

К ВОПРОСУ О ФИЗИКЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ

(Доклад на Пузыревских чтениях 2009)

В.В.Кузнецов

*Институт нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН,
Новосибирск, 630090, Россия.*

Приводится информация о землетрясениях и сравнительный анализ двух моделей землетрясения: общепринятой модели выхода магистральной трещины на поверхность Земли и разрабатываемой автором - ударно-волновой модели. Предлагается физическая модель явлений, приводящих, в конечном счете, к возникновению в литосфере ударной волны. Обсуждаются такие вопросы как: физика очага землетрясения и сильных движений в эпицентре разрушений, физика афтершоков и причина повторяемости землетрясений, как известное в природе явление фликкер-шум, а так же физика явлений, связанных с землетрясениями и предшествующих им. Обсуждается проблема кооперативности геофизической среды и квантовой запутанности, как возможного механизма кооперативности.

Физика очага землетрясения, ударно-волновая модель, афтершоки, кооперативность, закон повторяемости.

ВВЕДЕНИЕ

Одна из десяти тайн Вселенной по версии экспертов и читателей популярного журнала LiveScience сформулирована так: «Что происходит в сердце землетрясения?». Этот вопрос не случаен, - ответа на него современная сейсмология не имеет, тем не менее, попытаемся дать ответ, понимая, конечно, что точного ответа пока никто не знает, а любая попытка сделать это - может быть только некоторым к нему приближением. По нашему мнению, единственным условием успешного решения вопроса может быть только создание физически непротиворечивой, самосогласованной модели землетрясения, на базе которой возможно, в принципе, в будущем, - создание теории.

О землетрясениях многое известно, составлены тысячи графиков сейсмологической активности разных регионов Земли. И, казалось бы, не место этому вопросу в списке основных проблем. Тем не менее, накопленные знания нельзя назвать полными. Ученые могут предсказать, на какую территорию обрушится катаклизм, сколько он продлится, насколько весомыми будут его последствия. Однако сейсмологи не способны объяснить, что же происходит внутри планеты во время землетрясения. Принято считать, что суть землетрясения заключается в решении «проблемы фрикционного скольжения материала среды», тем не менее, в течение последних 30 – 40 лет попытки понять основную

«физику» землетрясений не привели к желаемому результату. Практически все модели землетрясения непременно базируются на идее образования в глубинах Земли т.н. магистральной трещины и выход её на поверхность. «Сильные движения» грунта в эпицентре землетрясения практически одинаковы как для поверхностных, так и для глубинных землетрясений. Отсюда автоматически следует, что трещина может «пробивать» до 700 км литосферы, что является сомнительным для большинства сейсмологов. Общепринято, что землетрясение – это процесс релаксации напряженной среды и, естественно, во время этого процесса напряжение «снимается, сбрасывается». В этой связи в современных моделях землетрясения остается совершенно неясной природа афтершоков, неизменно следующих за неглубоким землетрясением и практически отсутствующих - после глубинных, и т.д. Конечно, можно перечислить и другие несоответствия общепринятой модели с наблюдаемыми во время землетрясения явлениями. Отсюда, со всей очевидностью следует необходимость разработки альтернативной модели...

Автором предложена принципиально новая физика землетрясения, - т.н. ударно-волновая (УВ) модель [1-6]. Физику землетрясения, согласно этой модели, - можно представить в виде трех последовательных стадий одного процесса: 1 – зарождение УВ в недрах Земли; 2 – транспортировка УВ от гипоцентра к поверхности Земли и 3 – выход УВ на поверхность Земли. При выходе УВ на поверхность образуется волна разгрузки (разрежения), которая, взаимодействуя с начальной УВ, приводит к генерации так называемых «сильных движений» (strong motion) на поверхности Земли, таких как: разрывы и отколы грунта, его разуплотнение, подъем и опускание уровня, колебания почвы подобные колебаниям жидкости, возникновение грифонов и т.п. Все эти процессы свойственны явлениям, возникающим при выходе УВ на поверхность твёрдого тела [7]. Особенностью УВ является то, что в отличие от акустических волн, за фронтом УВ происходит перенос вещества со скоростью, значительно меньшей, чем скорость УВ. Похоже, что именно этот, хорошо изученный в сейсмологии факт, получивший название slip (скольжение, сдвиг, сброс), обычно интерпретируемый как фрикционное скольжение материала вдоль образовавшейся трещины, является следствием распространения УВ по твердому телу. В общепринятой модели это явление получило название «выход на поверхность очага землетрясения». В принципе, такая трактовка применима и в нашей модели, только вместо выхода трещины понимаются процессы, сопровождающие выход УВ.

Почему и как образуется УВ 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 УВ. Чем короче фронт и больше величина различий плотности и давления среды, тем больше энергии несёт ударная волна. Как следует из математической модели образования УВ, разработанной в институте им. Стеклова [8], в области генерации фронта УВ должно произойти т.н. «пересечение одноименных

характеристик», суть которого состоит в синхронном (кооперативном) изменении параметров среды под воздействием внешних сил на больших размерах, достигающих, в случае очень сильных землетрясений, $L \approx 1000$ км.

Пересечение одноименных характеристик – это математическая абстракция. Имеется ли физическое явление, которое попадает под такое описание? Конечно, есть – это фазовый переход, в нашем случае – структурный переход первого рода, когда в веществе под действием внешних сил резко и одновременно на больших объемах меняются расстояния между узлами решетки, иначе, происходит резкое и повсеместное изменение плотности вещества. Такие вещества в природе известны и хорошо исследованы, они получили название сегнетоэластики [9]. Вполне возможно, что такие вещества имеются и в литосфере.

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 УВ среда ведет себя как единое тело, так как 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 (в 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, этот момент следует считать «сердцем» землетрясения. Правильно ответив на него, можно надеяться на то, что мы понимаем (в некотором приближении) – физику землетрясения.

Стоит задаться вопросом, имеется ли в Природе явление, которое заставило бы различные частицы, находящиеся друг от друга на огромном расстоянии (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 большинстве 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. Если предположить, что такие явления могут развиваться в тонком слое, в котором достигаются необходимые давление и температура, то в этом слое (гипоцентре землетрясения) может возникнуть ударная волна. УВ будет распространяться в направлении от гипоцентра к дневной поверхности геологической среды и, рассеиваясь (расщепляясь) на её неоднородностях, - генерировать объемные сейсмические волны,

формируя, таким образом, очаг землетрясения. Выходя на поверхность Земли, УВ генерирует разрывы, отколы, волновые колебания почвы и другие явления, называемые «сильными движениями» землетрясения.

Попытаемся выявить «сердце землетрясения», т.е. найти тот главный основополагающий принцип, о котором, вероятно, шла речь выше. Для этого перечислим основные параметры и особенности землетрясений и определим их взаимосвязи и не всегда ясные моменты модели.

ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ

Сейсмический момент (M_0) – наиболее фундаментальный параметр для измерения силы землетрясения, вызванного подвижкой по разрыву. Величина $M_0 = \mu uA$ = модуль сдвига горных пород (порядка 30 ГПа) × средняя подвижка × площадь разрывов. Измеренные значения M_0 лежат в диапазоне от $\sim 10^{30}$ дин×см (Чилийское землетрясения 1960) до $\sim 10^{12}$ дин×см - для микроземлетрясений, и $\sim 10^5$ дин×см - для микротрещин в лабораторных экспериментах на нагруженных образцах горных пород. Канамори предложил эту оценку в 1977, а первая оценка сейсмического момента Ниигатского землетрясения 1964 по записям длиннопериодных волн Лява, зарегистрированных станциями мировой сети стандартизованных сейсмографов, была дана Аки. (В системе СИ сейсмический момент имеет размерность в Н×м, $1 \text{ Н}\times\text{м} = 10^7 \text{ дин}\times\text{см}$). Магнитуда землетрясения по Канамори определяется как: $M_W = 2/3 (\lg M_0 - 9.1)$.

Интенсивность землетрясения - мера величины сотрясения земной поверхности при землетрясении на охваченной им территории. Интенсивность землетрясения определяется в баллах одной из принятых сейсмологических шкал интенсивности.

Таблица 1. ШКАЛА МЕРКАЛЛИ	
I балл	Не ощущается людьми
II балла	Ощущается в спокойной обстановке на верхних этажах зданий.
III балла	Ощущается в помещениях; кажется, будто под окнами проезжает легкий грузовик. Качаются висячие предметы
IV балла	Кажется, будто проезжает тяжелый грузовик; звенят оконные стекла, посуда, скрепят двери.
V баллов	Ощущается на улице; просыпаются люди, выплескивается из посуды жидкость.
VI баллов	Ощущается всеми; испуганные люди выбегают на улицу; трескается штукатурка и кирпичная кладка; сдвигается и переворачивается мебель;

	лопаются оконные стекла.
VII баллов	Трудно стоять на ногах; ощущается водителями движущихся автомобилей; осыпается штукатурка, падают кирпичи, керамическая плитка и т.д.; звенят большие колокола; на поверхности водоемов возникают волны.
VIII баллов	Трудно вести автомобиль; падает штукатурка, рушатся некоторые кирпичные стены, дымовые трубы, башни, памятники; обламываются ветки деревьев; в сыром грунте образуются трещины.
IX баллов	Общая паника; лопаются каркасы строений и подземные трубы; образуются значительные трещины в грунте и песчаные воронки.
X баллов	Рушится большинство кирпичей кладки, каркасных сооружений и фундаментов; серьезные повреждения плотин и насыпей; рушатся мосты; мощные оползни.
XI баллов	Серьезная деформация железнодорожных путей; полностью выходят из строя подземные трубопроводы.
XII баллов	Практически полное разрушение; нарушение линии горизонта; взлетают в воздух отдельные предметы.

