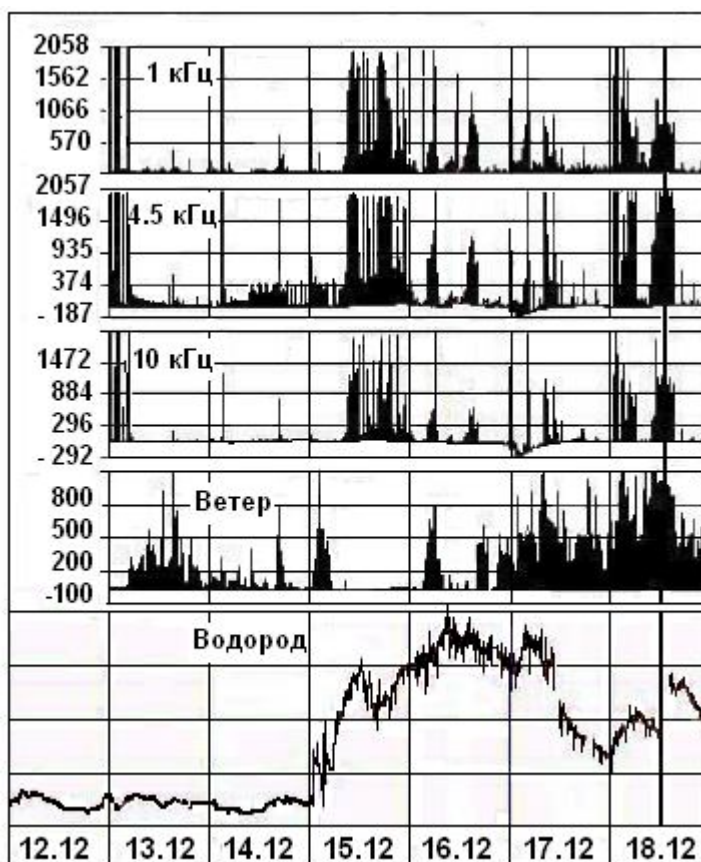


Рис.6. Сопоставление колебаний сейсмоакустической эмиссии с изменением концентрации растворенного водорода в потоке термальной воды во время и после землетрясения 18.12.2002 г. [18].

Предположим, что регистрируемый в этой работе водород связан с образованием водородных связей. Здесь можно обсуждать два варианта: либо они образуются при прокачке породы водородом, либо водород выделяется при разрушении водородных связей. В принципе, возможно, что функционируют оба механизма одновременно. Выбор между этими варианты ждет своего решения, а пока сошлемся на пару работ [16, 17] в которых авторы приводят данные о потоке водорода в приземную тропосферу в геодинамически различных геоструктурных зонах Земли, а так же оценивают, что в тропосферу стекает 10^9 молекул водорода в сек с см^2 . Это означает, что в год с 1 см^2 стекает - 310^{16} молекул, а с поверхности Земли ($5 \cdot 10^{18} \text{ см}^2$) общая масса водорода = $10^{35} \cdot 10^{-24} = 10^{11}$ г. За время эволюции Земли ($5 \cdot 10^9$ лет) количество выделившегося водорода равно $\approx 5 \cdot 10^{20}$ г. Авторы полагают, что контроль литосферного водорода может помочь в решении таких задач, как: прогноз землетрясений, поиск месторождений нефти и газа, картирование тектонических швов, мониторинга тектонических и техногенных процессов и т.п.

Приведенная информация свидетельствует в пользу идеи автора о роли водорода и водородных связей в образовании в литосфере, при вполне определенных рТ-условиях, - ударной волны. Однако, это ещё не совсем «сердце землетрясения». Нам необходимо найти причину, почему образование ударной волны происходит одновременно на огромной территории. Как отмечалось выше, такие явления связаны с проявлением известного свойства водородных связей – их кооперативности. Правда, от этого понятнее не становится, т.к. заявить, что «сердце» в кооперативности среды – совсем не проясняет физику землетрясения. На сегодня, единственное направление в физике, где можно ожидать ответа на вопрос, в чем же заключается физика кооперативности, это успехи, достигнутые в распространении принципов квантовой механики на макрообъекты. Речь идет об очень модном в наше время направлении, называемом квантовой запутанностью.

Сегнетоэластики

Сегнетоэластики - (ферроэластики) - кристаллические вещества [10], в которых при изменении температуры возникает *спонтанная деформация* кристаллической решётки относительно исходной в отсутствие внешних механических напряжений. Термин сегнетоэластики ввёл К. Айдзу (K. Aizu) в 1969. Спонтанная деформация является результатом *структурного фазового перехода* из более симметричной (параэластической) в менее симметричную (сегнетоэластическую) фазу (order-disorder). Например, кубическая сингония переходит в тетрагональную, гексагональная или тетрагональная - в ромбическую или моноклинную, ромбическая - в моноклинную.

Сегнетоэластики - многочисленный класс кристаллов, претерпевающих структурные фазовые переходы. Кристаллохимическая классификация сегнетоэластиков группирует их по типу пространственной укладки «эластоактивных» высокосимметричных (октаэдрических или тетраэдрических) анионных или катионных комплексов, повороты или деформация которых могут приводить к понижению симметрии кристалла. Структурная классификация сегнетоэластиков обычно указывает структурный тип «родоначальника» семейства изоморфных кристаллов (интернациональное назв. минерала). Семейства сегнетоэластиков образуют пальмиериты $[\text{Pb}_3(\text{PO}_4)_2]$, фергюсониты (BiVO_4) , тейлориты (K_2CrO_4) , тридимиты (CsLiSO_4) , лангбейниты $(\text{K}_2\text{Cd}_2\text{SO}_4)$, двойные тригональные молибдаты и вольфраматы $[\text{KFe}(\text{MoO}_4)_2]$, редкоземельные пентафосфаты $(\text{LaP}_5\text{O}_{14})$, фресноиты $(\text{Ba}_2\text{TiGe}_2\text{O}_8)$, дителлуриды $(\text{SrTe}_2\text{O}_5)$, семейство $\text{K}_4\text{Zn}(\text{MoO}_4)_3$, Сегнетоэластики с водородными связями H_3BO_3 , $\text{KH}_3(\text{SeO}_3)_2$, перовскиты (KMnF_3) и эльпасолиты $(\text{Cs}_2\text{NaNdCl}_6)$, каломель (Hg_2Cl_2) .

Энергия землетрясения

Оценим величину энергии, необходимой для операции сжатия калисинита, показанного на рис 4-А. Внешнее давление $p = 3$ ГПа приводит к изменению объема среды (ΔV) примерно на 5%, что составляет примерно 100 Дж см^{-3} . На рис. 4-Б и В изображен т.н. структурный фазовый переход типа «упорядочение – разупорядочение» [19]. В этой работе приведены величины энтальпий таких переходов для широкого спектра кристаллов. Можно принять, что при переходе выделяется (поглощается) энергия порядка 0.5 эВ на одну связь ($1 \text{ эВ} \approx 10^{-19} \text{ Дж}$). Рассмотрим, насколько энергия, выделяющаяся при разрушении (излома, поворота и пр.) водородной связи согласована с нашей предыдущей оценкой, полученной из соотношения $E = p\Delta V$.

