Глава 10. Физика землетрясения.

В главе 10 рассматривается ударно-волновая модель землетрясения. Выход ударной волны на поверхность Земли. Распространение ударной волны от очага до поверхности. Модель акустического сверхизлучения. Формирование ударной волны. Акустическая модель. Эксперименты по туннелированию и запутанности в геологических образцах. Сейсмическая активность и водород. Акустическое сверхизлучение и образование ударной волны – как редукция волновой функции. Квантовомеханическая запутанность и телепортация – в Приложении 1.

10. 1. Ударно-волновая модель землетрясения. Выход ударной волны на поверхность Земли.

В сейсмологии этот вопрос обычно не обсуждается. Ударные волны, как правило, рассматриваются в физике энергии высокой плотности, в частности, в таких вопросах, как кумуляция энергии и образование кумулятивных струй, физика взрыва и образование кратеров при ударе высокоскоростных тел, пробивании преград и т.п. Как будет показано ниже, этот вопрос актуален и для сейсмологии, по крайней мере, в таком её разделе, как процессы, происходящие в эпицентре сильного землетрясения. Физика ударных волн рассмотрена в Приложении 3.

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

Дело, по-видимому, заключается в том, что физика землетрясения всё это время рассматривалось только в рамках механики сплошной среды и теории упругости. Сильные движения грунта, сопутствующие землетрясению, объясняются обычно присутствием сейсмотектонических деформаций (Гольдин, Кучай, 2008), хотя из всех опубликованных работ неясно, каким образом можно с этих позиций объяснить весь комплекс явлений, сопровождающих сильное землетрясение. К этим явлениям относятся: разрывы поверхности; отколы; волны на поверхности, когда среда ведет себя как вязкая жидкость; разуплотнение грунта, возникновение водяных фонтанов, грифонов и пр.

Оказывается, что все они находят логичное объяснение, если предположить, что само землетрясение представляет собой ударную волну (Кузнецов, 1990, 1992, 2001, 2008). В этом случае физику землетрясения можно условно разбить на три части: первая – это механизм образования ударной волны (УВ) в литосфере на глубине гипоцентра; вторая – прохождение УВ от гипоцентра до поверхности Земли и, третья, - выход УВ на поверхность Земли сопровождающийся всем комплексом явлений, о которых идет речь.

В наших исследованиях ударно-волновой модели землетрясения, в отличие, например, от работы (Гольдин, Кучай, 2008), под гипоцентром понимается совсем не некая условная точка, а, скорее огромное пространство, на котором возникает ударная волна. Некоторые авторы оговариваются, что очаг землетрясения сводится к точке для очень слабых землетрясений. Возможно, это справедливо, но уж совсем неправильно распространять этот подход при анализе, например, такого сильного землетрясения как Чуйское (Алтайское) 27.09.2003. Тем более, находить причину возникновения землетрясения в особенностях компонент тензора сейсмотектонических деформаций в районе точки, соответствующей эпицентру землетрясения.

Есть ли основания для того, чтобы вообще рассматривать идею ударной волны, как механизм землетрясения? Их достаточно много, к примеру, назовем две из них: первая связана с анализом сигнала, зарегистрированного на Новосибирской сейсмостанции, а вторая – мнение профессора С.Б. Смирнова (1992), строителя, специалиста по разрушению зданий во время землетрясения.

Величина смещения грунта во время главного толчка Чуйского землетрясения на Новосибирской сейсмостанции, составляет примерно 50 мкм. Зная величину смещения, можно попытаться оценить деформацию є, производимую приходящей волной: є ≈ (1 – $5) \cdot 10^{-3}$ ИЗ следующих ниже соображений. Величина напряжения σ грунта, соответствующая $\varepsilon = 0.1$, составляет примерно 500 бар и эта величина изменяется линейно с изменением є: $\sigma \sim \varepsilon$. Эта закономерность дает основание оценить $\sigma = p \approx 5$ бар при $\varepsilon \approx$ 10^{-3} . По-видимому, реальная величина σ ещё меньше, однако эти оценки показывают (при различных способах их получения) один порядок величин напряжения в волне. Скорость распространения волны, амплитуда которой составляет 5 бар от очага Алтайского землетрясения (в приближении, что волна плоская) до сейсмостанции Новосибирск, расположенной примерно в 650 км от очага равна 3.6 км/с. Это намного больше, чем местная (в грунте) скорость звука (≈ 400 м/с). Возникает вопрос, какая волна (ударная или нет) приходит к сейсмостанции, расположенной так далеко (650 км) от очага землетрясения? Волна такой амплитуды ударной вроде быть не должна. Однако, если производная $d^2\sigma/d\epsilon^2 > 0$, волну можно считать ударной вне зависимости от величины σ (Зельдович, Райзер, 1966). В нашем случае это условие выполняется. В книге (Зельдович, Райзер, 1966) сказано, что если условие $d^2\sigma/d\varepsilon^2 > 0$ не выполняется, - волну можно считать плоской волной сжатия, которая распространяется в упруго-пластической среде.

В качестве второго основания, сошлемся на мнение Смирнова, обосновавшего концепцию ударно-волнового сейсмического разрушения (Смирнов, 1992). Автор учел многочисленные наблюдения сейсмических разрушений зданий, которые показывают, что разрушения происходят сразу после первых наиболее мощных поперечных толчков. Результатом таких толчков, которые, конечно же, не успевают раскачать здание, т.е. вызвать в нем появление опасных сил инерции, является почти мгновенный срез колонн или стен здания, вследствие чего происходит разрушение здания до попадания его в резонанс. Для того чтобы объяснить эти факты, автор приходит к мнению, что такие разрушения могут производиться *только ударной волной*. Свою концепцию автор обосновывает расчетами и многочисленными примерами из практики сейсмических разрушений.

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

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

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

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

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

Материал в этой главе изложен в обратном порядке: сначала обсуждается выход УВ на поверхность, затем, - вопросы транспортировки УВ от очага к поверхности и, наконец, - вопросы формирования УВ в очаге землетрясения. Такой порядок вызван тем, что теория явления выхода УВ на поверхность хорошо развита (Зельдович, Райзер, 1966; Забабахин, 1997; Станюкович, 1971), что позволило найти непротиворечивое объяснение всем известным особенностям таких движений поверхности. Два других механизма (1 и 2) – сложнее и менее проработанные, они будут обсуждаться позже, после третьего.

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

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

Как известно во многих работах по физике очага сильных землетрясений, произошедших в последнее время, фиксируется и обсуждается подвижка в области очага (slip) и изменение этой подвижки во время основного удара (slip-velocity). В книге Аки и Ричардс (1983) спонтанное распространение сдвиговой трещины описывается формулой:

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

 $w(\xi_0, \eta_0)$ – подвижка трещины в координатах $\xi, \eta; \mu$ - модуль сдвига; $\xi(\xi, \eta)$ – траектория движения кончика трещины; $p(\xi, \eta)$ – величина сброшенного напряжения. Интегрирование этой формулы приводит к формуле для подвижки:

$$w(\xi_0,\eta_0) \approx -\frac{\beta p_0 t}{\mu}, \quad \beta = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} -$$
скорость сдвиговых волн (V_S), t – текущее

время процесса.

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

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

 $\Delta p = u\rho c$,

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 $\rho c = 3$ г/см³ × 5 км/с, то окажется, что величина Δp порядка 150 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.

Основные соотношения для ударных волн (УВ). Закон сохранения массы:

 $\rho_{\rm o} D = \rho_{\rm n} (D - u_n)$ или $u_n + \varepsilon D = 0$,

где ρ_n – плотность вещества на фронте волны, ρ_o - невозмущенная плотность, D – скорость распространения фронта волны, u_n - скорость течения среды за фронтом ударной волны. Закон сохранения импульса:

 $-\sigma_{\rm n} = p_n - p_o = \rho_{\rm o} u_n D,$

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

Уравнение сохранения энергии имеет классический вид:

$$E_n - E_o = 1/2(p_n \cdot p_n)(v_o - v_n)$$

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

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

$$D = \left[\rho / \rho_o \left(p - p_o\right) / \left(\rho - \rho_o\right)\right]^{1/2}, u = \left[1 / \rho \rho_o \left(p - p_o\right) \left(\rho - \rho_o\right)\right]^{1/2}.$$
(10.1)

Уравнения (10.1) справедливы для сухого грунта. Если грунт водонасыщенный, то *D* и *u*, после подстановки уравнения состояния водонасыщенного грунта в виде:

 $\rho = \rho_0 \{\alpha_1(p/p_o)^{-1/k_1} + \alpha_2 [k_2(p-p_o)/\rho_2 c_2^2 + 1]^{-1/k_2} + \alpha_3 [k_3(p-p_o)/\rho_3 c_3^2 + 1]^{-1/k_3}\}^{-1},$ где $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ – содержание компонент (по объему): воздуха, воды и твердого грунта, соответственно, ($\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 = 0$), k_1, k_2, k_3 - показатели изоэнтропы соответствующих компонентов; будут определяться следующим образом:

$$D^{2} = (p - p_{o})/\rho_{o} \{1 - \alpha_{l}(p/p_{o})^{-1/k} - \alpha_{2} [k_{2}(p - p_{o})/\rho_{2}c^{2}_{2} + 1]^{-1/k}_{2} - \alpha_{3} [k_{3}(p - p_{o})/\rho_{3}c^{2}_{3} + 1]^{-1/k}_{3}\}^{-1};$$

$$u^{2} = (p - p_{o})/\rho_{o} \{1 - \alpha_{1}(p/p_{o})^{-1/k} - \alpha_{2} [k_{2}(p - p_{o})/\rho_{2}c^{2} + 1]^{-1/k} - \alpha_{3} [k_{3}(p - p_{o})/\rho_{3}c^{2} + 1]^{-1/k} \}.$$

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

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

зависимости «напряжение-деформация», находится в нелинейной области). Это обстоятельство позволяет воспользоваться формулами Эйлера, Навье-Стокса и Пуазейля для течения жидкости, соответственно:

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

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

$$u = 1/4\pi\rho \left[\frac{\partial^2}{\partial x^2} \left(\phi - \psi\right) + \nabla^2 \psi\right],$$

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

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

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

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

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

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

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

здесь *К* и µ- коэффициенты, величины которых приведены в Таблице 10.1.

Для того чтобы перейти от веса взрывчатого вещества к энергии и применить формулу в нашей ситуации, воспользуемся соотношением между энергией и весом тротила. Известно, что удельная кинетическая энергия тротила равна 4 кДж/г. Положим, что сейсмическая энергия и энергии взрывчатых веществ эквивалентны. (Это не совсем точно, т.к. кпд источника не близок к 100%) Энергия землетрясения с магнитудой M = 7.5 равна 10^{23} эрг, $(10^{13}$ кДж), что эквивалентно 10^{12} г (одна мегатонна) тротила, тогда параметр $C^{1/3} \approx 10^3$ кг^{-1/3} Давление *p* в очаге (на фронте ударной волны) Чуйского землетрясения (M = 7.5), по-видимому, может достигать 1 кбар. Для сравнения, давление на фронте УВ (в нашей интерпретации) при Нортриджском землетрясении M = 6.7, E = 10^{22} эрг, могло достигать 100 бар. Давление на фронте ударной волны (волны сжатия) на расстоянии 650 км от очага, в Новосибирске, если принять самые высокие значения коэффициента К из Таблицы 10.1, оказывается порядка 1 бара. Очевидно, что эта оценка, по-видимому, наиболее высокая из всех возможных. Если, к примеру, параметр К будет меньше, а μ - больше, то давление *p* будет меньше чем 1 бар (1 атмосфера) на несколько порядков.

Как мы отмечали выше, величина смещения грунта во время главного толчка Чуйского землетрясения на Новосибирской сейсмостанции составляет примерно 50 микрон. Зная величину смещения, мы оценили деформацию $\varepsilon \approx (1 - 5)10^{-3}$. Величина напряжения σ водонасыщенного грунта, соответствующая $\varepsilon = 0.1$, составляет примерно 500 бар и эта величина возрастает линейно с ростом ε : $\sigma \sim \varepsilon$. Эта закономерность дает основание оценить $\sigma = p \approx 5$ бар при $\varepsilon \approx 10^{-3}$. Скорость звука в таком грунте ≈ 400 м/с. Скорость распространения волны, амплитуда которой составляет 5 бар от очага Алтайского землетрясения до сейсмостанции Новосибирск, расположенной примерно в 650 км от очага равна 3.6 км/с. Возникает вопрос, ударная ли волна приходит к сейсмостанции? Так как производная $d^2\sigma/d\varepsilon^2 > 0$, волну можно считать ударной вне зависимости от величины σ .