Таблица 2. Примерное соотношение магнитуды и бальности в зависимости от глубины очага

h, км	Магнитуда			
	5	6	7	8
10	7	8 — 9	10	11 — 12
20	6	7 — 8	9	10 — 11
40	5	6 — 7	8	9 — 10

Магнитуда землетрясения - его численная характеристика, определяемая по амплитудам сейсмических волн, рождающихся в очаге. Магнитуда для поверхностных волн обозначается как M , для объемных волн - m . Впервые шкала магнитуд предложена Рихтером. В дальнейшем она была усовершенствована. Магнитуду можно определить по формуле:

$$M = \lg \frac{a}{T} + f(\Delta, h) + C, \quad (1)$$

где a — амплитуда смещения почвы (в мкм) в поверхностных волнах, T - преобладающий период (в с), Δ - эпицентральное расстояние, измеряемое углом между радиусами, проведенными из центра Земли через очаг землетрясения и через

сейсмическую станцию, h - глубина очага землетрясения. Функция $f(\Delta, h)$ является результатом обработки многочисленных записей и учитывает убывание амплитуды волны с расстоянием. Последний член C , - представляет собой «станционную» поправку, учитывающую условия установки регистрирующей аппаратуры. Функция $f(\Delta, h)$ приводит наблюдения к единому эпицентральному расстоянию, для которого можно уже непосредственно сравнивать амплитуды волн. Начало отсчета шкалы выбирается по достаточно малой стандартной амплитуде, которая считается соответствующей землетрясению с магнитудой, равной нулю. Одни из самых сильных землетрясений - это Ассамское (1952 г.), его магнитуда 8,7 и землетрясение 2004 г. вблизи о. Суматра ($M = 9$). Современная аппаратура позволяет регистрировать землетрясения с магнитудой до - 2, - 3 с точностью $\pm 0,1$.

Существует зависимость между магнитудой и полной энергией землетрясения E . Величина a/T - служит мерой деформации грунта под действием сейсмической волны. Связь между E и M выражается эмпирической формулой:

$$\lg E = A + BM \quad (2)$$

Коэффициенты A и B определяются сравнением магнитуды с энергией сейсмических волн от землетрясений той же магнитуды. Такое определение A и B связано с тем, что энергия волны в единице объема горной породы пропорциональна квадрату деформации. Если бы землетрясения разной магнитуды возбуждали цуги волн одинаковой формы, то коэффициент B был бы равен 2. На самом деле спектр и длина цуга волн зависят от магнитуды.

По Гутенбергу и Рихтеру уравнение (2) записывается так:

$$\lg E = 11,8 + 1,50M \quad (3)$$

или для объемных волн

$$\lg E = 6,5 + 2,3m, \quad (4)$$

где магнитуда объемных волн m равна $2,5 + 0,63M$.

Если подставить в (3) $M = 8,7$, то для самого сильного землетрясения получим $E = 5 \cdot 10^{24}$ эрг. Это громадная энергия, которая составляет 0,05% от полного количества тепла, теряемого за год всей Землей ($\sim 10^{28}$ эрг). Отсюда можно сделать вывод, что процессы, определяющие накопление такой большой энергии в очагах, должны определяться основными свойствами мантии, они не могут быть случайными.

Для сравнения укажем, что энергия, выделившаяся при взрыве атомной бомбы в Хиросиме, $\sim 10^{20}$ эрг. Однако если взорвать все накопленные к настоящему времени ядерные заряды ($Q > 5 \cdot 10^{10}$ т), то это будет равносильно небывалому землетрясению с магнитудой больше чем 11,3: (Q - заряд в килотоннах). Эта формула применима при расчетах подземных ядерных взрывов.

Если подсчитать энергию, выделяющуюся всеми землетрясениями за год, то мы увидим, что наибольшую энергию производит катастрофическое (одно!) землетрясение, остальные добавляют еще 15% от величины $5 \cdot 10^{24}$ эрг для $M = 8,7$.

Длина разлома. Во время катастрофического землетрясения в Сан-Франциско 18 апреля 1906 общая протяженность поверхностных разрывов в зоне разлома Сан-Андреас составила более 430 км, максимальное горизонтальное смещение - 6 м. Максимальная зарегистрированная величина сейсмогенных смещений по разлому 15 м. Выявлена связь между магнитудой землетрясений и длиной разлома (рис. 2-а).

Закон повторяемости. Обратимся к каталогу землетрясений. Мы увидим, на первый взгляд, очень хаотическую картину, на которой, тем не менее, можно увидеть, что чем сильнее землетрясение, тем реже оно встречается в каталоге. Если построить в логарифмическом масштабе распределение числа землетрясений N по их энергии E (или магнитуде M), то осредняющий их график изобразится прямой линией (рис. 2-б) с отрицательным наклоном. Закон повторяемости обычно записывается в следующей форме:

$$\lg N = A - \gamma \lg E \text{ – для энергии;}$$

$$\lg N = a - bM \text{ – для магнитуды .}$$

Параметры графика повторяемости – наклон к оси абсцисс (γ и b) и уровень (A и a) – относятся к важнейшим количественным характеристикам сейсмического режима. Наклон графика выражает соотношение между числом сильных и более слабых землетрясений. Наклоны графика различаются для различных регионов сейсмически активной поверхности Земли.

Афтершоки. Как известно, после сильного землетрясения в области его очага возникает рой повторных землетрясений, глубина гипоцентров которых, как правило, находится выше, чем основание (гипоцентр) основного удара. Спад числа афтершоков во времени после главного удара характеризуется гиперболической зависимостью (закон Омори) (рис. 2-в):

$$N(t) \sim 1/t^\zeta, \text{ где } \zeta > 1. \quad (5)$$

Афтершоки, как правило, в течение некоторого времени после главного удара заполняют пространство, ранее занятое очагом главного землетрясения. Часто объем очага определяют именно по пространству, занимаемому афтершоками. Практически гипоцентры всех афтершоков, некоторые из которых сравнимы по магнитуде с главным ударом, расположены выше гипоцентра основного землетрясения.

Сейсмологам известно, что после глубокого землетрясения афтершоки практически отсутствуют, однако, хотя и редко, но эта закономерность нарушается. Авторам [10] 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.

Свойства сейсмических волн в дальней зоне. Определение положения гипоцентра.

Смещение частиц среды в Р-волне:

$$u_P(x, t) \sim 1/4\pi r \alpha^2 \cdot 1/r \cdot X_0 \cdot (t - r/\alpha),$$

аналогично, для смещения частиц в S-волне:

$$u_S(x, t) \sim 1/4\pi r \beta^2 \cdot 1/r \cdot X_0 \cdot (t - r/\beta),$$

где α и β скорости V_P и V_S – соответственно.

Отсюда следует, что отношение амплитуд смещения частиц в этих волнах:

$$u_P(x, t) / u_S(x, t) \sim (V_S / V_P)^2, \quad (6)$$

примерно в 3 раза меньше в Р-волне, чем в S-волне.

Разность времен прихода волн четко связано с расстоянием от источника до точки приема. Это свойство используется для оценки координат эпицентра землетрясения по данным сети сейсмостанций.

В качестве примера приведем оценку положения эпицентра Олюторского землетрясения 2006 г. по данным нескольких сейсмостанций Магадана, Якутска, Петропавловка-Камчатского и др. (рис. 3). Справа на этом рисунке приведены сейсмограммы первых вступлений сейсмических Р- и S-волн на различных сейсмостанциях.

Временные характеристики землетрясения. Основная информация о строении Земли и сейсмических событиях поступает из анализа упругих волн, генерируемых землетрясениями. В работе [11] выяснено какую количественную информацию можно получить из параметров упругих волн, возникающих при образовании трещин. В этой работе была выявлена взаимосвязь между параметрами трещин и упругих волн, генерируемых при образовании трещин. Оказывается, существует линейная связь между длительностью процесса и размером дефекта (трещины, разлома). Эта зависимость имеет простое толкование. Если разрыв происходит со скоростью, близкой к скорости звука, то время разрыва (t) должно быть пропорционально протяженности разрыва (L) (рис. 4-1). Поскольку скорость звука в различных твердых телах отличается в разы, то в двойных логарифмических координатах разброс незначителен. Но поскольку зависимость подтверждается экспериментально в таком широком масштабном диапазоне, это свидетельствует о подобии процесса разрушения на всех масштабных уровнях.

