

УДК 550.3

О ВОЗМОЖНОСТИ ВОЗНИКНОВЕНИЯ УДАРНОЙ ВОЛНЫ
В РЕЗУЛЬТАТЕ КВАНТОВЫХ ЭФФЕКТОВ
НА ПРОТОНАХ ВОДОРОДНЫХ СВЯЗЕЙ В ГОРНЫХ ПОРОДАХ

В. В. Кузнецов

(*пос. Паратунка, Камчатка, ikir@academ.org*)

Введение. Физика землетрясения, несмотря на многочисленные исследования этого явления, до сих пор остается не ясной. В чем же причина того, что 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 г. после разрушительного землетрясения в Сан-Франциско?

Дело, по-видимому, заключается в том, что физика землетрясения всё это время рассматривалась только в рамках механики сплошной среды и теории упругости. Сильные движения грунта, сопутствующие землетрясению, объясняются обычно присутствием сейсмотектонических деформаций, хотя из всех опубликованных работ не ясно, каким образом можно с этих позиций объяснить весь комплекс явлений, сопровождающих сильное землетрясение, а именно: разрывы поверхности, их раскрытие и закрытие; отколы; волны на поверхности, когда среда ведет себя как вязкая жидкость; разуплотнение грунта; возникновение водяных фонтанов, грифонов и пр.

Все эти явления находят логичное объяснение, если предположить, что само землетрясение представляет собой ударную волну (УВ) [1]. В этом случае, очевидно, механизм землетрясения можно условно разделить на три части:

- 1) механизм образования ударной волны в литосфере на глубине гипоцентра;
- 2) прохождение волны от гипоцентра до поверхности Земли;
- 3) выход УВ на поверхность Земли, сопровождающийся всем комплексом явлений, о которых идет речь выше.

Идея ударно-волновой модели землетрясения была высказана автором настоящей работы около 20 лет тому назад. Она базировалась, во-первых, на характере разрушений земной поверхности и зданий, которые присущи только ударным волнам, и, во-вторых, на результатах экспериментов с образцами горных пород на прессе и наблюдений акустической эмиссии перед землетрясением (рис. 1). В экспериментах на прессе наблюдалось усиление акустического фона N до величины $\sim N^2$. Аналогичный эффект усиления фона в оптике, предложенный Дикке еще в 1934 г., получил название «сверхизлучение» [2]. Далее усиление акустического фона (рис. 1, *a*) будем называть акустическим сверхизлучением. При наблюдении геоакустических сигналов на Камчатке (и в других сейсмически активных регионах) обнаружена похожая картина: перед землетрясением происходило усиление акустического фона, который, однако, незадолго до события исчезал.

Акустическое сверхизлучение. Ранее автором была предложена модель акустического сверхизлучения, основанная на предположении о лавинообразном процессе взаимодействия между раскрывающимися микротрещинами и испускаемыми (в результате

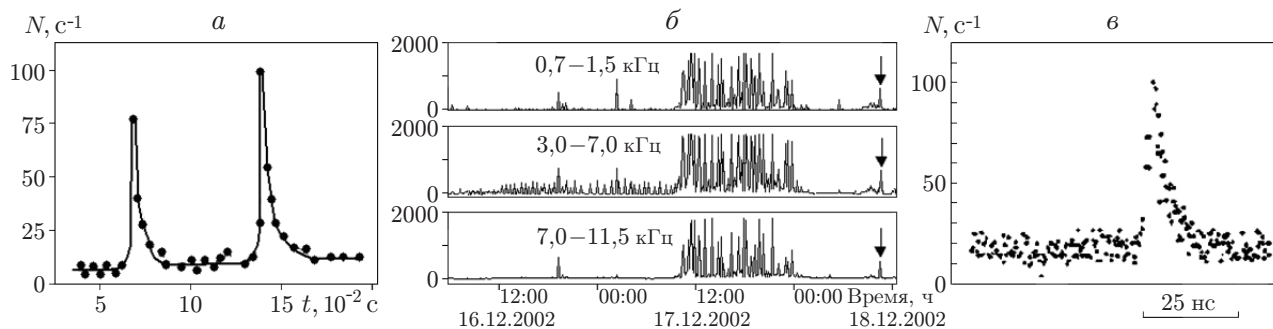


Рис. 1. Скорость образования трещин в диабазе при действии на образец постоянного одноосного сжимающего напряжения [3] (*a*). Геоакустические сигналы (ИКИР), зарегистрированные перед землетрясением 18.12.2002 ($K = 12,1$) на Камчатке (*б*). Число зарегистрированных пар фотонов как функция задержки между моментами регистрации двух фотонов (*в*): *б* — время события отмечено стрелкой [4], *в* — плоский участок отвечает случайным совпадениям между некоррелированными фотонами, пик соответствует квантовой запутанности [5]

их раскрытия) акустическими волнами с еще не раскрывшимися микротрещинами. Модель эквивалентна двухуровневой системе Дикке, используемой в лазере. Предложенная нами модель позволила объяснить акустическое сверхизлучение (см. рис. 1), генерируемое образцом горной породы под давлением, но физика взаимодействия волна — трещина осталась недостаточно ясной.