Табл	ица	10.1	
			_

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

Выход ударной волны на поверхность Земли. Рассмотрим пример, когда УВ подходит снизу к дневной («свободной») поверхности ("падает") - под некоторым углом а. Из сейсмических наблюдений этот угол, соответствующий направлению "главного удара" (main shock) землетрясения, находится в пределах 40-50° к горизонту. Например, при Спитакском землетрясении (1988, Армения) угол равен примерно 50°, а при Нортриджском (1994, США, Калифорния) - 40° и т.п. Наша модель позволяет определить область (эпицентр) разрушений такого землетрясения: Расстояние вдоль направления распространения УВ равно $\approx \Delta x$, а поперек направления – равно линейному размеру очага. Например, в Нортридже длительность импульса УВ (в нашей интерпретации) составляла ≈ 8 с, что при скорости распространения УВ ≈ 5 - 6 км/с, определяет область разрушений $\Delta x \approx (30 - 40)$ км. Причем, что характерно для землетрясений с косым падением УВ, эпицентр землетрясения (как проекция гипоцентра), как правило, не совпадает с областью максимальных разрушений. В качестве подтверждающего примера можно привести диаграмму разрушений землетрясения в Нортридже, где эпицентр находится в стороне от области максимальных разрушений (Harp, Jibson, 1996). Аналогичная ситуация наблюдалась и в Спитаке, и во многих других землетрясениях.



Рис. 10-1. Выход фронта плоской ударной волны (шириной **a**) на поверхность Земли под углом α к линии горизонта [1 – 5]. Выход на поверхность сферической ударной волны [6, 7]. Пояснения в тексте.

Акцентируем внимание на процессах, сопровождающих выход не слишком сильной ударной волны на поверхность (см. рис. 10-1). Выход ударной волны под углом α к линии горизонта изображен на рис. 10-1-1. Здесь фронт ударной волны, шириной a, двигающийся со скоростью c_0 , подходит под углом α к земной поверхности, вещество которой обладает плотностью ρ . Распространение ударной волны сопровождается сравнительно медленным движением сплошной среды с массовой скоростью u. Ударная волна отражается на участке AB и уходит вниз со скоростью c_0 . При отражении возникает быстро затухающая волна разгрузки (разрежения, растяжения), движение которой сопровождается перемещением вещества со скоростью u_0 . Действие на грунт силы, связанной с перемещением массы с вертикальными (вверх) компонентами этих скоростей приводят к разуплотнению, расширению грунта и подъему его относительно начального уровня на высоту порядка метра, как это, например, наблюдалось во время Чуйского (Геодаков и др., 2003) и Нортриджского землетрясений (Shen et al., 1996).

На участке *AB* за счет отражения ударной волны, может возникнуть система сил, направленных друг навстречу другу соответственно тому, как направлены горизонтальные компоненты массовых скоростей: $u - u_0$ (рис. 10-1-4), либо $u' - u_0'$ (рис. 10-1-5). Ниже этих рисунков показаны диаграммы первых вступлений (разломные диаграммы), соответствующие ситуациям, изображенным выше.

На рис. 10-1-2 изображено распределение плотности до (слева) и после выхода нормально падающей ударной волны (справа). Видно, что после выхода ударной волны и отражения волны от поверхности, вещество с плотностью ρ_1 (меньшей ρ_0) находится выше начального уровня. Аналогичная картина представлена на рис. 10-1-3, где изображены скорости в нормально падающей ударной волне со скоростью c_0 и массовые скорости *и* и *и*' $\approx 2u$ до выхода ударной волны на поверхность (слева) и после её выхода на поверхность. На рисунках 10-1-6 и 10-1-7 показаны схемы прихода к свободной поверхности сферической ударной волны: выпуклой (6) и вогнутой (7) и формирование отраженной волны разгрузки. Ниже, под каждой из схем приведены диаграммы первых вступлений. Темные секторы на всех диаграммах рис. 10-1 означают области сжатия, светлые – растяжения. Комбинируя из четырех приведенных диаграмм, можно получить любую из наблюдаемых в природе диаграмм. В нашей модели форма диаграммы определяется исключительно формой фронта ударной волны, которая, в свою очередь, определяется местными условиями её возникновения и прохождения по среде. Отсюда следует, что выход ударной волны сопровождается переносом вещества и наблюдаемым неоднократно вспучиванием почвы. Кроме этого, начальная форма ударной волны определяет форму разломных диаграмм (диаграмм первых вступлений).

Различие в скоростях распространения ударных волн по глубине и вдоль поверхности, вызывает возникновение растягивающих и сжимающих усилий разных знаков, приводящих к появлению разломов и разрывов земной поверхности. Соответственно, фазы вступления поверхностных волн, возникающих при образовании разрывов и фиксируемые сейсмостанциями, "повторяют" фазы направлений растяжениясжатия, определяемых (как, например, в Нортридже) по величине доплеровского изменения стабильной частоты радиосигналов со спутников (система GPS).

Взаимодействие ударных волн на поверхности. Рассмотрим волновую картину процессов формирования ударной волны в недрах Земли, движение её к дневной поверхности, возникновение волн разгрузки (растяжения) и взаимодействие этих волн. Воспользуемся приемом из практики изучения ударных волн и изобразим рассматриваемые процессы на *xt*-диаграмме, где x - координата, а t - время. Обозначим x_0 , t_0 - координату и время формирования ударной волны на поверхности кристаллического тела (см. рис. 10-2).

Предположим, что в земной коре, на глубине между 40-50 км (точка 0: x = 0) и 15-20 км (точка D: $x = x_0$), расположено геологическое тело, обладающее вполне определенными свойствами:

- во-первых, это должно быть прочное тело, способное к накоплению упругой энергии и активному трещинообразованию;

- во-вторых, тело должно быть изотропным, т.е. в нём не должно быть внедрений вещества, со свойствами отличными от свойств тела (плотность и скорость звука);

- характер нагрузки тела (в-третьих) должен быть таким, чтобы в нем могла возникнуть пространственно когерентная структура микротрещин или, иначе, - дальний порядок;

- в-четвертых, в этом теле должны раскрываться трещины вполне определенного размера, не более 100-200 микрон, которые потом, после события, могли бы "залечиться" так, что тело могло бы быть готово к очередному событию, и т.п.



Рис. 10-2. Выход ударной волны на свободную поверхность (в точке x_2 , t_2). УВ выходит на свободную поверхность и образует волну разгрузки, "бегущую" в обратном (по отношению к ударной волне) направлении. Длительность её импульса Δt , за это время ударная волна проходит по земной поверхности расстояние $\Delta x = x_3 - x_2$, h - глубина гипоцентра. В точке *В* так же возникает волна разгрузки, которая направлена против направления ударной волны.

При выполнении этих требований, в сейсмоактивной среде такого геологического тела (1 на рис. 10-2) возможно возникновение акустического стимулированного сверхизлучения (Кузнецов, 2001) и образование ударной волны. Которая, возможно, возникает в тот момент и в том месте, где скорость распространения волны (6) в среде превысит местную скорость звука, хотя возможны и другие (как будет показано ниже) механизмы образования ударной волны. В нашей модели, это, скорее всего, произойдет на границе (3, точка A) геологического тела (2) с окружающей его средой, в которой местная скорость звука ниже, чем в теле.

В точке ($A: x_2, t_2$) ударная волна (4) выходит на свободную поверхность (см. рис. 10-2) и образует волну разгрузки (5), "двигающуюся" в направлении отражения (по отношению к ударной волне). Если в среде имеется не совсем открытая поверхность, например, - слой с различающимися плотностями среды (точка A': x_1), то и на этой плоскости может возникнуть волна разгрузки. Длительность импульса ударной волны Δt конечна, за это время она проходит по земной поверхности расстояние $AB = \Delta x = x_3 - x_2$.

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

Рис. 10-3 демонстрирует выполнение принципа Рейда, сформулированного им как «теорию упругой отдачи». Статическая подвижка по разлому AA – σ соответствует импульсному движению среды на поверхности при взаимодействии УВ с волной разрежения (BP). УВ образуется в максимуме напряжений, согласно закону Кулона-Мора под углом в 45° к действующему напряжению.



Рис. 10-3. Выход ударной волны (УВ) на поверхность под углом α к поверхности и углом 45° к направлению подвижек «σ» по разлому «АА» (закон Кулона-Мора). Взаимодействие УВ с волной разгрузки (ВР) приводит к подвижкам, повторяющим подвижки по разлому (выполнение принципа Рейда).

Взаимодействие ударных волн с преградой. Отколы и разрушения. Предлагаемый здесь принципиально новый механизм сильных движений среды при землетрясении, - основан на известной физике взаимодействия волн, возникающих при выходе ударной волны на «свободную» поверхность твердого тела. Наиболее полно этот вопрос рассмотрен в книге Забабахина (1997), которой будем придерживаться при изложении материала этого раздела.

Как известно, ударная волна - это волна сжатия, на очень узком фронте которой, термодинамические характеристики претерпевают разрыв. Эта волна, при прохождении через твердое тело, уплотняет его, а при расщеплении на внутренних неоднородностях тела, - приводит к генерации и излучению объемных волн. Ударная волна, как отмечалось выше, отличается от обычных акустических (сейсмических) волн ещё и тем, что вслед за фронтом УВ происходит движение (течение) вещества твердого тела, причем массовая скорость этого течения значительно меньше скорости ударной волны, и, чем интенсивнее ударная волна, тем выше массовая скорость. При выходе ударной волны на поверхность твердого тела образуется волна разрежения, двигающаяся в сторону, обратную движению ударной волны. Образование волн, идущих в обе стороны от «свободной» поверхности принято называть *распадом разрыва.* Разрыв в начальных условиях распространения УВ действительно исчезает, так как образуются два других разрыва. В книге (Забабахин, 1997) рассмотрены четвертый. Все типы распада разрыва изображены на рис. 10-4 (сверху вниз):

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



Рис. 10-4. Возможные типы распада разрыва (Забабахин, 1997). Давления P_1 и P_2 – на фронтах волн ударной и разрежения, давление P_F – в теле, после прохождения по нему этих волн. Стрелки – направления распространения волн.

- Образование ударной волны и волны разрежения. Это происходит при выходе УВ из более жесткого вещества в более мягкое. Массовая скорость частиц более жесткого вещества удваивается и в нем начинает распространяться волна разрежения.

- Образование двух волн разрежения. Они возникают в том случае, когда, строго говоря, разрыва в начальных условиях нет, а волна разрежения приходит на границу двух сред, до этого сжатых и покоящихся. На Земле такая ситуация может возникнуть при выходе ударной волны на поверхность и образовании волны разрежения. Волна разрежения приходит на границу двух сред, например, грунта, лежащего на гранитном основании, либо рыхлого грунта на границе вечной мерзлоты и т.п. Волна разрежения является фактически волной плавного изменения состояния и не носит характера ударной волны, т.к. фронт такой волны имеет конечную ширину.

- Образование двух волн разрежения и разрыва сплошного вещества возможно при слабом начальном сжатии. При интенсивной волне разрежения элементы вещества начинают двигаться друг от друга в противоположных направлениях, т.е. происходит откол, - разрушение ранее целого и компактного вещества.

Особенности сильных движений. В течение последних 25 лет в сейсмически опасных регионах США и Японии созданы измерительные и информационные сети, позволяющие фиксировать комплекс явлений на земной поверхности в момент землетрясения. Например, землетрясение, в Нортридже, вблизи Лос-Анжелеса было зарегистрировано примерно 150 приемниками GPS (Global Positioning System) с точностью перемещений грунта порядка 1 мм. Кроме этого, использовались геодезические приборы, сейсмические датчики ускорений и т.п. Объем информации по сильным движениям Нортриджского

землетрясения так велик, что выбрать какую-либо конкретную деталь, и на ней сконцентрировать внимание, просто невозможно. Надо сказать, что данных по землетрясению в Кобе (Япония) 1995 г. не меньше, чем в Нортридже.

Обсудим особенности сильных движений грунта при землетрясении. В качестве примера, остановимся на данных, полученных с помощью датчика горизонтальных перемещений, установленного в 80 м. на 65° CB от разлома Сан Андреас, в момент Паркфилдского землетрясения 1966 г. Зависимость ускорения, скорости и величины смещения, грунта Паркфилдского землетрясения 1966 г., приведены в книге Аки и Ричардса (1983). Анализируя эти данные, можно видеть, что поведение упругой среды (грунта) скорее характерно для жидкости. Действительно, колебания смещений среды в горизонтальном направлении в момент землетрясения, напоминают волны на воде при падении в неё камня. Можно оценить: длительность периода колебаний $T \approx 1$ с, среднюю величину групповой (массовой) скорости $u \approx 10$ см/с (максимальное значение u в 80 метрах от разлома более 50 см/с), волновое число $k = \omega/u \approx 0.1$ см⁻¹. Величины k и ω для волн на поверхности жидкости связаны дисперсионным уравнением:

$$\omega = [g k + (\alpha^* k^3)/\rho]^{1/2}$$

где ρ - плотность среды, g – ускорение силы тяжести, α^* - коэффициент поверхностного натяжения. Подстановка в эту формулу оцененных нами данных, позволяет судить о величине «поверхностного натяжения» грунта, приобретшего, при ударной нагрузке на него в момент землетрясения, свойства, характерные для жидких сред. Величина α оказывается порядка 10^5 дин/см (для сравнения α :* воды \approx 70 дин/см, литосферы $\approx 10^{19}$ дин/см). Таким образом, полученная нами оценка величины поверхностного натяжения не слишком экзотична и вполне может оказаться реальной. При этом грунт, в момент его сильного нагружения, может проявлять вызванную пластичность и действительно вести себя как «вязкая жидкость». Далее рассмотрим несколько примеров сильных движений грунта при землетрясении.