Другая универсальная связь получена между объемом, в котором формируется упругая волна, и упругой энергией E , выделяющейся при этом. Для мощных землетрясений эта энергия может достигать значений 10^{16} Дж, для миллиметровых трещин - она 10^{-8} Дж, горные удары находятся примерно посередине - от 10 до 10^8 Дж.

Эти универсальные зависимости замечательны, прежде всего, тем, что указывают на единообразие природы излучения упругих волн при разрушении на различных масштабных уровнях.

Длительность фронта основного удара землетрясения составляет около секунды. На рис. 4-2 приведена запись толчка Спитакского землетрясения 7.12.88. Вслед за первым ударом следует ещё более мощный афтершок. Это далеко не единственный случай, например, сильнейший афтершок с $M \gg 5.8$ Ташкентского землетрясения произошел всего через 43 секунды после главного толчка, имевшего магнитуду $M = 6.8$. Эпицентр главного афтершока находился в 5,6 километрах к юго-западу от эпицентра главного толчка и имел несколько меньшую глубину очага. В силу этого сейсмический луч от этого афтершока пришёл к строениям заведомо с несколько другой стороны и с другим углом выхода. При этом колебания от афтершока «наложились» на колебания, созданные главным толчком. Основным ударом землетрясения в Нортридже 17.01.1994 состоял из трех следующих один за другим перекрывающихся по основанию друг друга импульсов с общим основанием длительностью 8 секунд (рис. 4-3). Анализ этих и других импульсов главного удара сильного землетрясения показывает, что фронт импульса не длиннее одной секунды.

Заметим, что размер очага и длительность фронта удара – важные для нашей модели параметры, которые будут дальше нами использованы.

Диаграммы первых вступлений

Механизм очага землетрясения является одним из важнейших параметров, характеризующих сейсмическое событие. В современной сейсмологии он связывается с внезапной подвижкой горных пород, сопровождающейся излучением сейсмических волн по поверхности ослабленной прочности, и отражает одновременно пространственную ориентацию осей главных напряжений, возможных плоскостей разрывов и подвижек в очаге землетрясения. Первые смещения на сейсмограмме показывают либо направленность от очага (сжатие на станции, или плюс), либо к очагу (растяжение на станции, или минус). Как правило, распределение импульсов противоположного знака позволяет провести две перпендикулярные линии, отделяющие области расширения (растяжения) от областей сжатия (модель двойного диполя). Эти линии получили название нодальных. Более того, достаточно закономерно "ведет себя" и амплитуда первых смещений: чем ближе станция расположена к нодальной линии, тем меньше амплитуда. Таким образом, нодальные линии образуют 4 квадранта, соседние квадранты имеют разные знаки вступлений, а противоположные - одинаковые.

Многочисленные работы показали, что источник типа двойного диполя (комбинация двух диполей) с моментом или без момента наилучшим образом удовлетворяет наблюдаемым данным (рис. 5).

При графическом изображении механизма очага землетрясения, последний - представляется сферой единичного радиуса с центром в очаге. Учитывая центральную симметрию принятой теоретической картины излучения, при расчетах используют, как правило, половину фокальной сферы (верхнюю или нижнюю). Все точки, лежащие на

верхней или нижней полусфере, проектируются на экваториальную стереографическую проекцию градусной сети шара.

Стереогаммы механизмов очагов, соответствующие основным типам смещений по разломам показаны на рис. 5. Чаще механизм очага представляет собой сочетание основных типов (например, сбросо-сдвиг, сдвиго-взброс и т.д.). Очень редко встречаются так называемые взрезы - тип смещений, при которых происходит вертикальное движение блоков друг относительно друга по вертикальной плоскости.

Помимо нодальных плоскостей механизм очага показывает ориентацию главных осей напряжений растяжения (Т) и сжатия (Р), под действием которых и происходит подвижка. Поскольку механизм очага оценивается ретроспективно, то ось сжатия Р находится в квадранте минусов, а ось растяжения Т - в квадранте плюсов. Оси напряжений характеризуются азимутом (AZ) и углом их погружения относительно горизонта (PL). В зависимости от ориентации осей напряжений выделяется несколько режимов напряженного состояния земной коры. При горизонтальном растяжении и вертикальном сжатии создаются условия растяжения, при горизонтальном положении обеих осей - условия сдвига, и при вертикальном растяжении и горизонтальном сжатии наблюдается режим сжатия. Очевидно, что в первом случае доминирующим типом смещения будут являться сбросы, во втором сдвиги и в последнем взбросы (надвиги).

Итак, землетрясение это излучатель сейсмической энергии, который на больших расстояниях рассматривается как точка. Фронт нарастания первого удара (первого вступления) порядка секунды. Излучение сейсмических волн происходит в очаге землетрясения, размер которого тем больше, чем выше энергия землетрясения. Таким образом, мы находим первое недоразумение, касающееся того, что же такое землетрясение: это излучающая точка, или некий, очень большой объем, размер которого достигает, в пределе 1000 км. Это хорошо известная в сейсмологии проблема: на больших удалениях – точка, вблизи – объем. В чем же дело? Дело в том, что скорость синхронизации излучения такого объема оказывается на два порядка больше скорости звука. Как известно, скорость вспарывания трещины, которая в stick-slip модели является причиной землетрясения в два раза меньше скорости звука. Эта проблема решения не имеет.

Принято считать, что в stick-slip модели стереогаммы соответствуют механическому перемещению огромных масс очага землетрясения. Второе недоразумение, так же хорошо известное в сейсмологии, заключается в том, что сигналы, принимаемые сейсмографами от землетрясений, расположенных на глубине 5 км и 500 км идентичны. Разрушения в эпицентре землетрясения тоже одинаковы. И в том, и в другом случаях модели очага тоже одинаковы, например «взрез» может наблюдаться в обоих случаях. Следовательно, весь массив горной породы высотой в 500 км и размером в 1000 км должен переместиться (подпрыгнуть) на один – два метра за секундные времена?

Третье недоразумение связано с тем, что два таких хорошо известных явления как появление афтершоков и закон повторяемости - не имеют никакого объяснения в общепризнанной модели, которая ведет свою столетнюю историю с идеи, высказанной Рейдом после разрушительного землетрясения 1906 в Сан-Франциско.

Есть основание полагать, что мы смогли бы ответить на вопрос, что такое «сердце землетрясения», если бы новая модель находила непротиворечивое объяснение этим недоразумениям. Очевидно, что в сейсмологии давно назрела необходимость создания модели, альтернативной общепринятой. Двадцать лет назад автор высказал идею ударно-волновой модели, которая сразу нашла объяснение некоторым особенностям землетрясения. Однако до недавнего времени вопрос о «сердце» оставался открытым. Ситуация стала меняться в связи с определенными успехами в физике квантовой механики, особенно в распространении её принципов на макрообъекты. Рассмотрим некоторые идеи подробнее, но прежде остановимся на фрагментах физики землетрясения, которые сравнительно просто решаются в рамках ударно-волновой модели.

УДАРНО-ВОЛНОВАЯ МОДЕЛЬ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ

Как отмечалось во введении, в сейсмологии в настоящее время принята модель - прерывистого скольжения (stick-slip) при выходе трещины на поверхность. Модель прерывистого, скачкообразного скольжения бортов разрыва, взаимодействие которых определяется законами трения, впервые предложили в 1966 г. Брейс и Байерли [12]. Их работы положили начало периоду исследования этой модели. В наше время эти исследования не потеряли актуальности. Тем не менее, сама модель недостаточно ясна. Например, смещение среды в момент землетрясения происходит по подготовленным заранее разрывам, или разрывы возникают непосредственно в момент землетрясения? Ещё пример из книги Ф. Стейси, который обсуждает теорию «упругой отдачи», высказанной Рейдом 100 лет тому назад и, в частности, её положение, касающееся того, что напряжения на разломе линейно растут во времени и землетрясение происходит тогда, когда достигается некоторый определенный предел [13]. Он показывает, что при интервале между землетрясениями в 100 лет, скорость нарастания напряжения в 1000 раз меньше скорости изменения напряжений при лунных приливах в земной коре, которые, как известно, в периодичности землетрясений не проявляются, и т.д., и т.п. Надо сказать, что примеров несоответствия между наблюдениями и моделью прерывистого скольжения значительно больше. Отсюда следует необходимость разработки альтернативной модели, в качестве которой предлагается предложенная и разрабатываемая автором ударно-волновая модель.

Акустическое свержизлучение. Наша модель базируется на объяснении известных экспериментальных фактов. Авторами ряда работ неоднократно наблюдалось явление самопроизвольного усиления интенсивности акустической эмиссии, которое затем, так же

самопроизвольно, - прекращалось. Объяснение этому явлению с точки зрения самоорганизации когерентной структуры на основе взаимодействия звуковых волн с раскрывающимися трещинами было сделано автором [4], а также 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.