В модели акустического излучения предполагалось, 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. Модель взаимодействия дилатонов может объяснить возрастание фона (N) как $\sim N^2$ из-за акустического взаимодействия каждого дилатона со всеми остальными.

Формирование ударной волны. В рамках нашей ударно-волновой модели ударная волна является результатом когерентного взаимодействия акустических волн раскрывающихся трещин. Когерентность должна быть как пространственной, так и временной (типа задачи Фибоначчи). Пока просматриваются два возможных подхода: один основан на использовании метода пересекающихся характеристик [6] (рис. 2, *a*), другой — на использовании сложения солитонов (бризеров) в большой акустический солитон, который способен «опрокинуться» (рис. 2, *б*) с генерацией ударной волны [7]. Возможно, второй подход является приемлемым решением.

Неадекватность акустического подхода. Решение второй и третьей частей постулированного в нашей модели механизма землетрясения находится в рамках теории выхода УВ на поверхность твердого тела и транспортировки ее по среде [8, 9]. Попытки автора решить проблему возникновения УВ за счет коллективных акустических процессов взаимодействия типа волна — трещина особым успехом не увенчались. Главное препятствие в решении проблемы генерации УВ состоит в том, что УВ, по модели, появлялась в результате взаимодействия акустических волн, обладающих конечной скоростью, не более 10 км/с. Землетрясение же возникает одновременно на масштабе до 1000 км за характерное время, меньшее 1 с. Как синхронизовать объем очага землетрясения такого размера за столь малые времена — проблема, не разрешимая в акустике. Для этого скорость распространения сигнала должна быть не меньше 1000 км/с, что в сто раз больше скорости звука. Следовательно, необходимо найти другой (не акустический) механизм приведения огром-

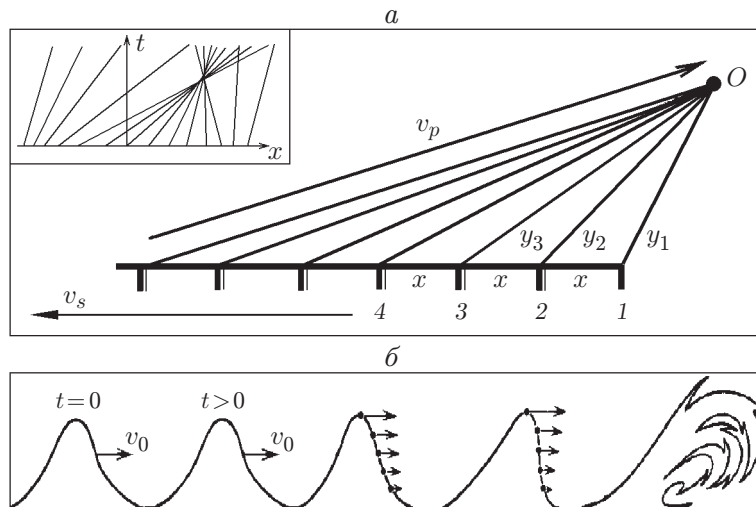


Рис. 2. Когерентное сложение акустических импульсов в точке O и метод пересекающихся характеристик [6] (а). Модель укручения и «опрокидывания» солитона [7] (б)

ных объемов среды к когерентности с огромной скоростью. Электромагнитный сигнал для этой задачи не подходит, так как высокочастотный сигнал не способен распространяться в проводящей среде литосферы. Остается рассмотреть возможность использования подходов, развитых в квантовой механике и экспериментально реализованных в последнее время, например, в задачах квантовой запутанности и телепортации.

Новый подход. В квантовой физике хорошо известна идея квантовой запутанности, основанная на использовании принципа неопределенности Гейзенберга: когда среда при ее запутанности (нелокальности) становится когерентной (кооперативной), она может быть описана 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, как можно использовать эту область физики, которая в течение последних нескольких лет активно развивается как в плане постановки экспериментов, так и теоретически. Однако прежде решим принципиальную проблему о том, можно ли генерировать УВ без скоростных ударов, детонации, взрывов и т. п. Кажалось бы — да, если найдется способ создания разрыва термодинамических параметров среды, в частности — разрыва ее плотности.

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:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial f(\rho)}{\partial x} = 0,$$

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 $D = dx(t)/dt$ — скорость УВ, иначе записывается как $D = (\Delta\rho/\rho)(\Delta x/\Delta t)$ — наклон линии разрыва.

Предположим, что удалось резко увеличить плотность вещества, например, на 10 % ($\Delta\rho/\rho = 0,1$), причем увеличение происходило 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, а он эквивалентен прохождению 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 на глубине, характерной для возникновения землетрясений. Необходимо выяснить, имеются ли какие-нибудь данные в подкрепление такой идеи. Оказывается, такие данные имеются. Однако прежде следует сказать несколько слов о водородных связях и об обнаружении в них квантовых эффектов запутанности и телепортации при комнатных температурах и повышенных давлениях.