Оценим количество водородных связей, необходимое для возникновения землетрясения, например такого, как Чуйское 2003. Магнитуда 7.5 эквивалентна энергии $E = 5 \cdot 10^{22} \text{ эрг} = 5 \cdot 10^{12} \text{ кДж} \sim 1 \text{ Мт (TNT)}$. Площадь поверхности очага S примерно равна $S = 100 \cdot 10 \text{ км}^2 = 10^{13} \text{ см}^2$, отсюда плотность энергии $\sim 500 \text{ Дж/см}^2$. Если уравнивать эти оценки, то мы получаем толщину фронта ударной волны порядка 0.5 см, что вполне соответствует требованиям к достаточно сильным ударным волнам. Количество водородных связей в объеме 0.5 см^3 равно, примерно, 500 Дж: $0.5 \text{ эВ} = 10^{22}$. Размер квазичастицы, в состав которой входят водородная связь $\approx 30 \text{ \AA}$. Для сравнения, размер водородной связи примерно составляет $2.5 \text{ \AA}$, размер атома несколько больше. Эта оценка показывает, что необходимое для генерации ударной волны количество водородных связей, - вполне достаточно. Важно, чтобы их количества не было бы больше, чем самих атомов – элементов кристаллической решетки. В нашем случае это условие выполняется. Сравним энергию водородной связи, приведенную в таблице в ккал/моль с принятой нами величиной в эВ на одну связь. Как отмечалось, $1 \text{ эВ} = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж} \approx 0.4 \cdot 10^{-22} \text{ ккал}$, 1 моль ОН (17) $= 1.6 \cdot 10^{-24} \times 17 = 27 \cdot 10^{-24}$. Принятая нами величина энергии водородной связи примерно равна 1.5 ккал/моль, что соответствует слабой связи (см. таблицу). Размер такой связи $2 - 2.5 \text{ \AA}$ – тоже совпадает с принятым нами значением. Превышение размера квазичастицы относительно размера атома примерно в 5 раз показывает, что не все водородные связи принимают участие в процессе, или - только у 20 % атомов имеются - подходящие. Таким образом, можно считать, что наличие водородных связей у минералов, находящихся под внешним давлением, может обеспечить необходимую для генерации ударной волны энергию.

Как отмечалось в разделе 4.2.1, энергия ледового удара $E = 10^4 - 10^5 \text{ Дж}$. Допустим, что возникновение ледового удара связано с разрушением (или перестройкой) водородных связей. Тогда поверхность льда, участвующего в формировании ледового удара оказывается порядка $2 - 20 \text{ см}^2$, что слишком мало. Величина магнитуды, по оценке авторов [12] $M = 0.3 - 0.8$. Длина разлома при такой магнитуде находится в пределах $\leq 10^3 \text{ см}$. Отсюда можно сделать вывод, что полученная нами выше плотность энергии $\sim 500 \text{ Дж/см}^2$ для льда оказывается на порядок-два меньше, чем для литосферы, что тоже не противоречит здравому смыслу. Зная площадь поверхности ледового удара, можно было бы оценить плотность активных водородных связей во льду.

Во время нагревания льда в нем происходит разрушение водородных связей. Этот процесс экзотермический, он происходит с выделением энергии в виде удара. Это явление получило название эффект Бриджмена. Когда лед замерзает, в нем образуются водородные связи. Это ведет к расширению льда и возникновению дополнительной акустической эмиссии, что и регистрировали авторы [12]. Это, пока, касается только льда. Можно ли распространить эти идеи на минералы?

Большинство минералов литосферы имеют в своем составе присоединенную воду, следовательно, имеют и водородные связи. В принципе они могут образовываться при прокачке среды водородом. В этом плане возникает вопрос, имеется ли подтверждение

наличия достаточного количества водорода в недрах Земли. Да, это действительно такое подтверждение имеется. Как следует из учебника по минералогии [20], минералы, обладающие водородными связями, например, диаспор (AlOOH) и гетит (FeOOH), даже записываются специальным образом: HAlO_2 , HFeO_2 .

Квантовая запутанность

Вернемся к рис. 1-а и предложим объяснение акустического сверхизлучения на идее квантового запутывания и нелокальности. Предположим, что если кристаллическая структура не имеет квантовой связанности между своими элементами, обладающими водородными связями, то они с течением времени постоянно образуются и разрушаются. При разрушении водородных связей – испускаются акустические импульсы, временная последовательность которых (N) – создаёт некий акустический фон $I \sim N$. Если N водородных связей оказываются квантовозапутанными (по принципу: каждая со всеми остальными), т.е. протоны водородных связей становятся неразличимы друг с другом, и вся структура описывается единой волновой функцией, то разрыв одной из них ведет к одновременному разрыву всех N связей (редукция волновой функции). В данной ситуации, очевидно, речь идет о многочастичной квантовой запутанности, используя которую авторы [21] получили распределение вероятностей, соответствующее состоянию теплового равновесия системы в термостате.

Акустический сигнал при этом возрастает (рис. 1-б) и становится равным $I \sim N^2$. Структура вещества, содержащего водородные связи, при этом изменяется, в слое резко возрастает плотность, а интенсивный акустический фон создает дополнительное давление: создаются условия для возникновения УВ.

Примеры квантового запутывания

Приведем один из примеров квантового запутывания фотонов. В эксперименте флуоресцентное излучение собиралось широкоапертурными линзами и направлялось в противоположные от источника стороны [6]. Фотоны через интерференционные фильтры и поляризаторы направлялись на фотоумножители, которые подключались к счетчикам совпадений при двухфотонном детектировании.

Спектр вначале содержит плоский участок, обусловленный случайными совпадениями между фотонами, излученными разными атомами. Истинные совпадения (между фотонами, излученными одним и тем же атомом) отображаются в виде пика при нулевой задержке (рис. 1-б, сравни с рис. 1-а), спадающего по экспоненте с постоянной времени 5 нс (время жизни промежуточного каскада).

Обсуждаемый нами материал дает основание полагать, что и эксперименты, и наблюдения АЭ, представленные на рис. 1-а, 1-б, связаны не с образованием трещин, как предполагалось, а с эффектами квантовой запутанности водородных связей и редукцией волновой функции, следствием которой может быть образование ударной волны. Стоит отметить, что пока эксперименты, в которых однозначно доказывалась квантовая запутанность, проводились либо с парой, либо с двумя парами фотонов. В самое последнее время были предприняты попытки доказать, что это явление можно обобщить и на многочастичные системы.

Дальнодействие и многочастичность квантового запутывания

Продemonстрируем дальнодействие квантовой запутанности на известных к настоящему времени экспериментах. Датским ученым удалось связать частицы газов, расположенные на значительном расстоянии друг от друга, передавая информацию от одной к другой при помощи лазера. Между двумя облаками газа была достигнута так называемая "квантовая связь": удалось связать около миллиона атомов цезия. Связь между состояниями фотонов на гигантских (в масштабах микромира) расстояниях – более 10 км –

опубликованы швейцарскими учёными летом 2001 года в журнале "Physical Review A". Удачный эксперимент, поставленный в марте 2009 в Калифорнийском университете, показал, что квантовые состояния можно передать на расстояние до 1000 километров за 7,2 микросекунды (!).