Результаты лабораторных экспериментов и натуральных наблюдений (рис. 6-а) 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 физики этого явления пока - нет.

Предположим, что в некотором объеме среды существует n ($n = 5$) дилатонов (рис. 6-в), а схлопывание происходит только в одном. Под дилатонами [14] будем понимать некоторую 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) излучая при этом акустическую волну. Под это определение подходят такие явления как нарушение кристаллической решетки, образование микротрещин и т.п.

Представим себе, что излученная акустическая волна взаимодействует путем обмена энергией с фононами решетки с другими дилатонами, передает им энергию и способствует их схлопыванию. 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, подобное явление близко к сверхизлучению Дикке (коллективное спонтанное испускание электромагнитного излучения), которое было

предложено им задолго до изобретения лазеров. Дикке показал, что система, состоящая из N инвертированных двухуровневых атомов, может спонтанно перейти в основное состояние за время, обратно пропорциональное числу атомов, что приводит к усилению потока излучения $\sim N^2$.

Формирование ударной волны. В нашей предварительной модели ударная волна является результатом когерентного взаимодействия акустических волн раскрывающихся трещин. Просматривается два возможных подхода: один основан на использовании метода пересекающихся характеристик, другой на использовании сложения солитонов (бризеров) в большой акустический солитон, который способен «опрокинуться» с генерацией ударной волны. Возможно, это приемлемое решение: сложение акустических солитонов в один – большой и, затем, опрокидывание его с генерацией УВ [5].

Неадекватность акустического подхода. Попытки автора решить проблему возникновения ударной волны (УВ) за счет коллективных акустических процессов взаимодействия типа: волна-трещина особым успехом не увенчались. Главное препятствие в решении проблемы генерации УВ таким образом состоит в том, что УВ, по модели, возникала в результате взаимодействия акустических волн, обладающих конечной скоростью, 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. Рассмотрим возможность использования подходов, развитых в квантовой механике и экспериментально реализованных в последнее время, например, в задачах квантовой запутанности и телепортации. Есть вероятность того, что, найдя решение этой задачи, мы, наконец, ответим на вопрос, поставленный во введении: «Что происходит в сердце землетрясения?».

Новый подход. В квантовой физике хорошо известна идея квантовой запутанности, основанной на использовании принципа неопределенности Гейзенберга, когда среда, при её запутанности (нелокальности) становится когерентной (кооперативной), - может быть описана некой волновой функцией. Когда же происходит редукция этой функции (смерть запутанности), процесс редукции 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 УВ без скоростных ударов, детонации, взрывов и т.п. Казалось бы – да, если найдется способ создания разрыва термодинамических параметров среды, в частности, - разрыв 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 УВ: $D = \Delta\rho/\rho \cdot \Delta x / \Delta t$.

Предположим, что нам, каким-либо способом, например, путем генерации спонтанной деформации кристаллической решётки в сегнетоэластике [9] 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) УВ, обладающей скоростью $D = 10$ км/с. В такой ситуации, проблему генерации УВ можно сформулировать 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. Образование водородной связи существенно влияет на структуру кристаллов, их физические и физико-химические свойства.

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 (ВС) - 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 ВС. Так, например, во льду ВС много, их количество уменьшается по мере того, как лед тает. В талой воде ВС – меньше, ещё меньше их в нагретой воде и практически нет – в воде кипящей. Если бы вода полностью лишилась возможности образовывать ВС, то превратилась бы в пар, конденсирующийся в жидкость при 100 °С. ВС присутствуют не только в воде, но и в литосфере, определяя её особые свойства [5]. 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. Обратимся к экспериментам по сжатию калисинита – это минерал гидрокарбоната калия (KHCO₃). Этот минерал давно изучается как объект, обладающий ВС, в которых и проявляются свойства квантовой запутанности.

Сжатие калисинита приводит к резкой одновременной по всему объему образца перестройке структуры ВС (рис. 7), 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 ВС происходят мгновенно в больших объемах, возможно, эта особенность и названа кооперативностью ВС.

Энергия землетрясения. Оценим величину энергии, необходимой для операции сжатия калисинита, показанного на рис 7-А. Внешнее давление $p = 3$ ГПа приводит к изменению объема среды (ΔV) примерно на 5%, что составляет примерно 100 Дж см⁻³. На рис. 7-Б и В

изображен т.н. структурный фазовый переход типа «упорядочение – разупорядочение» ВС [15]. 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.) ВС согласована с нашей предыдущей оценкой, полученной из соотношения $E = p\Delta V$.

Оценим количество ВС, необходимое для возникновения землетрясения, например такого, как Чуйское 2003. Магнитуа 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 ВС в объеме 0.5 см^3 равно, примерно, 500 Дж: $0.5 \text{ эВ} = 10^{22}$. Размер квазичастицы, в состав которой входят ВС $\approx 30 \text{ \AA}$. Для сравнения, размер ВС примерно составляет 2.5 \AA , размер атома несколько больше. Эта оценка показывает, что необходимое для генерации ударной волны количество ВС, - вполне достаточно. Важно, чтобы количества ВС не было бы больше, чем самих атомов – элементов кристаллической решетки. В нашем случае это условие выполняется. Сравним энергию ВС, 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 ВС 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 ВС принимают участие в процессе, или - только у 20 % атомов имеются подходящие ВС. Таким образом, можно считать, что наличие ВС у минералов, находящихся под внешним давлением, может обеспечить необходимую для генерации ударной волны энергию. Здесь мы не рассматривали тот факт, что давление имеет тензорный характер, однако, насколько известно автору, этот вопрос не рассматривался ни теоретически, ни в экспериментальных работах.

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.

Связь между сейсмичностью и водородом. 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 может 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. 8 .

Предположим, что регистрируемый в этой работе водород связан с образованием ВС. Здесь можно обсуждать два варианта: либо ВС образуются при прокачке породы водородом, либо водород выделяется при разрушении ВС. 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 - $3 \cdot 10^{16}$ 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 возможной 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, проблема от введения этого определения 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.

Квантовая запутанность. Вернемся к рис. 6-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 ВС, то они с течением времени постоянно образуются и разрушаются. При разрушении ВС – испускаются акустические импульсы, временная последовательность которых (N) - создаёт некий акустический фон $I \sim N$. Если N водородных связей оказываются квантово запутанными (по принципу: каждая со всеми), т.е. протоны связей становятся неразличимы друг с другом, где бы они не находились, и вся структура описывается единой волновой функцией, то разрыв одной из них ведет к одновременному разрыву всех N связей (редукция волновой функции). Акустический сигнал при этом возрастает (рис. 6-в) и становится равным $I \sim N^2$. Структура вещества, содержащего ВС, при этом изменяется, в слое резко возрастает плотность, а интенсивный акустический фон

создает дополнительное - стимулированное давление: создаются условия для возникновения УВ.

Приведем один из примеров квантового запутывания фотонов. В эксперименте флуоресцентное излучение собиралось широкоапертурными линзами и направлялось в противоположные от источника стороны [21]. 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. 6-б, сравни с рис. 6-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 трех верхних панелях рис. 8, связаны не с образованием трещин, как предполагалось авторами, а с эффектами квантовой запутанности ВС и редукцией волновой функции, следствием которой может быть образование УВ.

Продемонстрируем дальное действие 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 (!).

Самым выдающимся результатом, в этом плане, можно считать эксперимент, выполненный [23] 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.

Эти примеры дают надежду на получение положительного результата по дальнодействию запутанности при наблюдении акустической эмиссии на двух идентичных образцах горной породы, сжимаемой на идентичных прессах, расположенных на удалении в 1000 км. Такой результат мог бы служить подтверждением высказанной выше идеи о возможности запутанности геологической среды в момент землетрясения. При положительном исходе такого эксперимента мы, несомненно, приблизились бы к пониманию того, что представляет собой «сердце землетрясения».

ОСОБЕННОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ УДАРНОЙ ВОЛНЫ

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

Сравним общепринятую модель землетрясения с нашей ударно-волновой. Из сравнения видно, что движение среды с массовой скоростью u вслед за ударной волной, это, по-видимому, то же самое движение среды вслед за раскрывающейся трещиной со скоростью, которая в stick-slip модели называется slip-velocity.

Как известно во многих работах по физике очага сильных землетрясений, произошедших в последнее время, фиксируется и обсуждается подвижка в области очага (slip) и изменение этой подвижки во время основного удара (slip-velocity). Из книги Аки и Ричардс [24] можно положить $w/t = u$ - скорость распространения трещины. Здесь: $w(\xi_0, \eta_0)$ – подвижка трещины в координатах ξ, η ; μ - модуль сдвига; $\xi(\xi, \eta)$ – траектория движения кончика трещины; $p(\xi, \eta)$ – величина сброшенного напряжения, тогда величина $u = V_S p_0 / \mu$. Подставляя значение μ , получаем: $u = p_0 / V_S \rho$, или $p_0 = u V_S \rho$ - связь между скоростью распространения трещины, величиной сброшенного напряжения и акустическими параметрами среды. Для параметров среды, соответствующих Нортриджскому землетрясению ($u = 1$ м/с), величина p_0 совпадает с $\Delta\sigma = 100$ бар.