Откольные явления в грунтах. Приведем результаты экспериментов по исследованию явлений отколов в грунтах, возникающих при взрывах в скважинах, выполненных более 30 лет тому назад (Гвоздев, Кузнецов, 1967). Эксперимент состоял в регистрации коротких импульсов от взрыва небольших зарядов взрывчатых вешеств, помешенных в скважину на глубину до 20 м, с помощью широкополосной сейсмической аппаратуры. С увеличением веса заряда (или уменьшением глубины его заложения) форма регистрируемого импульса менялась. На больших глубинах и малых зарядах, импульс был практически однополярен. Отколов грунтов при этом не наблюдалось. С увеличением веса взрывчатых веществ, на регистраторе появлялся второй импульс, следующий за первым, причем обратной полярности. С появлением второго импульса наблюдались отколы. Расположение датчика в скважине на сравнительно небольшой глубине приводило к тому, что на этом датчике второго импульса не наблюдалось, в то время как и отколы, и второй импульс на датчике, установленном на грунте, - регистрировались. Эти эксперименты демонстрируют возникновение волны разгрузки, следующей за ударной волной, и ее действие - отколы, а также ее быстрое затухание на сравнительно небольших глубинах. Заметим, кстати, что неоднократные попытки проследить трещины, образовавшиеся при землетрясении вглубь, заканчивались безуспешно: на глубине, большей, чем наблюдаемая глубина открытой трещины, она никогда не прослеживается (частное сообщение академика Н.Н.Пузырева).

Особенности сильных движений землетрясений. Физику землетрясений нельзя понять, если базироваться только на теоретических моделях, натурных и лабораторных экспериментах. Решающую роль должны сыграть непосредственные наблюдения за сильными землетрясениями, выявление их общности и различий, пространственных и

временных особенностей и закономерностей макросейсмики. Выясним, может ли оказаться полезным использование ударно-волновой модели при обсуждении особенностей явлений в грунте, сопровождавших сильные землетрясения.

Нортриджское землетрясение (M = 6.7; 17.01.1994). Любая теория явления, а так же его физическая модель, - проверяются опытом, т.е. экспериментом или качественными наблюдениями. В этом плане наблюдения за Нортриджским землетрясением 1994 г в своем роде - уникальны. Воспользуемся данными наблюдений, полученными американскими сейсмологами в момент прохождения этого землетрясения и некоторое время спустя после него. Используемые нами данные в значительной массе собраны в специальном выпуске BSSA (Northridge, 1996).

Наиболее изученное из землетрясений, - Нортриджское произошло вблизи Голливуда, пригорода Лос Анжелеса, в сейсмоопасном и густонаселенном районе, где сосредоточено наибольшее количество сейсмической измерительной аппаратуры. Особую ценность, на наш взгляд, представляют собой результаты измерения трех компонент сильных движений на специально оборудованном полигоне Van Norman Complex (Bardet, Davis, 1996), а так же результаты исследования величины и направления подвижек в очаге землетрясения.

Нортриджское землетрясение 6.7 баллов (энергия ~ 10^{22} эрг) произошло 17 января 1994 г. Координаты гипоцентра 32.2 ° N; 118.5 ° W; глубина 16.6 км. Сейсмический момент 1.2 10^{26} дин см. Ориентация разлома: направление 131°; наклонение: 50°; уклон: 115°. Размер зоны разрушений 20×20 км², скорость разрыва 2.8 км/с, фрактальная размерность D = 2, напряжение $\Delta \sigma = 100$ бар (Anderson, Yu, 1996).



Рис. 10-5. Расположение GPS станций (точки) в момент Нортриджского землетрясения. Звезда – эпицентр землетрясения, выделенный прямоугольник – область сильных движений, черный прямоугольник – специальный полигон VNC, стрелки показывают направления горизонтальных движений грунта. Слева, на вставке, - направление сжимающих и растягивающих сил в районе разлома Сан-Андреас.

На рисунке 10-5 представлено расположение GPS станций в районе Нортриджского землетрясения и величины перемещений грунта в момент толчка в горизонтальном направлении. Точками выделен прямоугольник размером 20×20 км², на который

приходился основной удар землетрясения, звездочкой – эпицентр землетрясения. Одна сторона прямоугольника ориентирована WNW-ESE, другая NEN-SWS. Черный маленький прямоугольник внутри выделенного соответствует положению Van Norman Complex, где были зарегистрированы сильные движения почвы. Слева внизу на вставке показано распределение действующих при землетрясении сил и направлений подвижек на поверхности.

Рисунок 10-6 показывает величины вертикальных и горизонтальных амплитуд и скоростей перемещений грунта, измеренных на Van Norman Complex (Bardet, Davis, 1996). Черные прямоугольники на рис. 10-6 соответствуют усредненным за 1 секунду величинам направлений смещений и векторов скоростей. Анализируя амплитуды и скорости перемещений грунта, приведенные на рис. 10-6, можно выделить некоторую квазипериодичность процесса $T \approx 2-3$ сек. Видно, что амплитуда горизонтальных перемещений и скоростей больше, чем вертикальных, примерно в 2 – 3 раза, при этом амплитуда вертикальных колебаний порядка $h \approx 10 - 20$ см. Максимальная скорость горизонтальных движений грунта достигает 177 см/с, средняя скорость вертикальных, - 10 – 20 см/с. Максимальная амплитуда горизонтальных движений - до 40 см. Условная длина волны вертикальных колебаний $\lambda \approx$ не более 50 см. Отношение h/λ не менее 1/5, что говорит о неустойчивости волн (Условие устойчивости: $h/\lambda < 1/2\pi$).

Анализ данных по сильным движениям показывает, что в отмеченном на рис.10-5 прямоугольнике максимальных разрушений (размером 20×20 км²) в момент толчка произошло поднятие (см. рис. 10-1) грунта на высоту ≈ 50 см.



Рис. 10-6. Временная зависимость продольных компонент (transverse, vertical) скоростей и смещений, записанных на станции Van Norman Complex (Bardet, Davis, 1996).

Чуйское землетрясение на Горном Алтае (*M* = 7.5) произошло на юге Горного Алтая, на территории Кош-Агачского района, 27 сентября 2003 г. в 11час. 33 мин. по Гринвичу. Землетрясение сопровождалось афтершоками, наиболее сильные из них два: первый - 27.09.03 в 18 час. 52 мин. по Гринвичу с магнитудой М = 6.4 и второй - 1.10.03 в 1ч. 03 мин.28 сек. по Гринвичу с магнитудой 7.0. Главный удар афтершока 1 октября произошел

в районе пос. Акташ (место расположения сейсмостанции), где отмечались повреждения зданий 7-ми, 8-ми бальной интенсивности.

Очаг землетрясения, в ходе вспарывания земной коры, «вышел на поверхность» в виде системы первичных сейсморазрывов (рис. 10-7). Эта система прослеживается на протяжении 20 км в бассейне р. Чаган-Узун на восточном погружении Северо-Чуйского хребта (рис. 10-7). Первичный характер разрывов характеризуется их морфологией и тем, что эти трещины представляют собой систему параллельных рвов, секущих различные формы рельефа. Эта система вытянута в северо-западном направлении.

Сейсмотектонические разрывы представляют собой эшелонированную систему трещин сжатия и расширения, укладывающуюся в линию СЗ простирания. Такая структура сейсмотектонического разрыва, по мнению авторов (Геодаков и др. 2003), характеризует подвижку в очаге как сдвиг в горизонтальной плоскости. Строение зоны сейсморазрывов несколько отличается для различных участков. Так, например, на водоразделе рек Чаган и Елангаш разрыв разветвляется на две основных трещины, которые затем смыкаются, представляясь в виде трещин северно-западной ориентировки. Наблюдается правостороннее смещение на 0.5 м. по западной ветви разрывов. По восточной ветви - смещение достигает 0.2 м. Блок, заключенный между этими рвами, опущен на 0.2-0.3 м и рассечен многочисленными диагональными трещинами. Авторы отмечают, что в зоне эпицентра Чуйского землетрясения находятся следы предыдущих землетрясений, которые, так же как современные, были следствием разрядки одного и того же очага. Чуйское землетрясение, по всей видимости, не является уникальным, - оно лишь несколько «обновило» следы прошлых, возможно, более сильных землетрясений. Этот факт однозначно демонстрирует, что очаг сильного землетрясения оказывается «привязанным» к определенной геологической структуре.

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



Рис. 10-7. Слева: (а) структура сейсморазрыва на водоразделе рек Чаган и Елангаш: 1 – закрытые трещины и разрывы, 2 – валы вспучивания, 3 – сейсморвы, 4 – амплитуда (м) и направления смещения. Большая стрелка – направление главного удара, параллельные стрелки – направления подвижек почвы. Справа вверху: (b) структура сейсморазрыва на водоразделе р. Талдура-Кускуннур. 1 – сейсморвы; 2 - бровки валов вспучивания; 3 – контуры валов вспучивания; 4 – оси валов вспучивания (Геодаков и др. 2003). Справа

внизу: (c, d) разрезы по A-A и B-B, звездочка – гипоцентр, стрелка – направление главного удара, **a** - фронт УВ.

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

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

 $x = a \cos \left(2\pi t / T_{\rm o} \right)$

тогда скорость движения грунта:

 $V = -(2\pi a_{\rm o}/T_{\rm o}) \sin(2\pi t/T_{\rm o}).$

Удельная энергия:

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

Кинетическая энергия, излучаемая очагом:

$$E = 3\pi^3 h^2 c t_o \rho (a_o/T_o)^2$$
.

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

Оценим величину (a_o/T_o) , принимая: c = 3,6 км/с, h = 18 км, $\rho = 2.7$ г/см³ и $E = 10^{23}$ эрг. Величина (a_o/T_o) , иначе, скорость движения грунта, $V \approx (5 - 10)$ см с⁻¹. По-видимому, эту оценку можно принять как некоторое усреднение, т.к. в эпицентре 7.5 бального землетрясения скорость движения грунта значительно (в 10 - 20 и более раз) выше, хотя, конечно, это утверждение измерениями не обосновано. Тем не менее, такая оценка полезна, и в дальнейшем, обсуждая параметры сильных движений в эпицентре Чуйского землетрясения, будем ориентироваться на неё.

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

Энергетика сильных движений. Воспользуемся формулой: $p = \rho Du$, где примем: D = 3.5 км/с, u = 1 м/с, p = 100 бар (полагая, что сброшенное сдвиговое напряжение примерно равно давлению p). Как отмечалось выше, эти параметры измерены при наблюдении Нортриджского землетрясения в Калифорнии и примерно соответствуют его энергетике (M = 6.7). Энергия Чуйского землетрясения (M = 7.5) примерно на порядок выше, следовательно, величины D и u, соответственно, выше.

Предположим невероятный случай, что вся энергия землетрясения E пошла, например, на разуплотнение грунта на поверхности $S = 10 \times 10$ км² под действием волны разрежения. В этом случае глубина слоя разуплотнения грунта была бы равна E/pS = 10 метрам. Эта оценка показывает масштаб явления. Грубая оценка суммарной длины очень сильных сейсморазрывов Алтайского землетрясения примерно 5 км, хотя мелкие разрывы прослеживаются на расстоянии до 100 км. Если принять глубину разрывов 5 м, а ширину – 20 м, то объем, который подвергся разрушению, равен 5·10⁵ м³. На эту «операцию» было

затрачено примерно $5 \cdot 10^{19}$ эрг. Оценим объем грунта, подвергшегося вспучиванию. Оказывается, что грубая оценка величины этого объема равна объему трещин. Возможно, это совпадение, но, возможно, - это реализация закона сохранения массы в ударной волне. В любом случае, суммарная энергия, потраченная на получение разрывов и вспучиваний, составляет примерно 10^{20} эрг на один из многих участков земной коры в эпицентре землетрясения. Будем, к примеру, считать, что таких участков 10, тогда получается, что на реализацию этого типа сильных движений и разрушений в эпицентре землетрясения «уходит» примерно 1 % от суммарной энергии. Пока не учитывалась часть энергии, которая «пошла» на работу грифонов, подвижку среды как квазижидкости и образование оползней.