По-видимому, самым удивительным результатом, в этом плане, можно считать эксперимент [22], выполненный с пространственно-разделенными запутанными TLD-кристаллами, предназначенными для термолюминисцентной дозиметрии, находящимися в Батон-Руж, Луизиана (США) и Живарлэ (Франция) на расстоянии 8182 км. Образцы из легированного фторида лития были облучены тормозным излучением одновременно и совместно (в одном месте) с целью создания запутанных ловушек в смежных TLD-чипах на медицинском ускорителе. Один из этих чипов был отправлен в Батон-Руж, а его запутанный партнер остался в Живарлэ. Подогрев образца, находящегося в Батон-Руж, производился в соответствии с температурой другого (запутанного с первым) образца, которая измерялась фотоумножителем в Живарлэ и была равна температуре окружающей среды. Были получены коррелированные сигналы при нарастании, а затем убывании (вследствие отключения подогревающего устройства в Батон-Руж) температуры. Момент, когда в Батон-Руж достигнут максимум температуры TLD, точно соответствовал моменту максимума корреляции сигнала фотоэлектронного умножителя, записанного в Живарлэ (рис. 7). Этот эксперимент выходит за рамки обычных представлений. Авторы [22] осознавая это, предлагают повторить его в других условиях. Полагаю, что такое повторение крайне необходимо для дальнейшего понимания физики дальнего действия многочастичного квантового запутывания. Получение подобных результатов другими исследователями и их осмысление, возможно, позволит приблизиться к решению этой важной в практическом плане проблемы.

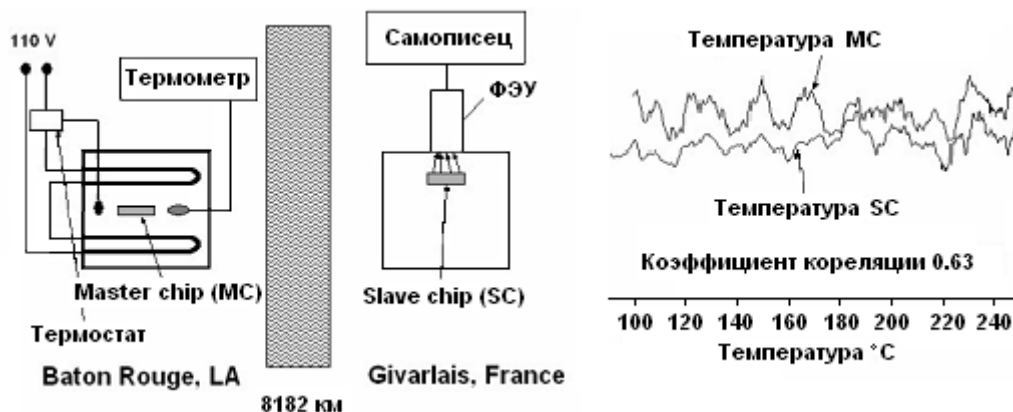


Рис. 7. Слева: трансконтинентальный эксперимент между Батон-Руж, Луизиана (США) и Живарлэ (Франция). Справа: Вверху – температура чипа H1, LiF100 подогреваемого в Батон-Руж. Внизу – сигнал от вспомогательного образца в Живарлэ [22].

Тем не менее, эти примеры дают надежду на получение положительного результата по дальнему действию многочастичной запутанности при наблюдении акустической эмиссии на двух идентичных образцах горной породы, сжимаемой на идентичных прессах, расположенных на значительном удалении их друг от друга. Такой результат мог бы служить подтверждением высказанной выше идеи о возможности запутанности геологической среды в момент, предшествующий землетрясению. При положительном исходе такого эксперимента мы, несомненно, приблизились бы к пониманию того, что представляет собой «сердце землетрясения».

Квантовое запутывание в сейсмологии

В наблюдательной сейсмологии известны наблюдения акустических сигналов, как правило, предшествующих, или сопутствующих землетрясению. Одновременно наблюдаются и электромагнитные сигналы очень низкой частоты (ОНЧ) – близкие по характеру к акустическим, - и по форме импульсов, и по частоте их следования. Ряд авторов полагают, что и акустическая, и электромагнитная эмиссия могут использоваться как признаки близкого по времени прихода землетрясения. Эти идеи основываются на том, что и те и другие сигналы предшествуют землетрясению. Более того, при наличии соответствующей аппаратуры для регистрации эмиссии, датчики обеспечивают пеленг на землетрясение. Разумного объяснения эти наблюдения в рамках общепринятой механистической модели землетрясения не получили, это дает основание попытаться найти таковое в ударно-волновой модели. Так как автор занимался в большей степени получением и анализом акустических сигналов, дальнейший материал будет посвящен именно этой проблеме.

На рис. 8-а приведены результаты наблюдений акустической эмиссии полученной при мониторинге камчатского землетрясения 18.12.2002, 11:09:21, 52.9 с.ш., 159.8 в.д., глубина 42 км, класс 12.1, расстояние ~ 120 км [23]. На трех верхних панелях рис. 6 – акустическая эмиссия этого же землетрясения, зарегистрированного в другой точке (~ в 20 км) Камчатки. Характерным для акустической эмиссии камчатских землетрясений является наличие пика его активности примерно за сутки и её отсутствие накануне толка. На рис 8-б приведены результаты наблюдений в начале ноября 2003 афтершоков Чуйского землетрясения ($M = 7.5$), произошедшего на юге Горного Алтая на территории Кош-Агачского района 27 сентября 2003 г. в 11 час. 33 мин. по Гринвичу [24]. На верхней панели инфразвук, на нижней панели – сигнал вертикального сейсмографа, установленного на сейсмостанции Акташ, расположенной практически в эпицентре афтершоков.

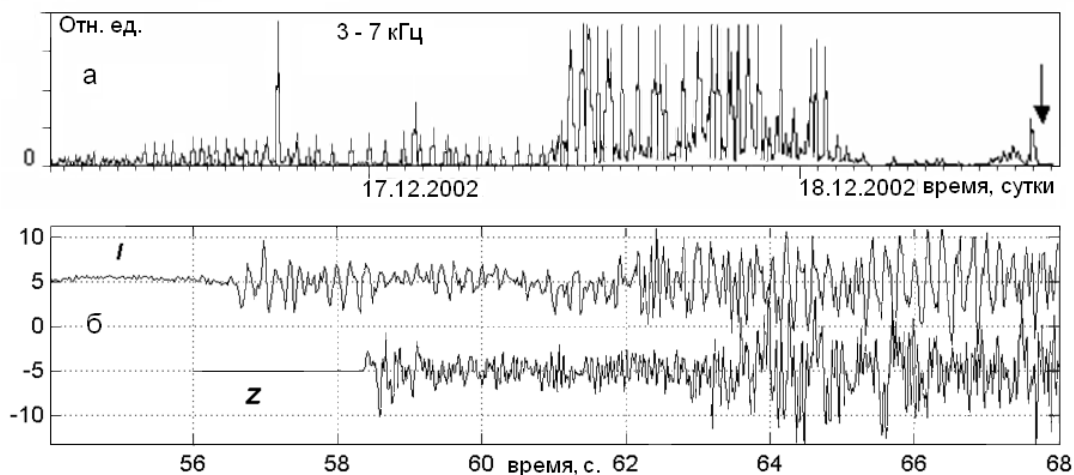


Рис. 8. Акустическая эмиссия, зарегистрированная на обсерватории ИКИР на Камчатке [23] – а, стрелка – землетрясение; б – акустический сигнал I и сигнал вертикального сейсмографа Z, одного из афтершоков Чуйского землетрясения на Алтае $M = 7.5$ в 2003 г., записанные на сейсмостанции Акташ [24].

Общим для этих, казалось бы, совершенно различных наблюдений является то, что инфразвук опережает землетрясение. Возможно, что наблюдаемое на рис 8-б опережение сейсмического сигнала проявляется как «подземный гул», предшествующий удару. При изучении афтершоков Чуйского землетрясения, такой гул наблюдался нами неоднократно. Источник акустической эмиссии и «гула» остается неизвестным. Попытаемся выяснить

его природу. Это тем более важно, что на опережении акустической эмиссии удара землетрясения строятся системы его прогноза. Для начала оценим глубину расположения источников акустической и электромагнитной эмиссии.