Как известно в физике ударных волн, величина сжатия среды Δp после прохождения по ней ударной волны, оценивается [7] так: $\Delta p = u \rho c$, где u , как и раньше, медленная массовая скорость течения среды за фронтом ударной волны, ρc – акустическое сопротивление среды. Если принять: $u = 1$ м/с, а $\rho c = 2$ г/см³ × 5 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 ударной волны, а, в пределе, - длительности её импульса.

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

Разломные диаграммы. Изображенные в левой части рис. 5 разломные диаграммы (стереограммы) сейсмологами реально фиксируются. Отсюда совсем не следует, что силовая stick-slip модель очага землетрясения - двойная пара сил - абсолютно верны и не могут подвергнуться сомнению. Типы смещений по разломам вызывают большое сомнение, особенно, в тех случаях, когда рассматриваются глубинные землетрясения. Но даже в случае неглубоких землетрясений ещё ни кому не удавалось проследить трещину на глубину, большую, чем несколько десятков метров. Однако, предлагая альтернативную модель, в ней необходимо найти такие механизмы, которые приводили бы возникновению соответствующих им стереограммам и фокальным механизмам.

Анализируя сильные движения грунта при выходе ударной волны на поверхность [6] можно получить похожие диаграммы. Режим сжатия вызывается ударной волной, режим растяжения – образующейся волной разгрузки (растяжения). Аналогичные диаграммы можно получить и при прохождении ударной волны по среде очага и трансформации ударной волны в сейсмические P- и S-волны. Плоская ударная волна проходит пространство очага и подходит к поверхности под углом α (a), в зависимости от условий образования волны разгрузки (растяжения) и взаимодействия её с ударной волной могут возникнуть ситуации b или c , и, соответствующие им диаграммы g и d . Если ударная волна выпуклая – (e) или вогнутая ($ж$), то им будут соответствовать диаграммы z и $и$ (правая часть рис. 5). Комбинируя форму и углы прихода ударной волны можно всегда подобрать соответствие их наблюдаемой диаграмме. Надо сказать, что это всего лишь предположение, хотя и достаточно реалистичное. Конечно, необходима проверка этой идеи на большом наблюдательном материале.

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 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. 9 в центре, изображена модель разрывов Нортриджского землетрясения. В левой части рис. 9 показано одномерное распределение скоростей сейсмических Р- и S-волн по глубине [25]. На рис. 9 (слева) отчетливо видно, что уменьшение скоростей Р- 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 (см. рис. 4-3). В работе [26] 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 [25], 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 [27]: на глубине 6 км и выше (рис.9), 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 [7], 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 ($p_{кр}$), а 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 $c = (K/\rho)^{1/2}$. 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 [7]. 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 6 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 6 км расщепления УВ и генерации ВР 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 [27]. 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 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.

Разрушение зданий ударной волной. Сошлемся на мнение Смирнова [29], обосновавшего концепцию ударно-волнового сейсмического разрушения. Автор учел многочисленные наблюдения сейсмических разрушений зданий, которые показывают, что разрушения происходят сразу после первых наиболее мощных поперечных толчков. Результатом таких толчков, которые, конечно же, не успевают раскачать здание, т.е. вызвать в нем появление опасных сил инерции, является почти мгновенный срез колонн или стен здания, вследствие чего происходит разрушение здания до попадания его в резонанс. Для того чтобы объяснить эти факты, автор приходит к мнению, что такие разрушения могут производиться *только ударной волной*. Свою концепцию автор обосновывает расчетами и многочисленными примерами из практики сейсмических разрушений.

АФТЕРШОКИ

Ударная волна, пройдя через очаг, изменяет структуру его вещества очага таким образом, что в ней возникает способность к генерации ещё целого цуга ударных волн – афтершоков. Представим себе очаг 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» (рис. 8). Она достигает нескольких часов (иногда – суток). Предположим, что в течение некоторого времени (времени молчания) – t происходит формирование условий в слое, приводящих к образованию УВ. 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 L_i , которая однозначно связана с магнитудой $L_i \sim M_i$ (рис. 2-а).

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 ближайšie 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 $k = L/L_i$ - количество мелких афтершоков в слое L . Отсюда следует закон Омори: $N(t) \sim 1/t$. Однако, в этом 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.

ЗАКОН ПОВТОРЯЕМОСТИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

Закон Гуттенберга-Рихтера. В отличие от закона Омори, где принципиальным моментом является передача от УВ 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. Такой подход правомерен, но он не вносит ничего 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 [30]. 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 [30], 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 флуктуации (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. [31]. 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 [32. 33] показано, что причиной фликкер ($1/f$)-шума является прохождение фазового перехода (ФП) при особых условиях: пересекающиеся ФП, неравновесные ФП 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. Тем не менее, если мы рассматриваем причину землетрясения как возникновение ударной волны, которая образуется вследствие структурного фазового перехода в кооперативной (квантово связанной) среде, то, по-видимому, можно развить эту идею на весь сейсмически активный регион, предположив, что здесь реализуется тот самый структурный фазовый переход, причем, вся среда обладает кооперативными свойствами. 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 кастрюле с водой, которая нагревается и начинает кипеть, испуская редкие пузыри. Это фазовый переход первого рода. 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 ВС литосферы не имели бы возможности включить в свою область взаимодействия ВС 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.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Что же такое «сердце землетрясения?». На этот вопрос можно ответить примерно так: Ключевой момент в физике землетрясения является идея о кооперативных свойствах геофизической среды и возможным механизмом кооперативности – явление квантовой запутанности этой среды на протонах водородных связей, входящих в минералы этой среды. Явление квантовой запутанности приводит к возникновению, в результате прохождения в среде структурного фазового перехода, ударной волны. Появление в среде афтершоков является следствием воздействия ударной волны на напряженную внешним

давлением среду. Появление фликкер-шума (закон Гуттенберга-Рихтера) является следствием этого фазового перехода в огромном массиве горной породы, в которой возможно возникновение квантовой запутанности. Массив горной породы – это тектонически активная среда, которая находится в состоянии, далеко от равновесного. Неравновесность среды связана с тем, что в литосфере Земли реализуется предложенный автором принцип минимизации гравитационного потенциала Земли, как альтернативы тектоники литосферных плит. Именно из-за этого принципа происходит дрейф материков и в литосфере возникают сдвиговые напряжения. 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 (УВ) на поверхность. Создание двумерной модели «сильных движений» грунта в момент выхода УВ. Определение глубины разрыва грунта в момент землетрясения, оценка условий «квазижидкой» среды. Оценка возможности «разрушения» УВ при подходе её к поверхности (проблема защиты от землетрясения).
- Численное моделирование механизма распространения УВ от гипоцентра землетрясения до поверхности Земли. Генерация slip-векторов и возникновение зон растяжения – сжатия.

Идея представить разрушительный этап землетрясения - как выход ударной волны на поверхность Земли, отражение ударной волны, возникновение волны разгрузки и взаимодействие этих и других поверхностных волновых явлений между собой, приводящих к возникновению разрывов поверхности Земли, отколов, перемещений грунта и других подобных явлений, - была высказана автором около 20 лет тому назад. Эти идеи в виде феноменологической модели были опубликованы в двух монографиях и ряде статей. Следующие из этой модели оценки таких параметров как величина разрывов и разуплотнений грунта, колебаний почвы, возникновение выбросов воды и т.п. очень приближенны. Возникла необходимость проведения численных расчетов.

Вычислительные методы в механике сплошной среды были созданы в основном для решения оборонных задач. Разработанный комплекс методов и программ использовался для решения задач газовой динамики с большими деформациями и распространялся на такие процессы как детонация взрывчатых веществ и ударные волны в металлах. Вычислительная проблема при решении поставленной задачи состоит в адаптации вычислительных методов для решения двумерной (впоследствии – трехмерной) задачи распространения ударной волны по геологической среде и задачи, возникающие при выходе её на поверхность грунта. Задача сопряжена с решением ряда проблем:

- Подбор наиболее адекватных реологических и термодинамических параметров для грунта и сейсмического разреза среды.

- Создание базы сильных движений. Имеются данные по движениям, сопутствующим нескольким наиболее изученным землетрясениям, таким как Нортридж (США) и Кобе (Япония). Данными по сильным движениям земной коры, возникшим при землетрясениях, произошедших в США с 1933 года, располагает специальная правительственная программа (National Strong-Motion Program). В рамках этой программы в настоящее время в 32 штатах размещены 1200 станций наблюдений за сильными движениями, из них около 900 находятся в режиме текущего мониторинга и, кроме этого, существует 628 непрерывно работающих сейсмических станций. Информация по сильным движениям при землетрясениях доступна через сети Internet. Насколько известно, аналогичная система существует и в Японии. В рамках выполнения проекта предполагается получение некой усредненной временной и пространственной картины движений.