Оценим, для сравнения, порядок кинетической энергии, израсходованной на образование грифона. Воспользуемся формулой Пуазейля для оценки объемного расхода жидкости $V(\text{см}^3/\text{с})$, изливающейся через круглое отверстие радиусом *R*, длиной «трубы» *l*, вязкостью «жидкости» η и под давлением Δp :

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

Подставляя $R = 10^2$ см, $\eta = 10^5 - 10^6$ Пз, $l = 10^2$ см, $\Delta p = 10^8$ дин/см², получаем: $V = 10^8$ см³/с. Учитывая, что время «работы» грифона порядка нескольких минут, масса (объем ΔV) выброшенного материала может достигать: $m \ge 1000$ т. Положим, что линейная скорость переноса массы m порядка $v = 10^4$ см/с, это позволяет сделать грубую оценку кинетической энергии работающего грифона: $E = 10^{17}$ эрг. Величину E можно оценить и по формуле: $E = \Delta p \ \Delta V$. Подставляя: $\Delta p = 10^8$ дин/см², $\Delta V = 10^9$ см³, получаем ту же величину E. Даже если допустить, что во время Чуйского землетрясения "работало" 100 таких грифонов, их суммарная энергия ($E = 10^{19}$ эрг) оказывается значительно меньше (в сто раз), чем энергия, которая пошла на образование сейсморазрывов.

Анализируя приведенные данные, вернемся к одной интересной особенности сильных движений. Сильные движения почвы имеют, несомненно, колебательный неустойчивый характер. Можно считать, что среда, в которой происходят подобные затухающие колебательные движения, ведет себя как «квазижидкость», в которой возбудили горизонтальные колебания (см. рис. 10-6). Фазы вертикальных и горизонтальных перемещений и скоростей не совпадают. Характерный вертикальный размер пространства, на котором наблюдается колебательный процесс: $a \approx 1$ м, величина напряжения в главном толчке землетрясения: $\sigma \approx 100$ бар. Знание этих параметров позволяет оценить величину вязкости «жидкой» среды: $\eta = \sigma a/v \approx 10^7$ Ра с. Оценка вязкости показывает, что вещество верхнего слоя почвы действительно находится в момент землетрясения в квазижидком, пластическом состоянии. Подобные оценки и сам подход к ним следуют из книги (Зельдович, Райзер, 1966).

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

скорости образования сейсморазрывов, различимых глазом, которые должны быть сравнимы со скоростями прихода к сейсморазрывам ударных волн.

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

О прочности грунта. Известно, что теоретическая прочность на разрыв твердого тела $\sigma_p \approx 0.1 E$, где E – модуль Юнга. Учитывая справочные данные, скорости сейсмических волн в грунте и его плотность, можно с уверенностью считать, что величина $E \approx 1$ кбар. Фактически прочность меньше чем σ_p примерно в 100 – 1000 раз. Для грубых, качественных оценок примем $\sigma_p = 1 - 10$ бар, или $10^6 - 10^7$ дин/см², что соответствует давлению вышележащих слоев грунта $p = \sigma_p = \rho g h$ на глубине h порядка нескольких метров (обычная для землетрясений глубина разрыва поверхности).

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

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

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

$$U = \sigma_{\rm p} / \rho_{\rm o} C$$
,

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

10. 2. Распространение ударной волны от очага до поверхности.

Расщепление ударной волны в очаге на примере Нортриджского 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.



Рис. 10-8. Модель разрывов Нортриджского землетрясения (справа) (Somerville et al., 1996; Zeng, Anderson, 1996). В левой части рисунка - распределение скоростей Р-, S-волн и ударной волны с₀ - по глубине (Shen et al., 1996).

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

На рис. 10-8 справа, изображена модель разрывов Нортриджского землетрясения. В левой части рис. 10-8 показано одномерное распределение скоростей сейсмических Р-и S- волн по глубине (Shen et al., 1996). На рис. 10-8 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. В работе (Zeng, Anderson, 1996) показано, что главный удар землетрясения в Нортридже, состоит из трех, следующих друг за другом, импульсов. Длительность главного удара землетрясения, по основанию импульса, составляет $\tau \approx 8$ сек. Скорость разрыва равна $V = L/\tau = 2.8$ км/с. Как следует из (Shen et al., 1996), величины slip векторов максимальны и равны 4 м в районе гипоцентра землетрясения. Их величина меняется в очаге в интервале от 0.5, до 3 м, а выше 6 м векторов вообще не наблюдается, угол наклона векторов к горизонту ~ 60 - 70 °.

Согласно наблюдениям, объемные волны возбуждаются на всем протяжении очага - от эпицентра землетрясения, практически до поверхности Земли. Обратим внимание на такую деталь, следующую из работы (Somerville et al., 1996): на глубине двух-трех километров и выше (рис. 10-8), т.е. вблизи земной поверхности, генерации объемных волн не наблюдается.

Для решения этой задачи обратимся к физике распространения УВ и образования ВР в сплошной среде. Волна разгрузки может образоваться не только при выходе УВ на свободную поверхность, а, как показано Зельдовичем и Райзером (1966), и при прохождении ее через вещество, нагруженное внешним давлением. Для этого необходимо выполнение ряда условий: Вещество должно быть сжато внешним давлением до величины порядка предела текучести материала ($p_{\kappa p}$). Амплитуда УВ должна быть больше $p_{\kappa p}$. 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 (Зельдович, Райзер, 1966). Заметим, что если скорость УВ значительно выше, чем местная скорость звука, расщепления волн вообще не происходит.

Соотнесем сказанное к нашей модели. Предположим, что предел текучести материала среды (*p_{кp}*) порядка 1 кбар. Это давление примерно соответствует глубине около 3 км. Кроме этого, по нашим оценкам, скорость УВ примерно (5 - 6) км/с. Скорость распространения Р-волн такого порядка значений, соответствует глубине около 2 - 3 км. Отсюда следует, что на глубинах меньших 2 - 3 км расщепления УВ и генерации ВР происходить не может. Действительно, этот эффект наблюдался при землетрясении в Нортридже. Здесь, на вертикальном разрезе (рис. 10-8), проходящем через гипоцентр землетрясения, определены вектора подвижек, соответствующие интенсивности объемных волн (Somerville et al., 1996). Как следует из этой работы, все волновые векторы направлены под углом ≈ 45° к горизонту, а их интенсивности изменяются, от максимальной до нуля, вдоль плоскости разреза. На малых глубинах (2 - 3 км) векторов подвижек нет. Они не наблюдаются так же в некоторых более глубоких областях разреза. Полученный результат можно интерпретировать (в рамках нашей модели) следующим образом: На малых глубинах нет эффекта расщепления УВ, поэтому не возникает ВР, поэтому нет и генерации объемных волн. Факт, что генерации объемных волн в некоторых частях разреза не происходит, может говорить, например, о том, что УВ, на своем пути, встречается с ослабленной зоной среды очага. В этой зоне не происходит расщепления УВ, либо она пересекает область пространства, в которой, по ряду причин, скорость звука значительно ниже скорости распространения УВ, что тоже может служить препятствием к расщеплению УВ и т.п. Заметим, что развиваемый нами подход находит простое и естественное объяснение еще одному явлению. Речь идет о том, что при взрывах атомных и водородных зарядов, сейсмостанциями регистрируется только волна сжатия и никогда не записывается волна обратного знака. По-видимому, это связано с тем, что ядерные заряды подрывают на таких небольших глубинах, на которых не может происходить расщепления УВ и, соответственно, генерации объемных волн.

Муйское землетрясение (M = 7.6 - 7.9, 57/06/27). В районе северного Байкала в 1957 г. не было разветвленной сейсмологической сети, тем не менее, тщательное изучение геологической структуры этого землетрясения позволяет отнести его к достаточно хорошо изученным. Дело в том, что этот район подробно изучен с помощью методов глубинного сейсмического зондирования - ГСЗ (Крылов и др., 1993). Методы ГСЗ позволяют выявить объемные, трехмерные, глубинные неоднородности литосферы. Одним из наиболее

интересных для нас результатов использования этого метода, было детальное изучение пространственных неоднородностей распределения скоростей продольных волн в очаговой области катастрофического Муйского землетрясения, произошедшего 27 июня 1957 г., его магнитуда оценивается в 7.6-7.9, интенсивность - 10-12 баллов, энергетический класс - 17, глубина очага около 15 км.



Рис. 10-9. Сейсмический разрез земной коры в Муйском районе Байкальской рифтовой зоны по данным скоростей Р-волн (Крылов и др., 1993).

Сейсмическая активность этого района, по данным наблюдений за период 1962-1979 гг., повышена в западной и северо-восточной частях района (Левая и правая части рисунка). Именно на этих участках располагаются эпицентры инструментально зарегистрированных землетрясений 12-го и более высоких энергетических классов. Подавляющее большинство таких землетрясений произошло после Муйской катастрофы (северо-восток изучаемого района, на рис. 10-9 справа). В его западной части, сильнейшим было Северобайкальское землетрясение 1917 г. (энергетический класс К = 16, магнитуда 6.6-6.7, интенсивность - 9 баллов, на рис. слева), глубина гипоцентра грубо оценивается в 15-20 км. В разделяющей эти участки зоне "сейсмического затишья" (рис. 21-8, между 50 и 100 км, где можно построить «город») в текущем столетии не зарегистрировано ни одного землетрясения с К > 12.

В районе эпицентра Муйского землетрясения на территории около 60 тыс. кв. км методом ГСЗ проведены детальные площадные и профильные наблюдения, получено около 1600 зондирований. Выявлена область повышенной скорости, вытянутая в северовосточном направлении и распространяющаяся в нижнюю часть земной коры вплоть до ее подошвы. Область высокой скорости включает в себя зону сейсмического затишья и два района активизации. Резкие краевые неоднородности области совпадают с гипоцентрами двух сильных землетрясений. Авторы считают эту область глубинным накопителем упругой энергии. В этом случае слагающие ее горные породы должны обладать прочностью энергоемкостью. Вероятными повышенной И местами разрядки накопившейся энергии могут служить ослабленные участки на контактах высокопрочного объема с вмещающей его средой. Авторы при анализе записей колебаний сдвиговых волн не обнаружили эффектов их расщепления на SV- и SH-составляющие, что позволяет считать среду изотропной. Надо сказать, что отображение крупных черт глубинного строения по P- и S-волнам близки. Рассматриваемое тело, несмотря на существование в нем локальных внутренних неоднородностей, в целом характеризуется относительным увеличением плотности и обоих упругих модулей. В его пределах модуль сдвига увеличен на 15-20 % от среднего значения в изученной области. Как следует из рисунка 10-9, в рассматриваемом нами сейсмически активном теле (области) скорость Р-волн, от слоя М в направлении к земной поверхности, вплоть до границы тела с вмещающей средой, постепенного уменьшается, а на его границе - убывает довольно резко.

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

Афтершоки. Как известно, после сильного землетрясения в области его очага возникает рой повторных землетрясений, глубина гипоцентров которых, как правило, находится выше, чем плоскость основного удара. Согласно нашей модели, для образования объемных волн, возникающих при прохождении УВ от гипоцентра к земной поверхности, на ее фронте должны развиваться давления порядка предела текучести вещества, через которое распространяется УВ. Очевидно, что в таком случае на фронте УВ должно происходить "закрытие" (залечивание) трещин, наличие которых препятствовало (по нашей модели) возникновению акустически активной среды И образованию землетрясения. После такого "закрытия" трещин, - среда оказывается вновь способной к генерации ударных волн. Однако по прошествии определенного времени, пространство очага постепенно вновь заполняется не залечивающимися трещинами и перестает быть способным к генерации УВ. Эта идея является очевидным следствием нашей модели. В качестве подтверждения её правомерности приведем рис. 10-10 (Wald et al., 1996), из которого следует, что после Нортриджского землетрясения 1994 г. максимальная концентрация афтершоков соответствует плоскости главного удара этого землетрясения. Звезда на этом рисунке показывает положение гипоцентра, угол подхода главного удара к дневной поверхности, как мы отмечали раньше, составляет примерно 40-45°. Максимум разрушений Нортриджского землетрясения располагается строго на север от гипоцентра (эпицентра) землетрясения, в то время как максимум афтершоков немного (градусов на 20) повернут в восточном направлении (в сторону Голливуда). Рисунок 10-10 показывает, что проекция афтершоков на дневную поверхность приходится на область между гипоцентром землетрясения и эпицентром максимальных разрушений, т.е. в области максимальных значений амплитуды ударной волны, как это и должно следовать из нашей модели.



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

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

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

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

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

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

$$B = B_o/(1 + at)^{\alpha}$$

 $N(t) = N_o \exp(-\lambda t)$

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

10. 3. Модель акустического сверхизлучения.