Коэффициенты поглощения β от частоты акустической волны для пород различного литологического состава представлены в книге [25]. Отсюда коэффициент затухания сигнала частотой 10 кГц $\beta \approx 1 \text{ м}^{-1}$, иначе, такой сигнал затухает в несколько раз на расстоянии в метр. Акустический сигнал $f \approx 10 \text{ кГц}$, регистрируемый аппаратурой, не может достигать приемника, если он возникает в районе гипоцентра землетрясения.

Коэффициент поглощения электромагнитного сигнала α записывается как: $\alpha \approx (\pi \mu f / \rho)^{1/2}$, где μ - магнитная проницаемость, ρ - удельное сопротивление, f - частота сигнала. На частоте 1 кГц для магнетита $\alpha = 170 \text{ м}^{-1}$, а на частоте 10 кГц $\alpha = 560 \text{ м}^{-1}$. Изменение амплитуды гармоники частотой 1 кГц на расстоянии 1 см определяется как 0.37, а для частоты 10 кГц эта величина равна $3.7 \cdot 10^{-3}$, иначе, сигнал частотой 10 кГц убывает в 100 раз сильнее. Фактически отсюда следует, что электромагнитный сигнал частотой 10 кГц возникает практически на поверхности земли и никак не может быть обнаружен с глубины очага землетрясения. Обе приведенные оценки показывают, что источник сигнала находится вблизи приемника и, вместе с тем, - со всей очевидностью имеет связь с землетрясением. Причем, эта связь не может передаваться ни по акустическому каналу, ни по электромагнитному.

Принято считать, что акустическая эмиссия обязана исключительно раскрытию трещин [2]. Однако это не совсем верное предположение. Так, например, в работе [26] она измерялась в тающем льду с использованием дефектоскопического акустически-эмиссионного комплекса A-Line32D. Авторами обнаружен эффект акустической эмиссии в тающем льду, причем по мере его таяния, длительность сигналов возрастает, а мощность сигналов - падает. Авторы обнаружили наличие акустической эмиссии в талой воде. По мере дальнейшего нагревания воды, - сигналы эмиссии исчезают.

Последний факт - наиболее примечателен, он показывает, что акустическая эмиссия вызывается не только хрупким разрушением, а и другими различными физико-химическими процессами. Известно, что лед от воды отличается количеством упорядоченных водородных связей - других отличий нет. Количество водородных связей меньше чем во льду, но больше, чем в обычной воде. Есть все основания полагать, что в этом эксперименте акустика связана с разрушением водородных связей. Генерация акустических импульсов происходит не только при таянии льда, но и при его росте [27]. Упомянем так же, что и при кристаллизации воды, и росте льда, а так же при его разрушении, - наблюдаются электромагнитные импульсы, схожие по форме с акустическими импульсами [28, 29]. Всё это говорит о том, что образование и разрушение ВС в образцах горной породы может быть причиной акустической и электромагнитной эмиссии, регистрируемой в экспериментах и наблюдениях.

Остается выяснить ещё один вопрос, которого мы касались «по ходу» статьи и возможного ответа на который - пока не обсуждали. Каким образом звуковой сигнал приходит на приемник раньше, чем сейсмический? Раньше, чем приходит ударная волна. Необходимо при этом учитывать то обстоятельство, что и звук, и электромагнитный сигнал сравнительно высокой частоты - не могут преодолеть расстояние между гипоцентром землетрясения и приемником сигнала. Этот вопрос непосредственно связан с проблемой возникновения ударной волны, кооперативностью (способностью к синхронизации) геологической среды, физикой закона повторяемости землетрясений и пр.

Очевидно, что регистрируемые акустические и электромагнитные сигналы датчиками, расположенными в сотнях километров от эпицентров землетрясений, не могут быть генерированы непосредственно в очаге землетрясения. Как было показано, источник

сигнала находится в непосредственной близости (километры, сотни метров) от датчика. Тем не менее, связь регистрируемых сигналов с землетрясением – очевидна. Акустический шум нарастает перед землетрясением и, за несколько часов до него, – прекращается. Наступает сейсмическое затишье. Точно так же акустическая эмиссия ведет себя при нагружении льда.

Очаг землетрясения

Распространение ударной волны по очагу 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 в очаге 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.

Рассмотрим процессы, сопутствующие распространению ударной волны по очагу землетрясения, т.е. по геологической среде, от места образования ударной волны – 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.

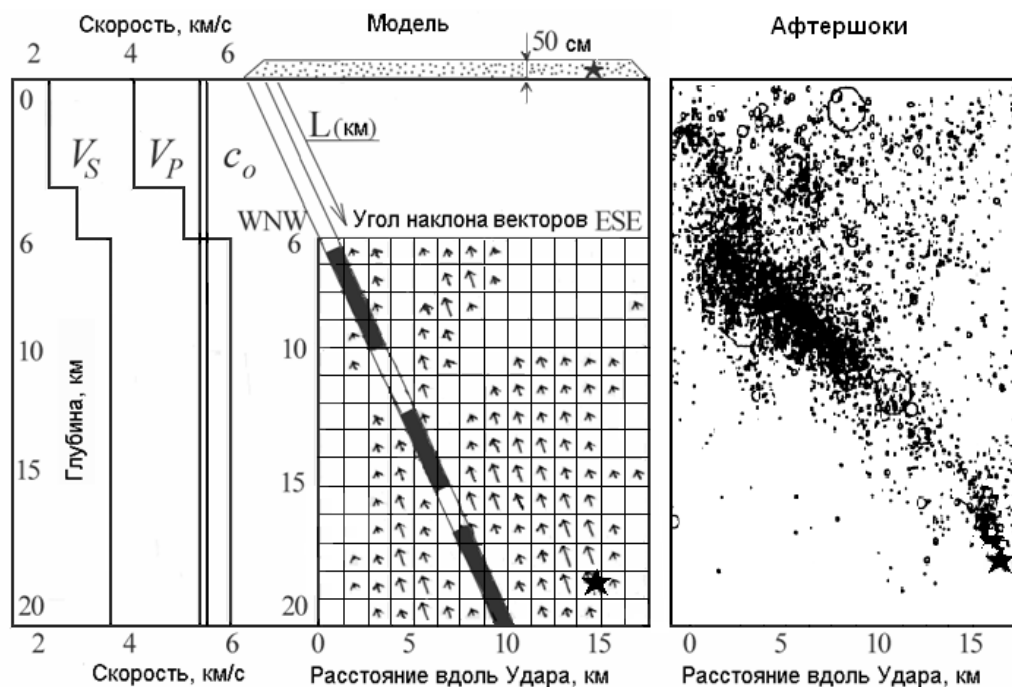


Рис. 9. Модель разрывов Нортриджского землетрясения [31, 32] (в центре). В левой части рисунка - распределение скоростей P-, S-волн и ударной волны c_0 - по глубине [30]. В правой - афтершоки Нортриджского землетрясения [36].

На рис. 9 в центре, изображена модель разрывов Нортриджского землетрясения. В левой части рис. 9 показано одномерное распределение скоростей сейсмических P- и S-волн по глубине [30]. На рис. 9 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 [31] показано, что главный удар землетрясения в Нортридже, состоит из трех, следующих друг за другом, импульсов. Длительность главного удара землетрясения, по основанию импульса, составляет $\tau \approx 8$ сек. Скорость разрыва равна $V = L/\tau = 2.8$ км/с. Как следует из [30], 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 км 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 [32]: на глубине 6 километров и выше (рис. 9), т.е. вблизи земной поверхности, генерации объемных волн не наблюдается.