Задача состоит в численном моделировании процесса выхода ударной волны на свободную поверхность. При этом предполагается численное решение системы уравнений сохранения и ударных адиабат. Возможно использование метода Харлоу для частиц в ячейках в двумерной постановке. В результате численного моделирования должно быть получено пространственное распределение поля векторов массовой скорости за фронтом ударной волны. Поле скоростей и возникающих на поверхности волн необходимо сравнить с полем скоростей сильных движений, возникающих при разрушительных землетрясениях. Необходимо разработать алгоритмы и программы двумерного движения сплошной среды и провести численное моделирование некоторых процессов: механизма распространения ударной волны по очагу землетрясения и механизма выхода её на свободную поверхность, генерации волны разгрузки и механизма взаимодействия волн. При создании численной модели сильных движений, предполагается численное решение системы уравнений механики сплошной среды совместно с определяющими соотношениями для грунта. Предполагается использование метода «индивидуальных частиц» в двумерной постановке. В результате численного моделирования должно быть получено пространственное распределение поля векторов массовой скорости за фронтом ударной волны. Поле скоростей и амплитуд, возникающих на поверхности волн, будет сравниваться с полем скоростей сильных движений, измеренных во время разрушительных землетрясений.

Сформулируем ряд задач:

- В результате численного моделирования должно быть получено пространственное распределение поля векторов массовой скорости за фронтом ударной волны.
- Необходимо разработать алгоритмы и программы двумерного движения сплошной среды и провести численное моделирование некоторых процессов: механизма распространения ударной волны по очагу землетрясения и механизма выхода её на свободную поверхность, генерации волны разгрузки и механизма взаимодействия волн.

- Используя сейсмологические базы данных, выяснить реальность постулируемой в УВ-модели землетрясения связи особенностей морфологии области формирования УВ на глубине гипоцентра с акустическими особенностями очага и разломными диаграммами.
- Создать установку для экспериментального исследования 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.
- Исследовать присутствует ли водород в эпицентре Чуйского землетрясения.
- Исследовать имеется ли взаимосвязь между землетрясениями и вариациями атмосферного электрического поля.
- Исследовать изменение акустического и электромагнитного фона перед землетрясением...

Заметим, 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.

В заключение, сошлемся на теорему Курта Фридриха Гёделя (австрийского логика и математика), которая звучит примерно так: Любая аксиоматизированная дедуктивная система является неполной, так что в ее рамках может быть сформулировано утверждение, истинность которого нельзя ни доказать, ни опровергнуть, и для получения заключения об этом утверждении необходимо выйти за пределы исходных аксиом. Современная наука, включая классическую динамику Ньютона и квантовую механику, строится именно дедуктивным образом и поэтому не может быть полной. Иначе: в современной науке могут возникнуть утверждения, справедливость которых нельзя ни доказать, ни опровергнуть.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кузнецов В.В. Ударно-волновая модель очага землетрясения. 1990. - Новосибирск. Препринт ИГиГ, - № 8, -18 с.
2. Кузнецов В.В. Физика земных катастрофических явлений. 1992.- Новосибирск: Наука,- 96с.
3. Кузнецов В.В. Ударно-волновая модель очага землетрясения. Науки о Земле: Современные проблемы сейсмологии. - М.: -Вузовская книга, - 2001 - С. 47-62.
4. Кузнецов В.В. Модель самоорганизации ансамбля излучающих звук трещин // ПМТФ. – 2001. - Т. 42. - № 4. - С. 184-189.
5. Кузнецов В.В. Введение в физику горячей Земли. - Петропавловск-Камчатский. КамГУ, 2008. - 367 с.

6. 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.
7. Зельдович Я.Б., Райзер Ю.П. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений.- 1966. - М.: Наука, - 686 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. Гриднев С.А. Сегнетоэластики – новый класс кристаллических твердых тел // Соросовский образовательный журнал. - 2000. - Т. 6. - № 8. - С. 100-107.
10. 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.
11. Куксенко В.С., Томилин Н.Г., Дамаскинская Е.Е. Очаг «землетрясения» в лаборатории // РФФИ, - проект N 96-05-64585. http://www.rfbr.ru/old/pub/vestnik/V2_98/3_1.htm
12. Brace W.F., Byerlee J.D. Stick-slip as a mechanism for earthquakes // Science. -1966.- V. 153. - P.990-992.
13. Стейси Ф. Физика Земли. М.: - Мир. -1972. -342 с.
14. Кусов А.А. Фононная модель разрушения нагруженной атомной цепочки // ФТТ. - 1979.- Т. 21.- № 10.- С. 3095-3099.
15. Баранов А.И. Кристаллы с разупорядоченными сетками водородных связей и суперпротонная проводимость // Кристаллография. - 2003.- Т. 48.- № 6.- С. 1081-1107.
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. Сеньюков С.Л., Дрознина С.Я., Козлова Н.П. и др. Оперативная обработка Олюторского землетрясения 20 апреля 2006 г. и его афтершоков // Материалы конференции. Петропавловск-Камчатский.- 2007. <http://www.emsd.iks.ru/konf071112/pdf/t1/str205.pdf>
20. 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.
21. 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.
22. Allan D.R., Marshall W.G., Pulham C.R. The high-pressure crystal structure of potassium hydrogen carbonate (KHCO₃) // American Mineralogist.- 2007.- V. 92. - P.1018-1025.

23. Desbrandes R., Van Gent D.L. Intercontinental liaisons between entangled electrons in ion traps of thermoluminescent crystals // arXiv.org > [quant-ph](http://arXiv.org/quant-ph) > arXiv:quant-ph/0611109 2006.
24. Аки К., Ричардс П. Количественная сейсмология: Теория и методы. - М.: Мир.- 1983. Т. 1-2. - 880 с.
25. 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.
26. 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.
27. Somerville P., Saika C., Wald D., Graves R. Implications of the Northridge earthquake for strong ground motions from thrust faults // - BSSA.- 1996.- V. 86.- N. 1B.- P. S115-S125.
28. 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.
29. Смирнов С.Б. Ударно-волновая концепция сейсмического разрушения сооружений // Энергетическое строительство. - 1992.- № 9. - С. 70-73.
30. Бердыев А.А., Мухамедов В.А. Землетрясения - фликкер-шум? // ДАН СССР -1987.- Т.297- № 5.- С. 1077-1082.
31. Тимашев С.Ф. Время в естественных науках.
http://www.chronos.msu.ru/RREPORTS/timashev_vremya/timashev_vremya.htm
32. Скоков В.Н., Коверда В.П. $1/f$ -шум в модели пересекающихся фазовых переходов // Письма ЖТФ.- 1999.- Т. 25.- № 9- С. 9-14.
33. 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.

Кузнецов Владимир Валерьевич д.т.н., проф. по физике Земли, сотрудник ИНГГ СО РАН Новосибирск. 630090. ул. Мальцева 1 кв. 18. (383) 3303468, 89607873805, ikir@academ.org

ABOUT EARTHQUAKE PHYSICS

Kuznetsov V.V.

A.A. Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS,
Novosibirsk, 630090, Russia

Подписи к рисункам:

Рис 1. Слева: глубины литосферы, на которых происходят землетрясения. Справа: сравнительная шкала энергии и магнитуды землетрясения и других высокоэнергетических процессов.

Рис. 2. Связь магнитуды с длиной разлома - *а*; закон повторяемости – *б*; афтершоки – *в*.

Рис. 3. Определение положения эпицентра Олюторского землетрясения 2006 г. [19].

Рис. 4: 1- Выделение упругой энергии при образовании трещины. 2 - Пример огибающих записей удара Спитакского землетрясения 7.12.88 с импульсным типом вступлений. 3 - Импульс Нортриджского землетрясения 17.01.1994.

Рис. 5. Слева: силовая stick-slip модель очага землетрясения - двойная пара сил и диаграмма направленности для Р-волн. Положение эпицентра и фокальный механизм землетрясения. Типы смещений по разломам и соответствующие им стереограммы фокальных механизмов. Справа: получение стереограмм фокальных механизмов при различной форме ударной волны (shock-wave) и угла её прихода к поверхности [6].

Рис. 6. *а*) Скорость генерации импульсов акустической эмиссии возникающих при образовании трещин в диабазе при действии на образец постоянного одноосного сжимающего напряжения [20]. *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 [21]. *в*) Акустическое излучение релаксирующих дефектов, раскрывающихся трещин, схлапывающихся дилатонов и т.п. На верхней панели – излучение акустических волн без связи между дилатонами. На нижней панели – акустическая связь между всеми дилатонами.

Рис. 7. Изменение удельного объема ($\Delta V/V = 4\%$) в калисинаите при давлении 3.2 GPa – А, изменение пространственной структуры калисинита - Б, В. [22].