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

Эксперименты. Модель базируется на объяснении известных экспериментальных фактов. Авторами ряда работ неоднократно наблюдалось явление самопроизвольного усиления интенсивности акустической эмиссии, которое затем, так же самопроизвольно, - прекращалось. Единственное объяснение этому явлению с точки зрения самоорганизации

когерентной структуры на основе взаимодействия звуковых волн с раскрывающимися трещинами было сделано автором. Им же высказано предположение, что эффект усиления акустической эмиссии имеет некоторую общность с оптическим сверхизлучением. Любопытный факт, досконально исследованный в некоторых работах в Японии и Китае, состоит в том, что эффекты акустического сверхизлучения происходят далеко не во всех типах горных пород. Так, например, изучение режимов акустической эмиссии гранитов двух различных типов, внешне практически не отличающихся один от другого, показало, что при нагружении образцов на прессах, они ведут себя по-разному. На серии образцов гранита из одного месторождения эффект резкого усиления интенсивности акустической эмиссии, названной нами акустическим сверхизлучением, постоянно присутствует, однако, на серии образцов гранитов другого типа – эффекта нет. Этот результат, неоднократно подтвержденный экспериментально, дает основание полагать, что и в земных недрах должны встречаться геологические тела, реология которых такова, что в них могут развиваться процессы самоорганизации и генерироваться, в конечном счете, землетрясение, а в других телах, на первый взгляд идентичных первым, таких явлений возникнуть не может.

Результаты лабораторных экспериментов и натурных наблюдений (рис. 10-11) 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. Ниже мы рассмотрим два различных подхода к этой проблеме: акустическая эмиссия (АЭ) обязана образованию трещины (1) и она вызывается дислокациями, в качестве которых могут быть процессы образования и разрушения водородных связей в веществе (2).

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



Рис. 10-11. *а*) Скорость образования трещин в диабазе при действии на образец постоянного одноосного сжимающего напряжения (Журков и др. 1980). *δ*) Геоакустические сигналы, зарегистрированные перед землетрясением 18.12.2002 (К = 12.1) на Камчатке (ИКИР). Время события отмечено стрелкой (Купцов, 2006).

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

$$\sigma = 1/\gamma \left(U_0 - kT \ln \tau/\tau_0 \right) = \sigma_{\max} - (kT/\gamma) \ln \tau/\tau_0. \tag{10.2}$$

Рассмотрим роль ангармонизма в кинетической теории прочности. Представим силу межатомного взаимодействия $F(\triangle)$ (см. рис. 10-12) в виде разложения в ряд Тейлора по величине $\triangle a$ смещения атома от равновесного расстояния r, сохраняя два члена: $F(\triangle a) = f$ $\triangle a - g(\triangle a)^2$, где f –константа упругости связи, а g - коэффициент ангармоничности, учитывающий нелинейность силы взаимодействия.



Рис. 10-12. Сила межатомного взаимодействия как функция смещения атомов (Журков, Петров, 1978).

Из рис. 10-12 видно, что максимум силы *Fth*, достигаемый при удлинении $\triangle a$, определяет теоретическую прочность связи. Если к связи приложена сила *Fs*, то при *Fs* < *Fth* возможен термофлуктуационный разрыв связи. Он обусловлен ангармоничностью тепловых колебаний атомов, что порождает дополнительную флуктуирующую силу *Fg* = *Fth* – *Fs*:

$$Fs = Fth - 2(gkT/f) \ln \tau/\tau_0. \tag{10.3}$$

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

$$\sigma = \sigma_{\max} - (2gkT/fa^2x) \ln \tau/\tau_0, \qquad (10.4)$$

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

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

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

$$\Delta \omega / \omega = G \epsilon \tag{10.5}$$

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

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



Дилатон △ - в линейной цепочке атомов

Фононная модель разрушения основана на исследовании устойчивости локальных отрицательных флуктуаций плотности – дилатонов мощности $\triangle = (r' - r)/r$, где r' > r – расстояние между ближайшими атомами в области AB. При «схлопывании» дилатонов происходит раскрытие трещины. Этот процесс сопровождается излучением акустической волны, причем на её формирование необходимо некоторое пространство, соизмеримое с длиной акустической волны λ .



Рис. 10-13. Излучение раскрывающихся трещин (схлопывающихся дилатонов): верхняя панель – излучение акустических волн без связи между дилатонами. Средняя и нижняя панели – акустическая связь между двумя, тремя и пятью дилатонами.

Предположим, что в некотором объеме среды существует n (n = 5) дилатонов (рис. 10-13), а схлопывание происходит только в одном. Излученная акустическая волна взаимодействует путем обмена энергией с фононами решетки с другими дилатонами, передает им энергию и способствует их схлопыванию. Если характерный размер выделенного объема среды меньше длины волны λ , то в нем взаимодействия с собственной акустической волной не происходит. Рассмотрим N объемов, в каждом из которых находится n дилатонов. Если взаимодействия между дилатонами не происходит,

то в единицу времени излучается N импульсов. Если происходит такое взаимодействие, то акустические волны, возникающие при схлопывании N дилатонов «запускают» (N - 1) дилатон. В результате акустический фон возрастает с N импульсов в единицу времени до: $N + N(N - 1) = N^2$, что и требовалось доказать. По физике, 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 ~ N^2 .



Рис. 10-14. Численное решение (вида бризер)- для нелинейной решетки Шредингера.

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

В настоящее время представляется, что приемлемое решение взаимодействия «волна-трещина» может быть найдено в физике фононов, дилатонов и бризеров. Особенность дилатона заключается в способности черпать энергию от окружающих фононов и отдавать энергию им. Увеличение энергии дилатона может происходить не только за счет тепловых фононов, но и за счет поглощения фононами звука.

В дискретных решетках Клейна-Гордона и Шредингера возникают решения, называемые бризером (breath). Бризеры, - это локальные решения дифференциальных уравнений с зависящей от времени амплитудой (рис. 10-14). Физически, решения бризера соответствуют двум солитонам, типа «кинк» и «антикинк». Взаимодействие их приводит к образованию стоячей волны в решетке. Амплитуда бризера может возрастать до тех пор, пока не произойдет разрушение решетки, т.е. образование трещины и её раскрытие, сопровождающееся излучением акустической волны. Акустическая волна может привести к образованию другого бризера и т.о. может возникнуть лавина образования трещин. Конечным «продуктом» этого процесса может быть генерация ударной волны.

10. 4. Формирование ударной волны. Акустическая модель.

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» (стр. 13).

Предположим, что в некотором объеме напряженной горной породы образовалась структура параллельных друг другу трещин и микротрещин. Раскрытие одной из микротрещин, сопровождается излучением S-волны. Эта волна, рассеиваясь на трещине, переизлучает Р-волну, распространяющуюся в направлении ориентирования трещин, и Sволну, распространяющуюся поперек луча Р-волны. Рассеиваясь на микротрещине, Sволна приведет к её раскрытию, и каскад явлений повторится, аналогично приему, используемому в методе пересекающихся характеристик (Жуков, 1960). В результате, в этом объеме образуется некоторое количество Р-волн, распространяющихся вдоль направления трещин со скоростью V_P и S-волн, распространяющихся поперек этого направления со скоростью V_S. Предположим, что расстояние между соседними трещинами (по лучу S-волн) равно x. Тогда, если выполняется условие: $\tau_1 + \tau_2 = \tau_0 + \tau_3$, 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: $\Delta y / V_P = -\tau_o$ + x /V_S. Оценим величину x, для чего примем: $\Delta y = x$, $V_P = 5$ км/c, $V_S = 3$ км/c, $\tau_o = 10^{-7}$ c, 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.

Известно, что ударные волны могут возникать не только при разрывных начальных граничных условиях, но и в областях, где движение среды в начале не сопровождается никакими разрывами. Такие случаи «самопроизвольного» зарождения ударных волн всегда связаны с явлением *пересечения одноименных характеристик* (Жуков, 1960). Простейший случай явления пересечения, это образование т.н. центрированной волны, когда несколько простых волн, при их одновременном распространении, пересекаются в одной точке (О) – вершине волны (рис. 10-15-а). При этом возникает волна сжатия, в вершине которой плотность вещества среды и давление в волне возрастают. Такая волна может стать ударной.



Рис. 10-15-а. Когерентное сложение акустических импульсов в точке 0. Метод пересекающихся характеристик (Жуков, 1960). Рис. 21-14-б. Модель укручения и «опрокидывания» солитона (Заславский, Сагдеев, 1988)

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

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

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

Известно явление укручения фронта УВ за счет того, что материальные частицы, находящиеся в пучности ударной волны (где плотность среды выше), движутся быстрее, чем соседние частицы вне пучности. Волновой профиль укручается настолько, что может привести к опрокидыванию УВ (рис. 10-15-б).

Основополагающее ограничение. Акустическая модель образования ударной волны, в принципе, физически довольно прозрачна и правдоподобна. Есть один момент недостаточно ясный, который требует более глубокой проработки. Речь идет о постулированном нами механизме поглощения звуковой волны микротрещиной, приводящим к раскрытию новой трещины. Но такая задача. По всей видимости, преодолима, однако существует проблема принципиального характера, о которой мы не упоминали раньше. Эта проблема касается *принципиальной возможности использования акустики для генерации ударной волны*.

Действительно известно, что мощные землетрясения, имеющие характерный размер в поперечнике, достигающий 1000 км, обладают фронтом нарастания сигнала порядка секунды (и меньше). Это означает, что должен быть некий агент, связывающий огромный массив сейсмически активной среды с колоссальной скоростью, значительно превышающей акустические скорости. Например, для синхронизации объема горной породы (в поперечнике 1000 км) за время порядка 0.1 с, - скорость, необходимая для передачи сигнала ~ 10⁴ км/с, что значительно больше скорости звука. В качестве синхронизующего, казалось бы, мог быть электромагнитный сигнал, однако нет никакого правдоподобного механизма, в котором бы синхронизация раскрытия трещин могла бы быть связана со сверхвысокочастотной электромагнитной волной. Сверхвысокочастотной, - волна должна быть потому, что длина волны должна была бы быть соизмеримой размеру микротрещины.

Получается так, что сама постановка задачи генерации ударной волны неверна? Нет, это неверное утверждение. В квантовой физике хорошо известна идея квантовой запутанности, иначе, принципа неопределенности Гейзенберга, когда среда становится когерентной, она описывается некой волновой функцией и, когда происходит редукция этой функции («смерть запутанности»), 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 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 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 удалось резко увеличить плотность вещества, например, на 10 % ($\Delta \rho / \rho = 0.1$). Предположим, что увеличение плотности среды происходит в 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 тонком слое литосферы, расположенном на глубине, характерной для возникновения землетрясений. Наша идея состоит в привлечении квантовых механизмов для создания локального разрыва термодинамических характеристик среды, в частности – плотности. Однако прежде ознакомимся с успехами, достигнутыми в теории и экспериментальных исследованиях, проводимых в последнее время в университетах различных стран по квантовому запутыванию и телепортации квантового состояния на огромные (с точки зрения квантовых размером) расстояния.

10. 5. Эксперименты по туннелированию и запутанности в геологических образцах.

Лед. Разработанная для кристаллов с водородными связями теория переменной волновой функции для основного состояния, - была применена (Schweizer, Stilling, 1984) для исследования поведения нескольких полиморфных модификаций льда при высоком давлении Теория точно объясняет коротко- и длинноинтервальные протонные корреляции и квантово-механическое туннелирование, которые все вместе являются важными для режима высокого давления. Основное внимание уделяется индуцированным давлением фазовым переходам порядок-беспорядок и симметризации водородной связи во льдах VII, VIII и Ic. При давлении примерно 330 кбар был обнаружен переход первого порядка (управляемый протонным туннелированием), из фазы VIII антиферроэлектрически упорядоченного льда в высокоионизированную форму протонно-неупорядоченного льда VII. Несмотря на высокую степень ионизации, при переходе сохраняется порядок, на что указывает бимодальность плотности протонного заряда вдоль связи. Предсказано, что кроссовер к одномодальному состоянию, т.е. симметризации водородной связи, происходит при 450 кбар. Изучены эффекты при замещении изотопом дейтерием. Расчеты для кубической формы льда с более низкой плотностью показывают, что, повидимому, в этом соединении можно наблюдать симметричные водородные связи при давлении более низком, чем то, которое требуется для плотных льдов.

В работе (Sugimura. et al., 2008) проводились исследования объемного сжатия и фазовых переходов льда вплоть до 126 GPa путем измерения синхротронной рентгеновской дифракции и плотностно-функциональных вычислений. Экспериментальные данные показывают, что при комнатной температуре лед меняет свою сжимаемость при 40 и 60 GPa, что соответствует фазовым переходам льда VII к динамически разупорядоченным льдам VII и Х. Промежуточная фаза, динамически разупорядоченный лед VII, высоко сжимаем, возможно, благодаря квантовым эффектам протонов. В отличие от этого, динамически разупорядоченный лед X демонстрирует значительно меньшую сжимаемость.



Рис. 10-16. Экспериментальные результаты по сжатию льда различных модификаций. Черточками показаны предсказанные расстояния между соседними атомами кислорода (О…О), равные 2.44, 2.36 и 2.27 Å, соответственно, при возникновении эффекта туннелирования. Стрелками отмечены фазовые переходы льда.