Для решения этой задачи обратимся к физике распространения ударной волны и образования волны разгрузки в сплошной среде. Волна разгрузки может образоваться не только при выходе ударной волны на свободную поверхность, а, как показано Зельдовичем и Райзером [33], 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 ударной волны 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 $c = (K/\rho)^{1/2}$. Ударная волна расщепляется на упругую и пластическую волны. По нагруженному телу “бежит” ударная волна разгрузки в сторону, обратную распространению ударной волны. 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 [33]. Заметим, что если скорость ударной волны 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 6 км. Кроме этого, по нашим оценкам, скорость ударной волны примерно (5 - 6) км/с. Скорость распространения Р-волн такого порядка значений, соответствует глубине около 6 км. Отсюда следует, что на глубинах меньших 6 км расщепления ударной волны и генерации волны разгрузки происходить не может. Действительно, этот эффект наблюдался при землетрясении в Нортридже. Здесь, на вертикальном разрезе (рис. 9), проходящем через гипоцентр землетрясения, определены вектора подвижек, соответствующие интенсивности объемных волн [32]. 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 (< 6 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 ударной волны, поэтому не возникает волна разгрузки, поэтому нет и генерации объемных волн. Факт, что генерации объемных волн в некоторых частях разреза не происходит, может говорить, например, о том, что ударная волна, на своем пути, встречается с ослабленной зоной среды очага. В этой зоне не происходит её расщепления, либо она пересекает область пространства, в которой, по ряду причин, скорость звука значительно ниже скорости её распространения, что тоже может служить препятствием к расщеплению ударной волны 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 ударной волны и, соответственно, генерации объемных волн.

«Сейсмические гвозди»

Используемая сегодня модель субдукции сводит всю сейсмичность зон субдукции к зонам Беньофа (сейсмофокальным зонам) и приповерхностной зоне землетрясений. Однако, при изучении сейсмического каталога JMA (Japan Meteorological Agency) за период с 1989 по 1995 гг., авторами [34, 35] был обнаружен факт существования скоплений очагов землетрясений, которые не могли быть отнесены ни к одной из известных сейсмических зон. За их характерную субцилиндрическую форму, ориентированную преимущественно вертикально с возможным отклонением в несколько градусов, - В.Н. Вадковский дал им название: «сейсмические гвозди».

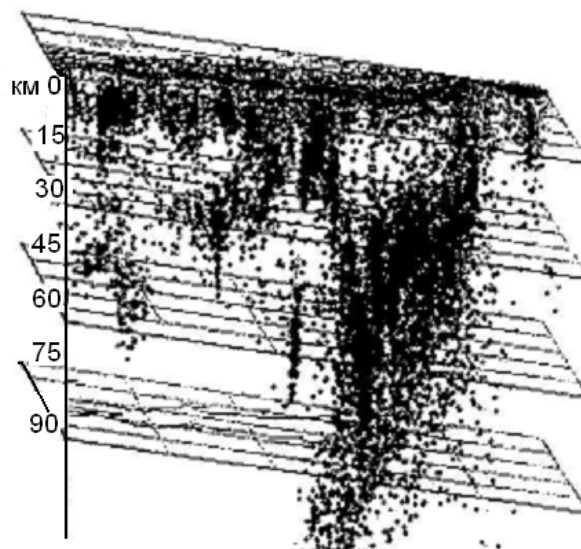


Рис. 10. «Сейсмические гвозди» в зоне субдукции Японии. [34, 35].

Сводная характеристика «сейсмических гвоздей», полученная авторами в результате исследования трех из них, выделенных в пределах Японской зоны субдукции (о. Хонсю) (рис.10):

- «Сейсмические гвозди» образуются как в породах висячего крыла, так и в континентальной земной коре, причем в последней их значительно больше, что, по-видимому, связано с ее большей хрупкостью. Глубина их образования ограничена снизу значением 75 км.
- «Сейсмические гвозди» состоят главным образом из очагов малоамплитудных землетрясений (порядка 2-3 баллов).
- «Сейсмические гвозди» имеют следующие пространственные характеристики: высота - 50-70 км; максимальный поперечный размер ~4-6 км; количество очагов землетрясений, слагающих «сейсмический гвоздь» от 100 до 1000; время образования от 2 недель до нескольких месяцев, а возможно и больше. Стоит заметить, что «сейсмические гвозди» нужно рассматривать масштабно. Например, было замечено, что некоторые «сейсмические гвозди» состоят из нескольких более мелких «сейсмических гвоздей», подобных им.
- Возникновение «сейсмических гвоздей» - процесс затухающий, но отличающийся от характера затухания афтершоков землетрясений.
- Были замечены различия в морфологии «сейсмических гвоздей». Существуют «сейсмические гвозди», начавшие образовываться над очагом относительно сильного землетрясения, на 1-2 балла превосходящее магнитуды землетрясений самого «сейсмического гвоздя». В противовес им наблюдаются гвозди без начального сильного землетрясения.
- Землетрясения, очаги которых формируют «сейсмический гвоздь», происходят одновременно по всей его протяженности.

Складывается впечатление, что сейсмические гвозди имеют какой-то другой дополнительный источник, вызывающий увеличение сейсмичности. Такой источник визуально (рис. 10) похож на некий объем наполненный газом, расположенный ниже 60 – 100 км, газ из которого через отверстия поступает в некую среду, например, в воду и регистрируется в виде поднимающихся пузырей. Каждый «пузырь» - это землетрясение. Если такая модель правомерна, то в качестве флюида может быть, например, водород

(раздел 4.1.4), а образование режима «сейсмических гвоздей», возможно, происходит в случаях, рассмотренных в разделе 11.

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 (рис. 9) [36]. Согласно нашей модели, для образования объемных волн, возникающих при прохождении ударной волны от гипоцентра к земной поверхности, на ее фронте должны развиваться давления порядка предела текучести вещества, через которое распространяется ударная волна. Очевидно, что в таком случае на фронте ударной волны должна происходить дополнительная накачка среды её энергией, что по прошествии определенного времени, должно вызывать каскад землетрясений – афтершоки.

Представим себе очаг землетрясения в виде прямоугольного двумерного тела, горизонтальная ось которого - равна по величине длине разлома главного землетрясения L , а вертикальная – показывает глубину гипоцентра h . Поделим величину h на ряд слоев n , в каждом из которых, при достижении соответствующих условий, может возникнуть ударная волна – афтершок. Известно, что во времени, перед каждым ударом землетрясения наблюдается специфическая зона «молчания». Она достигает нескольких часов, иногда - суток. Как отмечалось, время начала структурного перехода в среде не является малым. Предположим, что в течение некоторого времени (времени молчания) – t происходит формирование условий в слое, приводящих к образованию ударной волны. Очевидно, что чем сильнее землетрясение (M), тем больше это время $t \sim M$.

Ударная волна основного землетрясения распространяется вверх и основной его удар приводит к формированию $N(t)$ афтершоков, параметрами которых можно считать: магнитуду M_i , время формирования t_i и длину разлома Li , которая однозначно связана с магнитудой $Li \sim M_i$.

Известно, что статистика афтершоков подчиняется правилу (закону повторяемости) Гуттенберга-Рихтера для магнитуды: $\lg N = a - bM$, или $N_{(M)} \sim 1/M_i^b$, где b - нецелое число, фрактальная размерность явления.