Рис. 8. Сопоставление колебаний сейсмоакустической эмиссии с изменением концентрации растворенного водорода в потоке термальной воды во время и после землетрясения 18.12.2002 г. на Камчатке (землетрясение обозначено вертикальной линией) [18].

Рис. 9. Модель разрывов Нортриджского землетрясения (в центре) [26, 27]. В левой центральной рисунка - распределение скоростей Р-, S-волн и ударной волны c_0 - по глубине [25]. В правой части рисунка – афтершоки [28].

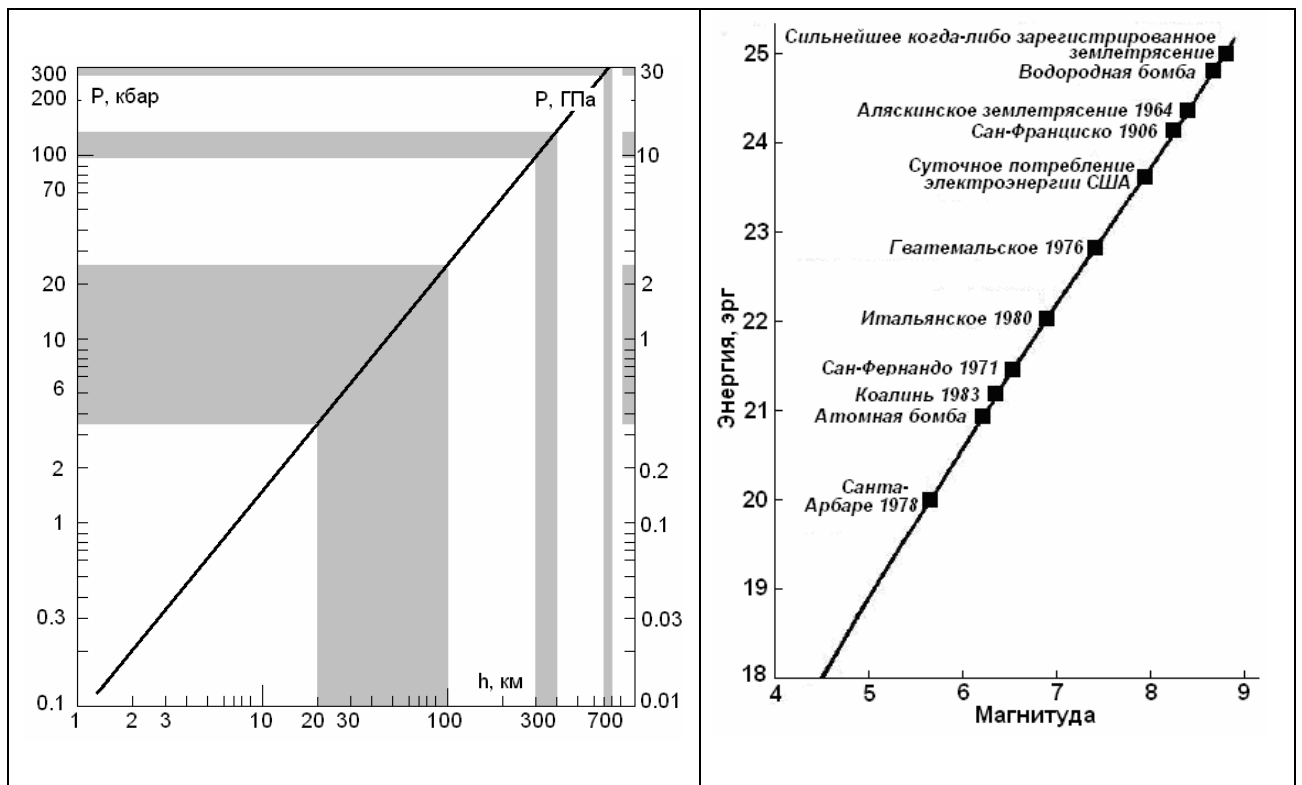


Рис 1. Слева: глубины литосферы, на которых происходят землетрясения. Справа: сравнительная шкала энергии и магнитуды землетрясения и других высокоэнергетических процессов.



Рис. 2. Связь магнитуды с длиной разлома - *а*; закон повторяемости – *б*; афтершоки – *в*.

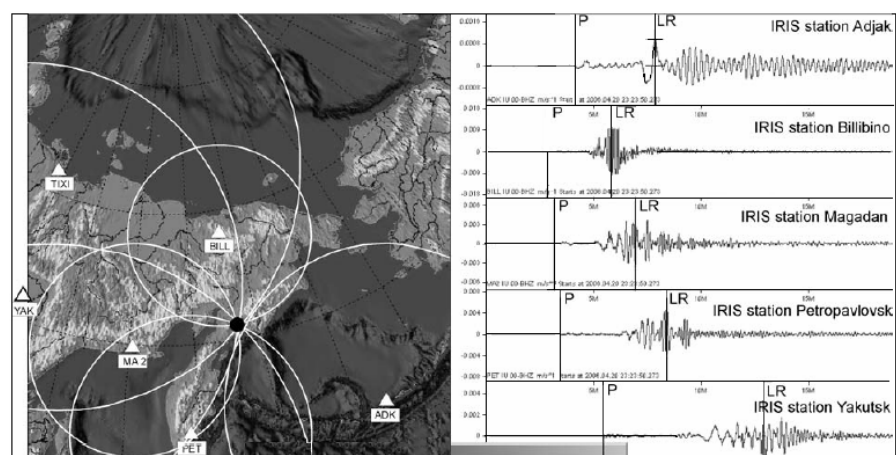


Рис. 3. Определение положения эпицентра Олюторского землетрясения 2006 г. [19].

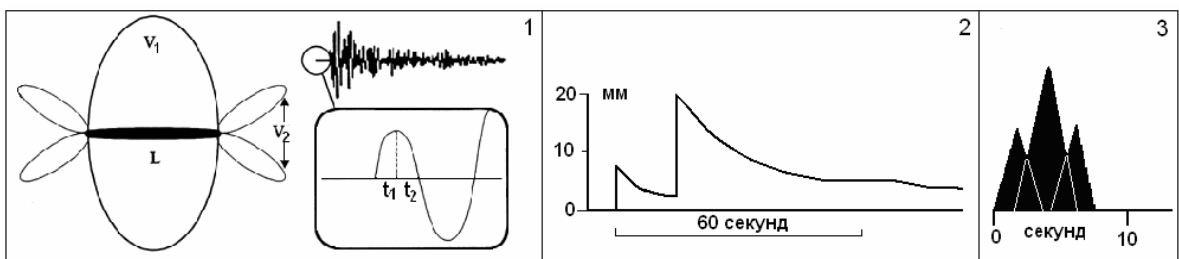


Рис. 4: 1- Выделение упругой энергии при образовании трещины. 2 - Пример огибающих записей удара Спитакского землетрясения 7.12.88 с импульсным типом вступлений. 3 - Импульс Нортриджского землетрясения 17.01.1994.

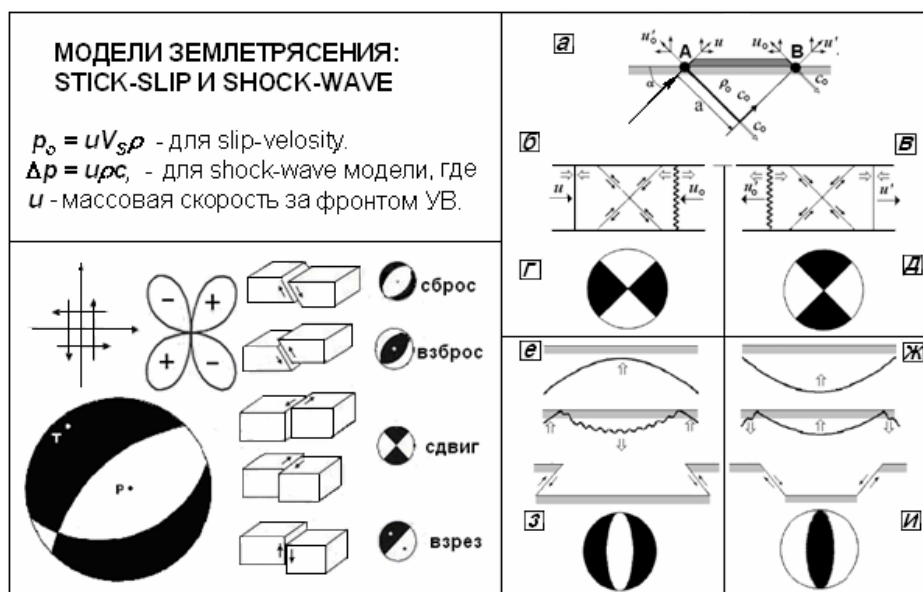


Рис. 5. Слева: силовая stick-slip модель очага землетрясения - двойная пара сил и диаграмма направленности для Р-волн. Положение эпицентра и фокальный механизм землетрясения. Типы смещений по разломам и соответствующие им стереограммы фокальных механизмов. Справа: получение стереограмм фокальных механизмов при различной форме ударной волны (shock-wave) и угла её прихода к поверхности [5, 6].