Рис. 10-17. Изменение потенциала Морса водородной связи О-Н (в ангстремах) под действием внешнего давления: 0, 23.5, 41.2 ГПа вдоль направления О...О. (На рис. потенциал обозначен в электрон-вольтах, хотя приведены величины в см⁻¹ (слева)). На рис. (справа вверху) показан характер изменения расстояния между атомами для различных типов связи, - от величины давления. Относительное уменьшение объема кристаллической структуры с увеличением давления (справа внизу).

Силикат магния. Исследованы структурные и физические свойства вещества D-слоя мантии при высоком давлении (Tsuchiya et al., 2005). Авторы полагают, что в этом слое находится в основном силикат магния ($Mg_2Si_2O_6H_2$). 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 $Mg_2Si_2O_6H_2$ под давлением очень похожи. При 40 GPa была обнаружена симметризация водородных связей. Эта индуцированная давлением симметризация водородных связей. 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 δ-AlOOH сообщалось о подобной индуцированной давлением симметризации водородной связи.

Гидрокарбонат калия. Для изучения корреляции протонов водорода в ионном кристалле гидрокарбоната кальция (КНСО₃) авторы (Fellaux et al., 2006) использовали технику дифракции нейтронов. Протоны участвуют в организации планарных центросимметричных димеров (НСО₃⁻)₂ за счет образования водородных связей. При этом наблюдалось установление квантовой запутанности. При замене КНСО₃ на КDCO₃, запутывания не возникало. В экспериментах квантовое запутывание наблюдалось до температуры 300 К.

В работе (Nagai et al., 2002) проведены измерения синхротронной рентгеновской дифракции для калисинита (КНСОЗ) вплоть до 9.0 GPa при комнатной температуре. Обратимое фазовое превращение наблюдалось при примерно 2.8 GPa. До сих пор не была идентифицирована структура фазы высокого давления. Поведение калисинита при сжатии является высоко анизотропным, и а-ось, примерно, в два раза более сжимаема, чем оси b-и с-. Поведение при сжатии отличается от того, которое наблюдается при сжатии со снижением температуры. Это означает, что с возрастанием давления водородно-связанное расстояние О … О значительно укорачивается.



Рис. 10-18. Примеры дифракционных картин для решетки КНСО₃ при 30 К (А) и при 300К (В) На вставке в центре рисунка: слева – димер, справа – структура решетки [JPC]. (Nagai et al., 2002).

Калисинит – это минерал гидрокарбоната калия (КНСО₃). При комнатной температуре кристаллическая структура моноклинная с четырьмя молекулами на ячейку, и две карбонатные группы СО3 объединены водородными связями с образованием центросимметричного (НСО₃) димера. Катион калия окружен восьмью атомами кислорода и соединяет димеры. Поскольку водородные связи локализованы в димере, в структуре отсутствует решетка водородных связей. При комнатной температуре существует два кристаллографически неравнозначных положения водорода. Считалось что синхронные протонные переходы скачком через водородные связи - это маловероятный механизм разупорядочивания. Однако недавние исследования показывают возможность туннелирования протонов через потенциальный барьер - в качестве механизма водородного разупорядочения).

В работе (Allan et al., 2007) проводились эксперименты по изменению объема образцов калисинита под давлением при комнатной температуре (рис. 10-19 и 10-20).



Рис. 10-19. Изменение удельного объема ($\Delta V/V = 4$ %) в калисинаите при давлении 3.2 GPa (Allan et al., 2007).



Рис. 10-20. Изменение пространственной структуры калисинита: зеленые шары – К, белые – С, красные – О, маленькие темные – водород. (Allan et al., 2007).

Т.о. показано, что к настоящему времени разработана теория симметризации минералов, обладающих водородными связями. Теория подтверждена многочисленными экспериментами. Эффект получен на природных образцах при комнатных температурах и давлениях, характерных для мантии Земли. Это открывает возможность изучения эффектов туннелирования и квантовой запутанности на реальных средах, характерных для сейсмоактивных регионов и используемых в экспериментах с акустической эмиссии на образцах под давлением. В принципе, для большей убедительности следует выяснить, связана ли сейсмическая активность с присутствием водорода.

10. 6. Сейсмическая активность и водород.

В работах (Sugisaki, 1984/1985; Кузьмин и др. 2004) измерялся химический состав пузырьков из минеральных источников активных разломов Японии. Периоды возрастания водородной эмиссии совпадали с роем землетрясений в Ohno. Концентрация водорода менялась в интервале от 0,5 до 200 ppm, в то время как концентрации остальных газов, таких, как гелий, аргон, азот и метан менялись не значительно. Водород обычно появляется в минеральных источниках накануне землетрясения, что может использоваться для прогноза землетрясений (рис. 10-21).



Рис. 10-21. Сопоставление колебаний сейсмоакустической эмиссии с изменением концентрации растворенного водорода в потоке термальной воды во время и после землетрясения 18.12.2002 г. (Кузьмин и др. 2004).

Снижение микротвердости и кристаллических констант некоторых таких горных пород как кальцит, доломит и др., наблюдается после непродолжительного проникающего воздействия водородом при низком давлении (Su, et al., 1992). Это означает, что диффузия водорода может вызывать падение или ослабление их прочности. Генерируемый под землей или накопленный во время ее образования водород при вертикальном его миграции вдоль разломов вызывает разупрочнение породы, что делает возможным её разрушение в условиях пониженного тектонического напряжения.

Генерация водорода при мокром измельчении кварцевого порошка и ее зависимость от pH и ионной силы жидкой среды (Kameda et al., 2003; Saruwatari et al., 2004). Была исследована генерация водорода при измельчении кварцевого порошка в жидкой среде при контролировании ее pH и ионной силы. Влияние ионной силы на генерацию водорода оказалось ничтожным, тогда как наблюдалось уменьшение генерации водорода в кислотной области pH>5.0. Обсуждается механизм этих механохимических реакций.

Авторы (Копничев, Соколова, 2008; Kasahara, et al., 2001; Giammanco et al. 2008) отмечают роль сжатой жидкой и газообразной фазы в генерации роя землетрясений в районе Peloritani Mts. (NE Sicily), когда 1000 землетрясений произошла в период 1994 – 2006. Аналогичные наблюдения проводились в Японии. Авторы отмечают, что эпицентры этих землетрясений приурочены термальным источникам с выбросами газов.

В (Chu, et al., 1996) изучались геоэлектрические сигналы во время землетрясений M 7.8 1976 Tangshan и M 7.2 1976 Songpan. Определялось поведение электропроводности внутри и вокруг области эпицентра этих событий. Авторы показывают, что в процессе подготовки землетрясений электропроводность заметно изменялась. Авторы рекомендуют наблюдать изменения на больших площадях, т.к. это эффективнее, чем наблюдения в конкретном объеме среды.

В начале этой главы мы предполагали, что акустическая эмиссия (АЭ) обязана исключительно раскрытию трещин. Однако это не совсем верное предположение. Так, например, в работе (Кузнецов Д.М., 2008) измерялась АЭ в тающем льду с использованием дефектоскопического акустически-эмиссионного комплекса A-Line32D. Авторами обнаружен эффект АЭ в тающем льду, причем по мере его таяния (см. рис. 11-22, на котором черная линия показывает момент, когда весь лед растаял) длительность сигналов АЭ возрастает, а мощность сигналов – падает. Авторы обнаружили наличие АЭ в талой воде (сигналы правее черной линии). По мере дальнейшего нагревания воды, - сигналы АЭ исчезают.



Рис. 10- 22. Акустическая эмиссия, регистрируемая при таянии льда (Кузнецов Д.М., 2008).

Последний факт – наиболее примечателен, он показывает, что АЭ обязана своим происхождением не только хрупкому разрушению, а и другим различным физикохимическим процессам. Известно, что лед от воды отличается количеством упорядоченных водородных связей – других отличий нет. Количество водородных связей (BC) уменьшается по мере плавления льда и нагрева воды. В талой воде BC меньше чем во льду, но больше, чем в обычной воде. Есть все основания полагать, что АЭ в этом эксперименте связана с разрушением BC. Генерация АЭ происходит не только при таянии льда, но и при его росте (Смирнов, 2008). Упомянем так же, что и при кристаллизации воды, и росте льда, а так же при его разрушении, - наблюдаются электромагнитные импульсы, схожие по форме с импульсами АЭ (Шибков и др., 2000; Бери и др., 1986). Всё это говорит о том, что образование и разрушение BC в образцах горной породы может быть причиной акустической и электромагнитной эмиссии, регистрируемой в экспериментах и наблюдениях.

10. 7. Акустическое сверхизлучение и образование ударной волны – как редукция волновой функции.

Вернемся к рис. 10-10 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 (BC), то они с течением времени постоянно образуются и

разрушаются. При разрушении BC – испускаются акустические импульсы, временная последовательность которых (N) - создаёт некий акустический фон $I \sim N$. Если N водородных связей оказываются кватново запутанными, т.е. протоны 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). Сигнал при этом возрастает и становится равным $I \sim N^2$.

Приведем один из примеров квантового запутывания фотонов. В эксперименте флуоресцентное излучение собиралось широкоапертурными линзами и направлялось в противоположные от источника стороны (Aspect, 2002). 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. 10-23), спадающего по экспоненте с постоянной времени 5 нс (время жизни промежуточного каскада).



Рис. 10-23. Число зарегистрированных пар фотонов как функция задержки между моментами регистрации двух фотонов. Плоский участок отвечает случайным совпадениям между некоррелированными фотонами, пик соответствует квантовой запутанности (Aspect, 2002).

Представим себе, что в литосфере на определенной глубине имеется некий тонкий слой, содержащий повышенную концентрацию водорода, мигрирующего к поверхности Земли от ядра. Водород участвует в образовании водородных связей в минералах литосферы. В выделенном слое возникает квантовое запутывание между протонами водородных связей. Одновременная перестройка (симметризация, тунеллирование и разрушение) водородных связей приводит к резкому увеличению плотности вещества в слое, что вызывает резкое изменение характеристик среды, что обычно связывается с образованием ударной волны, которая начнет распространяться вдоль по градиенту плотности - к земной поверхности. Внезапное разрушение одной водородной связи приводит к одновременному разрушению всех запутанных связей. Происходит «смерть» запутанности (редукция волновой функции). Этот процесс может сопровождаться выбросом протонов, которые превращаются тем или иным способом в молекулярный водород, который при этом создает дополнительное давление в области слоя. В результате, происходит скачек увеличения плотности и давления в тонком слое, что, по определению, является, собственно, ударной волной. Площадь поверхности слоя определяет размер очага землетрясения. Форма поверхности слоя определяет форму ударной волны и, соответственно, форму разломных диаграмм. Глубина слоя, его размер и концентрация в нем водорода определяют все измеряемые параметры землетрясения. Из лабораторных экспериментов известно (см. выше), что симметризация водородных связей в различных веществах, их содержащих, происходит при различных давлениях. Возможно, это является причиной того, что землетрясения в различных регионах Земли приурочены к различным глубинам. Прохождение ударной волны к поверхности Земли

вызывает в среде афтершоки. Причиной их образования являются, очевидно, дополнительное давление на среду, вызванное ударной волной и, возможно, ещё в большей степени, движением фронта свободного водорода вслед за волной. Сильные афтершоки, которые происходят очень быстро вслед за основным ударом, вероятно, объясняются этими двумя факторами.

В качестве иллюстрации того, что форма поверхности слоя определяет форму ударной волны и, соответственно, форму разломных диаграмм, приведем рис. 10-24, на котором показана схема землетрясения в Тонга и Самоа, произошедшее в сентябре 2009.



Рис. 10-24-а. Силовая 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. 10-24- б. Наша ударно-волновая интерпретация явления.

Это землетрясение (по некоторым оценкам это было почти одновременно два или три землетрясения) вызвало цунами высотой до 12 метров. Землетрясения происходили с небольшой задержкой и они "замаскировали" друг друга, чем поначалу поставили в тупик геофизиков, сообщают авторы статей в журнале Nature (Beavan et al., 2010; Lay et al, 2010). Данные GPS-наблюдений с островов Самоа показывали, что 29 сентября 2009 года на юго-западе Тихого океана произошло одно землетрясение магнитудой 8, которое и привело к возникновению цунами. Однако характеристики волны, зафиксированные глубоководными датчиками, не соответствовали типу и месту эпицентра землетрясения. Кроме того, почти все "афтершоки", повторные толчки, следующие за главным, происходили не там, где должны были. Обе группы авторов сходятся в том, что эти землетрясения относились к разным типам. Одно из них, так называемое **сбросовое** землетрясение, произошло при разломе Тихоокеанской литосферной плиты. Второе **взбросовое** - произошло в зоне субдукции, погружения Тихоокеанской плиты под малую плиту Тонга, часть Австралийской литосферной плиты. Магнитуду сбросового землетрясения ученые оценивают в 8-8,1, а взбросового - в 7,8-7,9. Однако группы расходятся во мнениях относительно того, какое из двух землетрясений случилось раньше и стало причиной другого.

В центре рис. а показано возможное положение литосферы вдоль профиля AA.В этой ситуации, согласно нашей модели, должны возникнуть две сферических ударных волны (рис. 10-24), одна из них привела к растяжению, другая – к сжатию.