Учитывая эти обстоятельства, можно считать, что после прохождения ударной волны ближайшие к гипоцентру слои будут возбуждаться и генерировать вторичные УВ – афтершоки. Если в этом процессе будет участвовать весь слой длиной L , то это будет сильный афтершок с магнитудой практически равной магнитуде основного землетрясения. Вероятность его появления довольно мала, т.к. согласно закону повторяемости более слабых землетрясений производится значительно больше. В слое могут образоваться N землетрясений, сумма длин разломов которых будет примерно равна L .

Предположим, что время подготовки сильного афтершока равно $\tau = 24$ часа, самого слабого $\tau_1 = 1$ час. Тогда в течение суток может произойти либо одно сильное землетрясение ($N = L/t = 1$), либо $N(t) = Lk/t_i$, где $k = L/Li$ - количество мелких афтершоков в слое L . Отсюда следует зависимость: $N(t) \sim 1/t$, называемая законом Омори. Однако, в этом эмпирическом законе не учитывается распределение афтершоков по энергии, а так же тот факт, что сила афтершоков уменьшается по мере приближения их к дневной поверхности очага. Такой учет возможен в нашей модели при численном решении задачи.

Обратим внимание на хорошо известный сейсмологам факт: после глубокого землетрясения афтершоки практически отсутствуют, однако, и эта закономерность иногда нарушается. Авторам [37] 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.

Закон повторяемости землетрясений

Закон Гуттенберга-Рихтера

В отличие от закона Омори, где принципиальным моментом является передача от ударной волны дополнительного напряжения в среду очага землетрясения, в законе повторяемости этот факт исключается, статистика землетрясений рассматривается вообще только на больших интервалах порядка года и больше. Это означает, что условия, необходимые для реализации сейсмической активности – практически неизменны во времени. И если они изменяются, меняется наклон графика повторяемости.

Анализ сильных землетрясений, произошедших задолго до недавнего явления, показывает, что гипоцентры сильных событий совпадают реже, чем раз в сто – двести лет. Так, например, на юге Горного Алтая на территории Кош-Агачского района 27 сентября 2003 г. в 11 час. 33 мин. по Гринвичу произошло сильное Чуйское землетрясение с магнитудой 7.5, которое произвело значительные разрушения в селах Бельтир (8 баллов), Чаган-Узун, Ортолык, Курай, Акташ (6-7 баллов). Очаг землетрясения располагался в пределах Северо-Чуйского хребта, Чуйской и Курайской межгорных впадин и разделяющего их Чаган-Узунского приподнятого блока. Чуйское землетрясение 2003 произошло в районе разлома Кускуннур (координаты гипоцентра Главного удара: 50.09° N, 87.98° E), по всей видимости, - не случайно. Известно, что 9 декабря 1761 г. практически в том же районе произошло Монгольское землетрясение ($M = 7.7$; 50.0° N, 90.0° E), координаты которого совпадают с координатами Чуйского землетрясения. Будем полагать, что 100 – 200 лет, это время «долговременной памяти» геофизической среды. Через такой промежуток времени изменения в структуре литосферы, которые произошли в момент генерации главного удара, прекратились, и среда была восстановлена для реализации следующего удара. Отметим, как отмечалось выше, элемент среды *помнит свою первоначальную ориентацию неопределенно долго*. Это означает, что геологическая среда, обладающая специфическими свойствами, имеет долговременную память. Такой подход правомерен, но он не вносит ничего принципиально нового в понимание повторяемости землетрясений. Воспользуемся другим подходом.

Землетрясения - фликкер-шум?

Постановка такого вопроса вполне правомерна, остановимся на статье, озаглавленной так же как этот параграф [38]. Её авторы сравнивают физические закономерности, выявленные при экспериментальном изучении динамических свойств горных пород в трех различных типах исследований: 1) построение графиков повторяемости при изучении региональной сейсмичности, 2) изучение неупругих свойств по поглощению сейсмических волн и 3) связь неупругих свойств с неустановившейся ползучестью. Подобие спектров мощности флуктуаций напряжений для трех различных процессов $S(\omega) \sim \omega^{-\alpha}$, $\alpha = 1 - 1.5$, указывает на возможность их принадлежности к единому классу явлений: фликкер-шуму в неупорядоченных структурах. Авторы предполагают, что такое замечательное свойство сейсмичности можно использовать при прогнозе землетрясений.

Для объяснения природы фликкер-шума предложено несколько теорий [38], ни одна из которых не получила признания. Наиболее важное и интересное для нас здесь свойство фликкер-шума состоит в способности его усиливаться во фрактальных структурах. Эффект усиления связан с приближением системы за счет перколяционных процессов к порогу устойчивости. Авторы полагают, что переход устойчивой дискретной среды в

неустойчивое состояние должен происходить при более кооперативном взаимодействии её элементов, чем простой разрыв связей в модели перколяции. Обсуждая проявление закона $S(\omega) \sim \omega^{-\alpha}$ в широчайшем интервале масштабов Земли, они приходят к заключению, что фрактальность является её неотъемлемым свойством.

Низкочастотный фликкер-шум (или $1/f$ -шум) – один из удивительных феноменов Природы. Он впервые был зафиксирован в 1925 г. как эффект медленных флуктуаций (мерцаний) эмиссионной способности катодов электронных ламп и вызванных этими мерцаниями флуктуации тока лампы. Последующие исследования показали неизбежность его проявления при прохождении электрического тока в различных материалах (металлических пленках, полупроводниках) и приборах электронной техники, при химических превращениях в конденсированной фазе, геофизических и астрофизических явлениях, в последовательности нуклеотидов в наследственных структурах и др. [39]. Обычно анализируется спектр мощности $S(f)$ (f – частота) динамической переменной $V(t)$ (t – время), представляемой в виде временного ряда. Для фликкер-шума характерно возрастание $S(f)$ в пределе малых частот: $S(f) \sim f^{-n}$, где $n \sim 1$. При этом $V(t)$ может иметь разнообразный смысл: измеряемый параметр физических объектов; скорость химических превращений в конденсированной фазе; изменения интенсивности электромагнитных или акустических сигналов, напряженности магнитного поля вблизи выделенного участка поверхности Солнца, интенсивности солнечного ветра, светимости сейфертовских галактик; вариации показателей деятельности сердечной мышцы, других биоритмов, стоков рек, сейсмической или вулканической активности, численности популяций в экосистемах, индекса цен на бирже, интенсивности движения городского транспорта, муниципальных или федеральных бюджетов; скорость изменения прожиточного минимума и показателей общественного мнения, и т.п.

В ряде работ [40, 41] показано, что причиной фликкер ($1/f$)-шума является прохождение фазового перехода при особых условиях: пересекающиеся фазовые переходы, неравновесные фазовые переходы в присутствии белого шума и пр. Как правило, среда, в которой возникает фликкер-шум, – не является стационарной. Она стремится достигнуть термодинамического равновесия посредством реализации фазовых переходов. Как эти идеи можно соотнести с сейсмически активной средой? Можно ли рассматривать её как среду с фазовым переходом?

Однозначно ответить на эти вопросы пока не представляется возможным. Причина землетрясения, по нашей модели – это возникновение ударной волны, которая образуется вследствие структурного фазового перехода в кооперативной (квантово связанной) среде. Если развить эту идею и распространить её на весь сейсмически активный регион, предположив, что здесь реализуется тот самый структурный фазовый переход, причем, вся среда обладает кооперативными свойствами. То отсюда следует, что подобная среда может обладать долговременной «памятью», без которой закон повторяемости – получить невозможно.