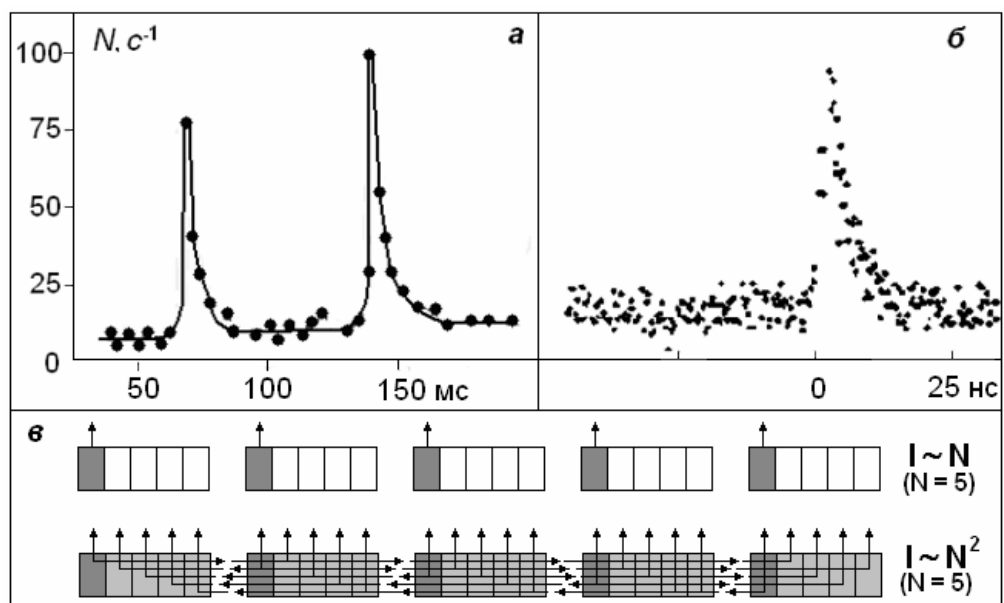


Рис. 6. *a)* Скорость генерации импульсов акустической эмиссии возникающих при образовании трещин в диабазе при действии на образец постоянного одноосного сжимающего напряжения [20]. *б)* Число зарегистрированных пар фотонов как функция задержки между моментами регистрации двух фотонов. Плоский участок отвечает случайным совпадениям между некоррелированными фотонами, пик соответствует квантовой запутанности [21]. *в)* Акустическое излучение релаксирующих дефектов, раскрывающихся трещин, сглапывающихся дилатонов и т.п. На верхней панели – излучение акустических волн без связи между дилатоном. На нижней панели – акустическая связь между всеми дилатоном.

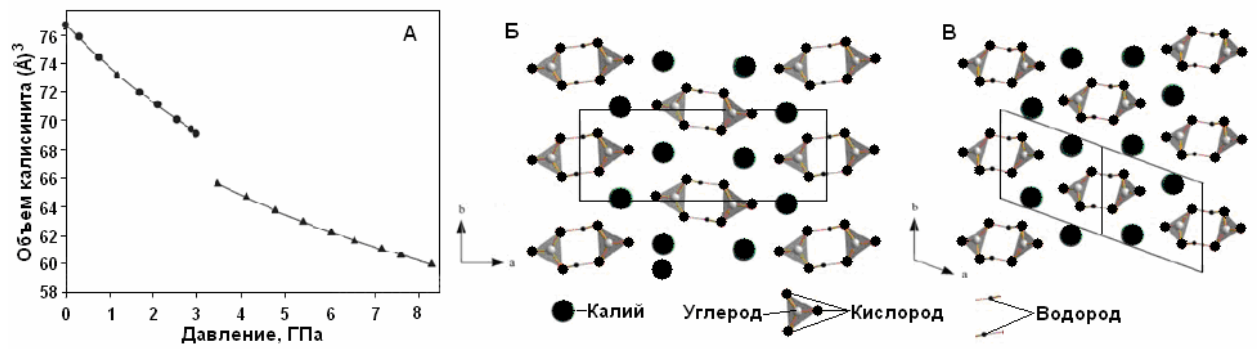


Рис. 7. Изменение удельного объема ($\Delta V/V = 4\%$) в калисинаите при давлении 3.2 GPa – А, изменение пространственной структуры калисинаита - Б, В. [22].

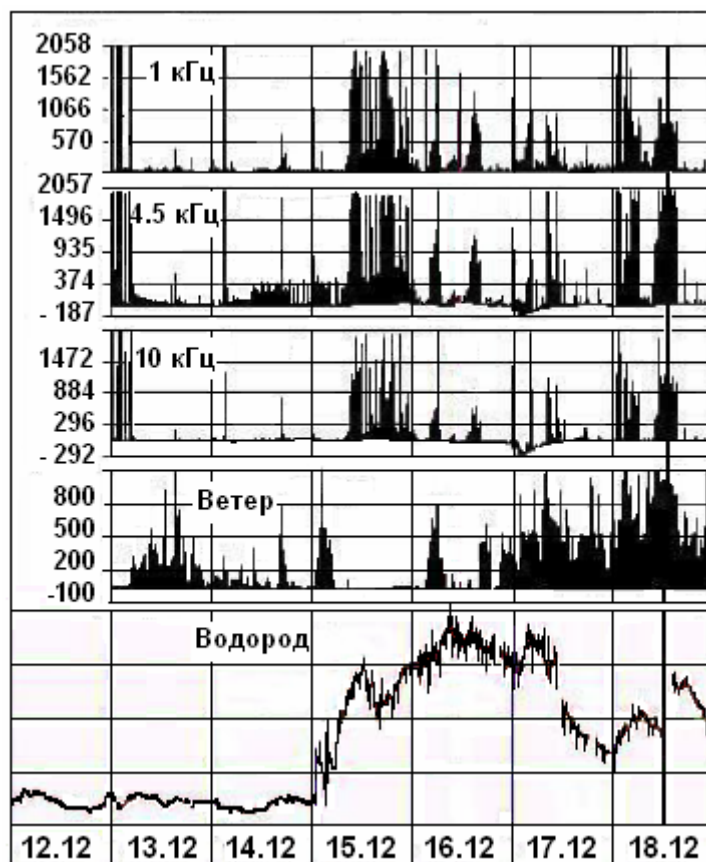


Рис. 8. Сопоставление колебаний сейсмоакустической эмиссии с изменением концентрации растворенного водорода в потоке термальной воды во время и после землетрясения 18.12.2002 г. на Камчатке (землетрясение обозначено вертикальной линией) [18].

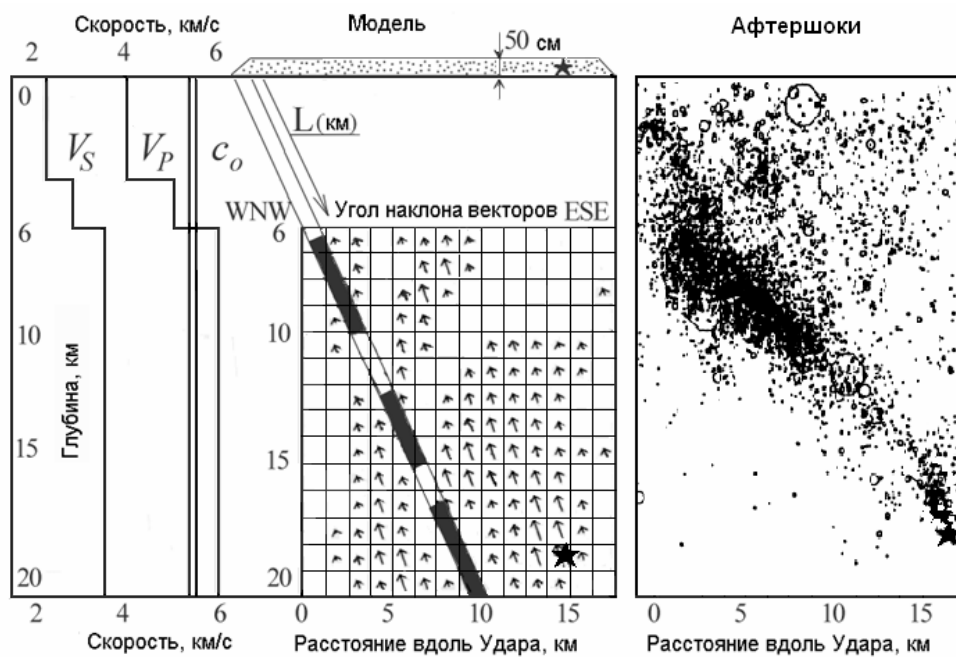


Рис. 9. Модель разрывов Нортриджского землетрясения (в центре) [26, 27]. В левой центральной рисунка - распределение скоростей P-, S-волн и ударной волны c_0 - по глубине [25]. В правой части рисунка – афтершоки [28].