10. 8. Физика явлений сопутствующих землетрясению в литосфере, атмосфере, ионосфере и магнитосфере.

В Главе 09, обсуждая перспективы и возможности прогнозирования землетрясений, мы ограничились примером прогноза с использованием т.н. VAN-метода и критикой развиваемого авторами подхода со стороны Р. Геллера. Мне представляется, что Геллер прав и говорить о прогнозе, как о реальной возможности предсказания этого явления: его магнитуду, место и время, - на сегодняшний день – не возможно. Более того, если физика землетрясения действительно базируется на МКЗ, то и прогноз его, в любом случае должен иметь вероятностный характер. Остается не ясным вопрос о физике явлений, сопутствующих землетрясению в литосфере, атмосфере, ионосфере и магнитосфере. Основанием к такой постановке вопроса является многочисленные публикации, посвященные взаимосвязи этих явлений. В такой ситуации имеет смысл выяснить, можно ли найти правдоподобное объяснение таким явлениям в контексте нашей ударноволновой модели, основанный на использовании принципов многочастичной квантовой запутанности. В пользу такого подхода говорит тот факт, что УВ возникает, по нашей модели, за счет реализации структурного фазового перехода в средах, в которых присутствуют водородные связи (ВС). В атмосфере присутствует водный аэрозоль, в котором находятся ВС. Остается не выясненным один момент: могут ли квантово запутываться водородные связи, которые присутствуют в веществах, находящихся в различных агрегатных состояниях? Ответа на этот вопрос найти в литературе не удалось, поэтому, нам не остается ничего другого, как принять аксиому, что такое взаимодействие – возможно.

Приведем несколько примеров квантового запутывания окружающей среды со средой источника генерации УВ, т.е. со средой очага землетрясения.

В литосфере. Акустическая эмиссия. Акустическая эмиссия регистрируется, например, в 100 км от гипоцентра землетрясения, который находится на глубине нескольких км. Если учесть, что коэффициенты поглощения звука от частоты акустической волны для пород различного литологического состава известны, например, коэффициент затухания сигнала частотой 10 кГц $\beta \approx 1$ м⁻¹, иначе, такой сигнал затухает в два раза на расстоянии в один метр. Акустический сигнал $f \approx 3-7$ кГц, регистрируемый аппаратурой, не может достигать приемника, если он возникает в районе гипоцентра землетрясения. Следовательно, источники этих сигналов располагаются достаточно близко от приемников. Возникает вопрос, каким образом эти источники связаны с генерацией самого землетрясения?

Аналогичный вопрос возникает при наблюдении инфразвука в момент афтершока. Что же генерирует неоднократно наблюдаемый на очень многих землетрясениях подземный гул? Ясно одно, что гул производится значительно выше, чем основной толчок землетрясения, т.к. скорость распространения гула не может быть выше скорости Р-волн. Общим для этих, казалось бы, совершенно различных наблюдений является то, что инфразвук опережает землетрясение. Возможно, что наблюдаемое опережение им сейсмического сигнала проявляется как «подземный гул», предшествующий удару. При изучении афтершоков Чуйского землетрясения, такой гул наблюдался нами неоднократно. Источник акустической эмиссии и сейсмического «гула» остается неизвестным. В дальнейшем попытаемся выяснить его природу. Это тем более важно, что на опережении сигнала акустической эмиссии перед ударом землетрясения строятся системы его прогноза.

Вполне возможно, что обнаруженный таинственный звук в океане, который считается одной из неразгаданных загадок, имеет отношение к обсуждаемому нами вопросу. Действительно, сотрудники Национального агентства по изучению океанических и атмосферных явлений США в 1997 впервые записали странный звук в Тихом океане. Он был таким громким, что его различили два микрофона, расположенные на расстоянии в три тысячи миль друг от друга. Звук имеет импульсную, прерывистую структуру, частота волн колеблется в диапазоне 0-30 Гц. Этот таинственный звук в океане американцы называют bloop (завывание, рев)

http://entertainment.howstuffworks.com/arts/literature/cthulhu2.htm

ОНЧ излучение. Электромагнитные колебания очень низкой частоты (ОНЧ) предшествующие землетрясению, аналогично предыдущей оценке, так же не могут быть испущены из очага 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 $\alpha = 560 \text{ M}^{-1}$. Изменение амплитуды гармоники частотой 1 кГц на расстоянии 1 см определяется как 0.37, а для частоты 10 кГц эта величина равна 3.7 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 (АЭ и ОНЧ) показывают, что источник сигналов находится вблизи приемника и, вместе с тем, - со всей очевидностью имеет связь с землетрясением. Причем, эта связь не может передаваться ни акустическим каналом, ни электромагнитным.

Гравиинерциальные эффекты. Предназначенная для прогноза землетрясения станция ATROPATENA разработана в НИИ прогнозирования и изучения землетрясений в Баку и там же установлена в 2005. Две другие аналогичные станции установлены в г. Йогьякарта (Индонезия) и г. Исламабад (Пакистан).



Рис. 10-25 слева. Схема конструкции ТД ДГВ – АТROPATENA. 1 – стеклянный корпус детектора; 2 – коромысла с малыми массами на концах; 3 – большие массы; 4 – пробная

масса, подвешенная на подпружиненном рычаге; 5 – лазерные излучатели; 6 – чувствительная оптическая матрица для горизонтальных сенсоров; 7 – чувствительная оптическая матрица для вертикального сенсора. Рис. 6 справа. Гравитограмма с 1 по 17 мая 2008 г. А, В, С, D, Е, К – зарегистрированные аномалии гравитационного поля; **1**, **2** – землетрясения в Японии (Хонсю) 0.7-0.5-2008 *M* 6.2 (время - 16:02:01) и *M* 6.8 (время – 16:45:20); **3**; **4**; **5**; **6** – землетрясения в Китае (Сичуань) 12.05.2008 *M* 8 (время 06:28:00); *M* 6.3 (время 06:43:14); 13.05.2008 *M* 5.9 (время 07:07:08); 17.05.2008 *M* 6.0 (время17:08:25).

Прибор «Торсионный детектор длиннопериодных гравитационных вариаций (ТД ДГВ) ATROPATENA» представляет собой замкнутую и изолированную от внешней среды систему сенсоров, использующих физический принцип «Весов Кавендиша», в которых подвешены на нитях вместо одного – два коромысла с малыми массами, размещенными на концах двух коромысел, на равном удалении от них размещены большие массы. Схема конструкции прибора и результаты наблюдений 6-ти землетрясений приведены на рис. 10-25.

Явления в атмосфере. Свечение. Свечение неба накануне сильного землетрясения - известный факт. Приведем несколько примеров. В канун землетрясения 1855 года в Эдо (M = 6,9) в море вышла группа из 19 человек. Незадолго до первого толчка люди вдруг заметили свечение неба на северо-востоке. Оно было таким ярким, что не составляло труда отчетливо рассмотреть цветные узоры на одежде. Вскоре после свечения из-под воды послышался страшный рев и тут же яркое пламя, сопровождаемое разными звуками, охватило все небо. В течение нескольких ночей перед наиболее сильным толчком землетрясения 1703 года (M = 8.2) в Гэнроку (Япония) очевидцы наблюдали свечение воздуха. Землетрясение 1927 года в Крыму примечательно световыми эффектами в виде огненных столбов, поднявшихся над морем. Напротив мыса Лукулл эти столбы вознеслись на высоту около 500 м. То же было во время ашхабадской трагедии 5 октября 1948 года (M = 7,6). Перед ташкентским землетрясением 26 апреля 1966 года (M = 5), по данным некоторых жителей, все небо над эпицентром также светилось. Зарево белесовато-розового цвета, напоминающая рассеянный свет молний, наблюдалось над городом за несколько часов до толчка.

Совсем недавно (04.09.2010) «светящееся (рис. 10-26) землетрясение (M = 7.1) произошло в Новой Зеландии, в 40 км от г. Christchurch (Duncan, 2011).



Рис. 10-26. Свечение неба незадолго до сильного (M = 7.1) землетрясения в Новой Зеландии (Duncan, 2011).

Известны также случаи свечения моря. Эти случаи наблюдатели обычно связывают с цунами, что вполне естественно, т.к. главная опасность землетрясения на море – цунами. Попытки найти разумное объяснение этим явлениям - автору не известны.

Атмосферное электричество. В разделе 20. 8. «Вариации Е при изменении параметров геофизической среды», приведен рисунок 20-26, показывающий вариацию электрического поля *Ez* во время землетрясения на Суматре 26.12.2004 (M = 8.3). Датчик АЭП был установлен на сейсмостанции Uper Tiber Valley (Тоскания, Италия). Он зарегистрировал заметные изменения вертикальной компоненты поля перед, во время и после крупнейшего землетрясения на Суматре. Эти данные, насколько известно, не были подтверждены в других пунктах наблюдения АЭП. В частности, на Камчатской обсерватории Паратунка, в этот день были условия «хорошей погоды», однако подобного явления (рис. 20-26, справа) - зарегистрировано не было. Возникает резонный вопрос: насколько реально это измерение и какова может быть природа явления, если на значительно более близкой обсерватории, на Камчатке – такого сигнала не было. Хотя, на той же обсерватории неоднократно регистрировались изменения *Ez* перед местными землетрясениями.

Возмущения в ионосфере. Анализ накопленной информации по связи ионосферы с предстоящим землетрясением позволил обнаружить предвестников землетрясений во временных вариациях ионосферных параметров. Было найдено, что за несколько дней перед землетрясением наблюдаются определенные эффекты в суточном ходе foF2, в частности, заметное повышение или понижение критических частот относительно медианы. Аналогичный эффект был обнаружен и параметрах слоя *E*s, который заключался в увеличении *foE*s за несколько дней перед землетрясением.

Наряду с выявлением общих закономерностей, имеющих место во временном ходе ионосферных параметров, как перед землетрясением, так и после него, происходил поиск возможных физических механизмов, которые могли вызывать такие эффекты. На основе этих исследований был сделан вывод о том, что перед началом землетрясения и во время сейсмического процесса происходит усиление квазистатического электрического поля, связанного с изменением структуры земной коры. Это электрическое поле проникает на высоты ионосферы и может оказывать влияние на вариации электронной концентрации в Е и F-областях ионосферы.

Сейсмомагнитосферные эффекты и частицы высокой энергии. В работе (Гальперин и др., 1992) рассмотрен случай, когда над эпицентральной зоной землетрясения, за несколько часов до главного удара, одновременно пролетали два спутника «Ореол-3» и «ИКБ-1300». Спутники зарегистрировали высыпание высокоэнергичных (> 100 кэВ) электронов и протонов на орбите L = 1.25. Одновременно оба спутника регистрировали КНЧ и ОНЧ шумы. Источник этих шумов соответствовал гипоцентру землетрясения, а сами шумы расходились виде конуса, с вершиной у поверхности земли. Явления, происходящие в магнитосфере и возникающие под воздействием готовящегося землетрясения, получили название сейсмомагнитосферные эффекты и, соответственно, сейсмомагнитосферные шумы (СМШ). Интенсивность СМШ возрастает по мере приближения основного толчка и, в отличие от других методов, продолжается некоторое время после землетрясения. Принято считать, что причиной СМШ являются захваченные магнитным полем заряженные частицы, а они сами – продукт высыпания из радиационного пояса, как это отмечено в районе Бразильской магнитной аномалии. «Была некоторая корреляция между темпом счета частиц и среднесуточной обнаружена глобальной сейсмической активностью, определяемой суммарным числом землетрясений по всему земному шару.

Вывод. Анализ явлений, предшествующих и сопутствующих землетрясению показывает, что накануне землетрясения в литосфере, атмосфере, ионосфере и магнитосфере происходят события, которые, очевидно, имеют непосредственную с ним связь. 3a несколько часов, или даже дней, - до основного удара, предшествующие ему события (явления) прекращаются. Это относится в большей мере с таким малоинерционным явлениям как: акустическая эмиссия, ОНЧ-излучение, АЭП, явления, связанные с изменениями силы тяжести среды, и т.п. Очевидно, что все эти явления происходят в непосредственной окрестности измерительного прибора. Сигналы, если бы они производились в очаге землетрясения в силу их особенностей и особенностей среды распространения, - не смогли бы достигнуть регистрирующего их прибора. Следует отметить, что приборы, регистрирующие изменения геофизической среды перед землетрясением, располагаются подчас на огромных (тысячи км) расстояниях от эпицентра землетрясения. Часто бывает так, что прибор, регистрирующий эффект, установленный ближе к землетрясению, чем другой, - его не обнаруживает. Несоответствие друг другу отмечаемых нами фактов, а так же невозможность найти им объяснение в рамках общепринятых представлений по физике землетрясения - является принципиальным моментом. Разрешение известных парадоксов в физике Земли в рамках квантовой механики, на наш взгляд, может приблизить нас к пониманию природы самого явления землетрясения и явлений, имеющих непосредственную с ним взаимосвязь.