Если речь идет о том, что это за фазовый переход, то рассматриваемую ситуацию можно уподобить (для наглядности) кастрюле с водой, которая нагревается и начинает кипеть испуская редкие пузыри. Это фазовый переход первого рода – кипение. Тогда в нашем случае, роль «всплывающих пузырей» исполняют «всплывающие» к поверхности ударные волны, а дно кастрюли – область гипоцентров землетрясений.

Согласно нашей модели, огромное пространство сейсмически активной среды обладает кооперативностью (квантовой запутанностью). Кооперативность базируется на особых свойствах водородных связей, присутствующих в минералах литосферы. Однако водородные связи присутствуют и в воде, и в атмосфере. В принципе, нет ограничений тому, чтобы водородные связи литосферы не имели бы возможности включить в свою область взаимодействия водородные связи воды и атмосферы. Такой подход открывает возможность прогноза землетрясения по анализу состояния, как литосферы по

акустическим и электромагнитным сигналам, так и атмосферы, и гидросферы. Иначе, наша модель несет в себе физическую возможность прогноза. Кроме этого, такая идея находит подход для объяснения т.н. наведенной сейсмической активности и т.д.

Наведенная сейсмическая активность

В последние годы внимание сейсмологов привлек новый феномен в динамике земной коры, получивший название наведенной или техногенной сейсмичности. Суть этого явления заключается в том, что антропогенные воздействия могут приводить к образованию дополнительных напряжений внутри Земли и влиять на развитие природных процессов: ускорять накопление напряжений, увеличивая частоту проявления землетрясений, или способствовать разрядке уже накопившихся напряжений, т.е. являться "спусковым крючком" подготовленного природой сейсмического события. Наиболее часто наведенная сейсмичность проявляется при строительстве крупных водохранилищ и закачке флюидов в глубокие горизонты земной коры.

Наведенная сейсмичность. Реалии и мифы

В работе под таким названием [42] рассмотрены вопросы инициирования землетрясений другими сильными землетрясениями, а также подземными ядерными взрывами. Авторами обработаны все данные мирового каталога землетрясений за 1950–2005 гг., использована эффективная и надежная методика анализа сейсмической активности с учетом ее фонового состояния. В результате однозначно установлено, что воздействие сильных землетрясений или взрывов весьма незначительно (если вообще имеет место). Во всяком случае, оно не может быть выявлено по записям в каталогах землетрясений, на чем были основаны многие статьи по проблемам наведенной сейсмичности. Этот вывод имеет большое значение для оценки возможности разработки оперативного прогноза землетрясений. Если бы такое воздействие существовало, то подобный прогноз стал бы невозможным из-за непредсказуемости инициирующего эффекта

Техногенная и природная активность на Кузбассе

Авторы [43] изучали природную и техногенную активность в районе г. Полысаево Кемеровской области, где наблюдается локальная сейсмическая активизация. Обнаружено четыре зоны, одна из которых не имеет прямой связи с горными выработками. События происходят в интервале глубин 2–3 км. Три зоны увязываются авторами с выработками, образовавшимися при добыче угля (лавами). Сейсмические события происходят глубже лав, достигая глубины под ними около километра. Авторы отмечают ослабление сейсмической активности при остановке добычи угля в лаве.

Обнаруженное авторами явление возникновения сейсмоактивной зоны, в которой прямой связи с антропогенным воздействием не наблюдается, можно рассматривать как объект для исследования возможного инициирования сейсмичности за счет квантовой запутанности среды.

Заключение

Что же такое «сердце землетрясения?». На этот вопрос можно ответить примерно так: Ключевым моментом в физике землетрясения является идея о кооперативных свойствах геофизической среды, причем, возможным механизмом кооперативности может оказаться квантовая запутанность этой среды на протонах водородных связей, входящих в природные минералы. В литосфере квантовая запутанность возникает в результате воздействия литостатического и сдвигового (геодинамического) давления. Она приводит к тому, что протоны водородных связей минералов ведут себя как одна частица. При нарушении запутанности одного протона, происходит моментальный «срыв» всех

остальных протонов, что приводит к мгновенному изменению кристаллической структуры, что приводит к возникновению ударной волны. Такая процедура называется в различных работах: структурным фазовым переходом, спонтанной деформацией, полиморфным переходом и пр.

Появление в среде афтершоков является следствием воздействия ударной волны на напряженную внешним давлением среду. Проявление сейсмичностью Земли свойств фликкер-шума (закон Гуттенберга-Рихтера) является следствием структурного фазового перехода, происходящего в огромном массиве горной породы, в которой, в принципе, возможно возникновение квантовой запутанности. Массив горной породы – это тектонически активная среда, которая находится в состоянии, далеком от равновесного. Неравновесность среды связана с тем, что в литосфере реализуется предложенный автором принцип минимизации гравитационного потенциала Земли [44], как альтернатива тектоники литосферных плит. Именно из-за действия этого принципа происходит дрейф материков и в литосфере возникают сдвиговые напряжения. Согласно нашей модели, взаимодействие сдвиговых и литостатических сил приводит к возникновению запутанности.

Может возникнуть впечатление, что проблема землетрясения уже решена. Конечно, нет, это только первые намеки на её решение. Перечислим некоторые проблемы, решение которых позволит, по мнению автора, приблизиться к более ясному пониманию физики землетрясения:

- Численное моделирование: выхода ударной волны на поверхность, механизма распространения ударной волны от гипоцентра землетрясения до поверхности Земли, т.е. формирование очага землетрясения. В результате численного моделирования должно быть получено пространственное распределение поля векторов массовой скорости за фронтом ударной волны.
- Подбор наиболее адекватных реологических и термодинамических параметров для грунта и сейсмического разреза среды. Создание базы сильных движений. Используя сейсмологические базы данных, выяснить реальность постулируемой в ударно-волновой модели землетрясения - связи особенностей морфологии области её формирования на глубине гипоцентра, с акустическими особенностями очага и разломными диаграммами.
- Проведение экспериментальных исследований явления акустического сверхизлучения возникающего в образцах горных пород при испытании их на прессах. Выяснить возникает ли режим кооперативности на одном, двух и более образцах. Выяснить имеется ли связь между акустическим сверхизлучением и возникновением ударной волны.
- Проведение исследования роли водорода в сейсмичности (в эпицентре Чуйского землетрясения, в Кузбассе и пр.). Исследование явлений изменения акустического и электромагнитного фона перед землетрясением.

Замечу, что задача по определению физики генерации ударной волны в литосфере только поставлена, а совсем ещё не решена. Однако здесь открывается очень интересная физика, которая пока ждет пытливого исследователя. Физика квантового запутывания, как в теоретическом плане, так и в экспериментальном, - получила в последнее время на западе очень широкое развитие.

Воспользуюсь возможностью поблагодарить к.ф.-м.н. Ивана Кузнецова (ИГиЛ СОРАН) за помощь в подборе литературы по квантовой запутанности, многочисленные обсуждения со мной роли квантовой запутанности [45] в формировании ударной волны и высказанную им идею проведения эксперимента по дальнодействию квантовой запутанности образцов горной породы, сжимаемых на удаленных друг от друга прессах.

Литература

1. Кузнецов В.В. Ударно-волновая модель землетрясения (I). Сильные движения землетрясения как выход ударной волны на поверхность // Физическая мезомеханика. 2009. Т. 12. №. 6. С. 87-96.
2. Кузнецов В.В. Модель самоорганизации ансамбля излучающих звук трещин // ПМТФ. 2001. Т. 42. № 4. С. 184-189.
3. Kusunose K, Lei X, Nishizawa O, Satoh T. Effect of grain size on fractal structure of acoustic emission hypocenter distribution in granitic rock // PEPI 1991. V. 67. Iss. 1-2. P. 194-199.
4. 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.
5. Dicke R.H. Coherence in spontaneous radiation processes // Phys.Rev.1954. V. 93. P. 99-110.
6. Aspect A. Bell's theorem: the naïve view of an experimentalist // Quantum [Un] speakables – From Bell to Quantum information. Ed. R.A. Bertlmann & A. Zeilinger, Springer. 2002.
7. Старр В.П. Физика явлений с отрицательной вязкостью. М.: Мир. 1971. 130 с.
8. Жуков А.И. Применение метода характеристик к численному решению одномерных задач газовой динамики // Труды мат. инст. им. Стеклова. 1960, Т. 58. 150 с.
9. Заславский Г.М., Сагдеев Р.З. Введение в нелинейную физику. М.: Наука. 1988. 368 с.
10. Гриднев С.А. Сегнетоэластики – новый класс кристаллических твердых тел // Соросовский образовательный журнал. 2000. Т. 6. № 8. С. 100-107.
11. Фатеев Е.Г. Влияние сверхнизкочастотного электрического поля на порог взрывной неустойчивости льда // ЖТФ. 2003. Т. 73. № 4. С. 43-48.
12. Ружич В.В., Псахье С.Г., Черных Е.Н. и др. Деформации и сейсмические явления в ледяном покрове озера Байкал // Геол. и геофиз. 2009. Т. 50. № 3. С. 289-299.
13. Allan D.R., Marshall W.G., Pulham C.R. The high-pressure crystal structure of potassium hydrogen carbonate (KHCO_3) // American Mineralogist. 2007. V. 92. P.1018-1025.
14. Tsuchiya J., Tsuchiya T., Tsuneyki S. First-principles study of hydrogen bond symmetrization of phase D under high pressure // American Mineralogy. 2005. V. 90. P. 44-49.
15. Гриднев С.А. Дипольные стекла // Соросовский образовательный журнал. 1998. № 8. С. 95-101.
16. Войтов Г.И., Николаев И.Н., Уточкин Ю.А., Рудаков В.П., Ишанкулиев Д.И. О потоке водорода в приземную тропосферу в геодинамически различных геоструктурных зонах Земли // ДАН 1995. Т. 344. № 1. С. 110-114.
17. Войтов Г.И., Рудаков В.П. Водород атмосферы подпочвенных отложений, его мониторинг и прикладные возможности // Физика Земли. 2000. № 6. С. 83-91.
18. Кузьмин Ю.Д., Лупатов В.М., Купцов А.В. Экспериментальные гидрогеохимические наблюдения на верхнее-паратунской гидротермальной системе (предварительные результаты) // Международный Геотермальный Семинар 2004. Россия, Камчатка.
19. Баранов А.И. Кристаллы с разупорядоченными сетками водородных связей и суперпротонная проводимость // Кристаллография. 2003. Т. 48. № 6. С. 1081-1107.
20. Буллах А. Г., Кривовичев В. Г., Золотарев А. А. Общая минералогия. 2008. М.: Акад. ИЦ. 410с.
21. Богданов А.Ю., Богданов Ю.И., Валиев К.А. Многочастичные запутанные квантовые состояния и моделирование статистических распределений термодинамики // Оптика и спектроскопия. 2007. Т. 103. №. 1. С. 36-43.
22. Desbrandes R., Van Gent D.L. Intercontinental liaisons between entangled electrons in ion traps of thermoluminescent crystals // arXiv:quant-ph/0611109 2006.
23. Купцов А.В. Особенности высокочастотной геоакустической эмиссии на заключительной стадии подготовки землетрясения. Кандидатская диссертация. ИКИР ДВО РАН. 2006.

24. Кузнецов В.В., Хомутов С.Ю. Результаты наблюдений атмосферного электричества, геомагнитного поля и инфразвука в период афтершоковой активности Чуйского землетрясения (Алтай, 27.09.2003) // Электронный научно-информационный журнал. 2005. № 1(23). http://www.scgis.ru/russian/cp1251/h_dgggms/1-2005/screp-1.pdf
25. Пузырев Н.Н. Методы и объекты сейсмических исследований. Новосибирск. ОИГГМ. 1997. 302 с.
26. Кузнецов Д.М., Смирнов А.Н., Сыроешкин А.В. Акустическая эмиссия при фазовых превращениях в водной среде // Рос. хим. ж. 2008. Т. 52. № 1. С. 114-121
27. Смирнов А.Н. Генерация акустических колебаний в химических реакциях и физико-химических процессах // 2008. <http://www.chem.msu.ru/rus/jvho/2001-1/29.pdf>
28. Шибков А.А., Желтов М.А., Королев А.А. Собственное электромагнитное излучение растущего льда // Природа. 2000. № 9. С. 105- 112.
http://vivovoco.rsl.ru/VV/JOURNAL/NATURE/09_00/RADIOICE.HTM
29. Берри Б.Л., Григоров Н.О., Качурин Л.Г. и др. Электромагнитные процессы при кристаллизации воды и разрушении льда // Пробл. техн. гляциологии. Новосибирск, 1986. С.24-32.
30. 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.
31. Zeng, Y., Anderson J. G. A composite source modeling of the 1994 North-ridge earthquake using Genetic Algorithm //Bull. Seism. Soc. Am. 1996. V. 86, No. 1B, P. 71-83.
32. 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.
33. Зельдович Я.Б., Райзер Ю.П. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. 1966. - М.: Наука, - 686 с.
34. Вадковский В.Н., Веселовский Р.В. «Сейсмические гвозди» японской зоны субдукции». Вторые Горшковские чтения. М.: 2000.
35. Короноцкий Н.В. Общая геология. М.: МГУ. 2002. 448 с.
36. 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.
37. 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.
38. Бердыев А.А., Мухамедов В.А. Землетрясения - фликкер-шум? // ДАН СССР 1987. Т.297. № 5. С. 1077-1082.
39. Тимашев С.Ф. Время в естественных науках // http://www.chronos.msu.ru/RREPORTS/timashev_vremya/timashev_vremya.htm
40. Скоков В.Н., Коверда В.П. $1/f$ -шум в модели пересекающихся фазовых переходов // Письма ЖТФ. 1999. Т. 25. № 9. С.9-14.
41. Скрипов В.П., Виноградов А.В., Скоков В.Н. и др. Капля на горячей плите: появление $1/f$ -шума при переходе к сфероидальной форме // ЖТФ. 2003. Т. 73. № 6. С.21-23.
42. Кондратьев О.К., Люкэ Е.И. Наведенная сейсмичность. Реалии и мифы // Физика Земли. 2007. № 9. С. 31-47.
43. Еманов А.Ф., Еманов А.А., Лескова Е.В. и др. Сейсмические активизации при разработке угля в Кузбассе // Физ. Мез. 2009. Т. 12. № 1. С. 37-43.
44. Кузнецов В.В. Введение в физику горячей Земли. Петропавловск-Камчатский: КамГУ, 2008. 367 с.
45. Кузнецов В.В. Многочастичная квантовая запутанность – «прорывное» направление в науке // Квантовая Магия. 2011. Т. 8. вып.1. С. 1101-1119.