Рис. 10-27 Соотношение: плотность различных горных пород – отношение сейсмических скоростей (Lowry, Pérez-Gussinyé; 2011). Зеленая линия – лабораторные эксперименты, серая – измерения в полевых условиях.

Нам остается выяснить главный вопрос: существует ли в сейсмически активных районах горные породы, имеющие в своем составе водородные связи. Ответ на этот принципиальный вопрос можно найти в журнале Nature (Lowry, Pérez-Gussinyé; 2011), который был выпущен накануне сильнейшего землетрясения в Японии в марте 2011. Американские геофизики Лоури и его коллеги изучили температуру и гравитационные характеристики почв вдоль западной границы США - сейсмически активного горного региона Кордильер. Передвижная сейсмическая лаборатория. которой они воспользовались, позволила создать детальную карту геологических свойств земной коры в этом регионе. Ученые обнаружили, что отложения кристаллического кварца всегда сопровождают горные гряды или линии разломов на территории Калифорнии, Айдахо, Невады и Юты. Они показали, что подземные залежи кварца по всему миру могут

являться <u>определяющим фактором в возникновении землетрясений</u>, формировании горного рельефа и других тектонических процессах (рис. 10-27).

Геофизики предполагают, что залежи кварца соответствуют участкам хрупкой земной коры, где зарождаются геологическое события - землетрясения или извержение вулканов. Хрупкость «кварцевой» земной коры объясняется тем, что она содержит заметное количество воды, которая испаряется при нагревании верхним слоем мантии. Порода становится менее прочной, ее пласты двигаются, и происходит сейсмическое событие. Лоури назвал этот процесс «циклом вязкости».

С другой стороны известно, что поверхность кварца всегда несет на себе гидроксильный покров. Даже свежее образованные поверхности немедленно присоединяют гидроксильные группы из влаги воздуха. Поверхность кварца проявляет слабые кислотные свойства. Гидроксильный покров кварца легко образует водородные связи, прежде всего с водой. В результате поверхность кварца и кварцевых материалов обводняется. Гидрофильность кварцевого песка играет исключительную роль в структурообразовании полимербетонов и понимании физико-химических явлений в зоне контакта фаз. Наличие водной пленки на поверхности кварцевых частиц ингибирует отвердение связующего в пограничных слоях, т. е. ослабляет структуру в самых ответственных участках. Гидрофильность зерен кварца в конгломерате — полимербетоне создает благоприятные условия для диффузии воды и полярных веществ. (Свойства составляющих полимербетона и основы технологии

http://www.jocelyngourvennec.com/2008/04/22/svoystva_sostavlyayushchih_polimerbetona_i_o_snovi_tehnologii.html)

Сопоставление этих фактов открывает перспективу теоретической разработки ударно-волновой модели землетрясения основанной на использовании квантовых свойств геологической среды.

Литература

Аки К., Ричардс П. Количественная сейсмология: Теория и методы. М.: Мир. 1983. 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.

Гальперин Ю.И., Гладышев В.А., Джорджио Н.В. Ларкина В.И., Могилевский М.М. Высыпание энергичных заряженных частиц в магнитосфере над эпицентром готовящегося землетрясения // Косм. Исследования. 1992. Т. 30. Вып. 1. С. 89-106.

Гвоздев А.А., Кузнецов В.В. Откольные явления в грунтах, наблюдаемые при сейсморазведке. Изв. АН СССР. Физика Земли. 1967. N. 5. C. 21-27.

Геодаков А.Р., Овсюченко А.Н., Платонова С.Г и др. Материалы предварительного изучения сильного землетрясения 2003 г. на Горном Алтае. Электронный научно-

информационный журнал «Вестник отделения наук о Земле РАН» № 1 (21) 2003, М.:

ОИФЗ РАН, 2003. URL: http://www.scgis.ru/ruaaian/cp1251/h_dgggms/1-2003/screp-8.pdf

Гольдин С.В., Кучай О.А. Сейсмотектонические деформации в окрестности сильных землетрясений Алтая // Физ. мезомех. – 2008.-Т. 11.- № 2.-С. 5-13.

Жуков А.И. Применение метода характеристик к численному решению одномерных задач газовой динамики // Труды мат. инст. им. Стеклова, 1960, Т. 58. 150 с.

Журков С.Н., Петров В.А. О физических основах температурно-временной зависимости прочности твердых тел. ДАН. 1978. Т. 239. № 6. С. 1316-1319.

Журков С.Н., Куксенко В. С., Петров В.А. и др. Концентрационный критерий объемного разрушения твердых тел. Физические процессы в очагах землетрясений: Сб. науч. тр. М.: Наука, 1980. С. 78-85.

Забабахин Е.И. Некоторые вопросы газодинамики взрыва. Снежинск: РФЯЦ-ВНИИТФ. 1997.

Заславский Г.М., Сагдеев Р.З. Введение в нелинейную физику. М.: Наука. 1988. 368 с.

Зельдович Я.Б., Райзер Ю.П. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. 1966. М.: Наука. 686 с.

Копничев Ю.Ф., Соколова И.Н. Характеристики сейсмичности и поля поглощения S-волн в районе очага Суматринского землетрясения 26 декабря 2004 г. ДАН 2008. Т. 422. № 5. С. 672-676.

Крылов С.В., Мишенькин Б.П., Мишенькина З.Р. и др. Детальные сейсмические исследования литосферы на Р- и S-волнах. Новосибирск: Наука. 1993. 198 с.

Кузнецов В.В. Ударно-волновая модель очага землетрясения. 1990. - Новосибирск. Препринт ИГиГ, № 8, -18 с.

Кузнецов В.В. Физика земных катастрофических явлений. 1992.- Новосибирск: Наука,-96с.

Кузнецов В.В. Модель самоорганизации ансамбля излучающих звук трещин. ПМТФ. 2001-а. Т. 42. № 4. С. 184-189.

Кузнецов В.В. Ударно-волновая модель очага землетрясения. Науки о Земле:

Современные проблемы сейсмологии. - М.: Вузовская книга, 2001-б. С. 47-62.

Кузнецов В.В. Введение в физику горячей Земли. - Петропавловск-Камчатский. КамГУ, 2008. - 367 с.

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.

Купцов А.В. Особенности высокочастотной геоакустической эмиссии на заключительной стадии подготовки землетрясения. Кандидатская диссертация. ИКИР. 2006.

Кусов А.А. Фононная модель разрушения нагруженной атомной цепочки. ФТТ. 1979. Т. 21. № 10. С. 3095-3099.

Смирнов А.Н. Генерация акустических колебаний в химических реакциях и физикохимических процессах. 2008. <u>http://www.chem.msu.su/rus/jvho/2001-1/29.pdf</u>

Смирнов С.Б. Ударно-волновая концепция сейсмического разрушения сооружений. Энергетическое строительство. 1992. № 9. С. 70-73.

Станюкович К.П. Неустановившиеся движения сплошной среды. - М.: Наука. 1971. - 854 с Старр В.П. Физика явлений с отрицательной вязкостью. М.: Мир. 1971. 130 с. Хакен Г. Синергетика. М.: Мир. 1980. 404 с.

Шибков А.А., Желтов М.А., Королев А.А. Собственное электромагнитное излучение растущего льда. Природа. 2000. № 9.

http://vivovoco.rsl.ru/VV/JOURNAL/NATURE/09_00/RADIOICE.HTM

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 Anderson J.G., Yu G. Predictability of strong motion from the Northridge, California Earthquake. Northridge Earthquake. January 17, 1994. Bulletin Seismological Society of America (BSSA). 1996. V. 86. N. 1B. P. 100 – 114.

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. Beavan J., Wang X., Holden C., et al. Near-simultaneous great earthquakes at Tongan megathrust and outer rise in September 2009 // Nature 2010. V. 466. P. 959-963.

Bennett C. H., et al., Teleporting an Unknown Quantum State via Dual Classical and Einstein-Podolsky-Rosen Channels // Phys. Rev. Lett. 1993, V.70, P.1895.

Schrödinger E. Die gegenwärtige Situation in der Quantenmechanik // Naturwissenschaften, 1935, **48**, 807, **49**, 823, **50**, 844

Bardet J.P., Davis C. Engineering observations on ground motions at the Van Norman Complex after the 1994 Northridge Earthquake. Northridge Earthquake January 17, 1994. Bull. Seism. Soc. Am. 1996. V. 86. N. 1B. P. 333-349.

Dicke R.H. Coherence in spontaneous radiation processes. Phys. Rev. 1954. V.93. N. 1. P. 99-110.

Duncan P. Earthquake Lights, or 'Lightning', is a well documented phenomena // http://www.nzherald.co.nz/christchurch-

earthquake/news/article.cfm?c_id=1502981&objectid=10673092

Fellaux F., Cousson A., Gutmann M.J. Macroscopic quantum entanglement and "super-rigidity" of protons in the KHCO₃ crystal from 30 to 300 K // J. Phys.: Condens. Matter. 2006. V. 18. P. 3229-3249.

Giammanco S., Palano M., Scaltrito A. et al. Possible role of fluid overpressure in the generation of earthquake swarms in active tectonic areas: The case of the Peloritani Mts. (Sicily, Italy). Journal of Volcanology and Geothermal Research, 2008, V.178, No 4, P. 795-806.

Harp E.L., Jibson R.W. Landslides triggered by the 1994 Northridge, California, earthquake. BSSA. 1996. V.86. N.1B. P. S 319-S 332.

Ishido T., Nishizawa O. Effect of zeta potential on microcrack growth in rock under relatively low uniaxial compression J. Geophys. Res. 1984. V. 89, N B6. P. 4153-4159.

Kameda J., Saruwatari K., Tanaka H. Hydrogen Generation by Wet Grinding of Quartz Powders and its Dependence on the pH and Ionic Strength of Liquid Media // Bulletin of the Chemical Society of Japan, 2003, V. 76. No.11. P. 2153-2154.

Kasahara J., Toriumi M., Kawamura K. et al., Role of Water on Earthquake Generation. Part 1. Influence of Water on Earthquake Generation along Subduction Zones // Bulletin of the Earthquake Research Institute, University of Tokyo, 2001, V.76; No. 3, P.291-303.

Khalilov E. N. About possibility of creation of international global system of forecasting the earthquakes <u>Baku-Innsbruck: ICSD/IAS</u>, 2007. P. 51–69. <u>ISBN 978-9952-81-15-2-0</u>

Lay T., Ammon C.J., Kanamori H. et al. The 2009 Samoa-Tonga great earthquake triggered doublet // Nature. 2010 V. 466. P. 964-970.

Lowry A.R., Pérez-Gussinyé M. The role of crustal quartz in controlling Cordilleran deformation // Nature, 2011, V.471, P.353–357.

Moehring D.L, Maunz P., Olmschenk S., et al. Entanglement of Single Atom Quantum Bits at a Distance. Nature, 2007, V. 449, P. 41.

Nagai T., Kagi H., Yamanaka T. The first observation of a pressure-induced transition and compression behavior of kalicinite (KHCO₃) at room temperature // Solid State Comm. 2002. V. 123. P. 371-374.

Northridge Earthquake January 17, 1994. Bulletin Seismological Society of America 1996. V. 86. N.1. Part B.

Pan J.-W., Gasparoni S, Ursin R, et al., Experimental test of quantum nonlocality in three-photon Greenberger-Horne-Zeilinger entanglement. Nature. 2000. V. 403. P. 515–519.

Saruwatari K., Kameda J., Tanaka, H. Generation of hydrogen ions and hydrogen gas in quartz– water crushing experiments: an example of chemical processes in active faults // Physics and Chemistry of Minerals, 2004, V. 31, No 3. P. 176-182.

Schweizer K.S., Stilling F. High pressure phase transitios and hydrogen-bond symmetry in ice polymorphs // J. Chem. Phys. 1984. V. 80 (3), P.1230-1240.

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

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.

Su T., Taylor P.C., Ganguly G., Carlson D. E. Direct role of hydrogen in Staebler-Wronski effect in hydrogenated amorphous silicon. Phys. Rev. Lett. 2002. V, 89. 015502.

Sugimura E., Iitaka T., Hirose K., et al. Compression of H₂O ice to 126 GPa and implications for hydrogen-bond symmetrization: Synchrotron x-ray diffraction measurements and density-functional calculations. Phys. Rev. 2008. V. B77. P. 214103.

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.

Ursin **R**., Jennewein T., Aspelmeyer M., et al., Quantum Teleportation across the Danube, Nature 430, 849 (2004).

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.

Wiens D.A., McGuire J.J., Shore P.JU., et al. A deep earthquake aftershock sequence and implications for the repture mechanism of deep earthquakes. Nature. 1994. V. 372. P. 540-543. Zeng Y., Anderson J.G. A composite source model of the 1994 Northridge Earthquake using genetic algorithms. Bull. Seism. Soc. Am. 1996. V. 86. N.1, Part B. P. 71-83