Водородная связь — особый вид связи, возникающий за счет того, что атом водорода, связанный с сильноэлектроотрицательным элементом (азотом, кислородом, фтором и др.), испытывает недостаток электронов и поэтому способен взаимодействовать с неподеленной парой электронов другого электроотрицательного атома этой же или другой молекулы. Водородная связь (ВС) — разновидность невалентного взаимодействия между атомом водорода Н, ковалентно связанным с атомом А группы А—Н молекулы RA—Н, и электроотрицательным атомом В другой молекулы. Наличие водородных связей и их кооперативные свойства, в частности, в воде приводят к тому, что свойства воды изменяются в зависимости от количества ВС. Так, например, во льду ВС много, их количество уменьшается по мере того, как лед тает. В талой воде ВС меньше (рис. 3), еще меньше их в нагретой воде и практически нет в воде кипящей. Если бы вода полностью лишилась возможности образовывать ВС, то превратилась бы в пар, конденсирующийся в жидкость при -100 °С. ВС присутствуют не только в воде, но и в литосфере, определяя ее особые свойства [10]. Энергия ВС меняется в широких пределах. Для оценки примем значение ≈ 3 кДж/г. Оценим количество ВС, необходимое для возникновения землетрясения, например такого, как Алтайское 2003 г. Магнитуа 7,5 эквивалентна энергии $E = 5 \cdot 10^{22}$ эрг = $5 \cdot 10^{12}$ кДж ~ 1 Мт (TNT). Площадь поверхности очага $S \approx 50 \cdot 10$ км² = $5 \cdot 10^{12}$ см². Отсюда плотность энергии ~ 1 кДж/см², или 0,1 кДж/см³, или 0,03 кДж/г, если учесть толщину фронта 10 см и плотность вещества 3 г/см³. Оказывается, что для обеспечения такого землетрясения

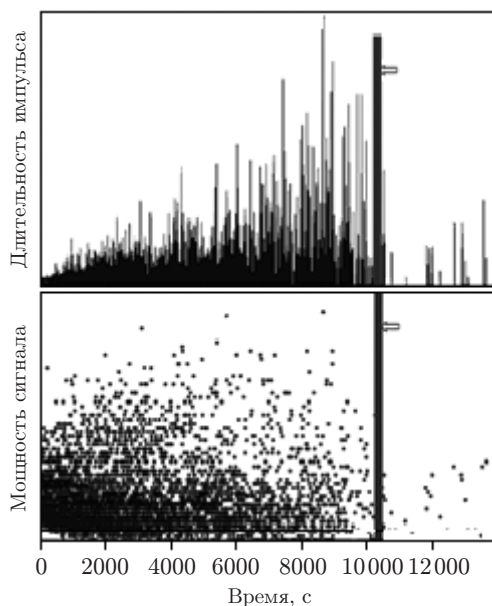


Рис. 3. Акустическая эмиссия, регистрируемая при таянии льда (слева от черты) и в талой воде (справа) [10] (эмиссия вызвана разрушением ВС во льду и талой воде)

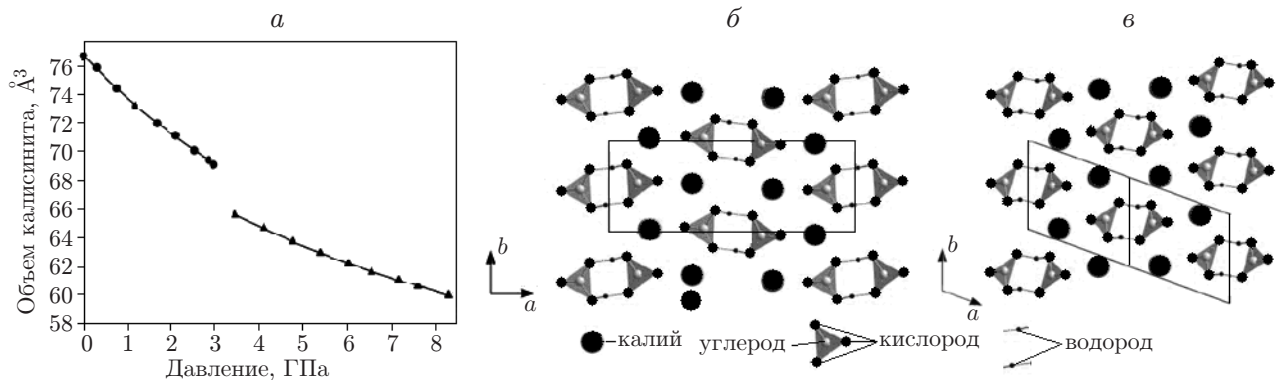


Рис. 4. Изменение удельного объема ($\Delta V/V = 4\%$) в кальсините при давлении 3,2 ГПа (а) и изменение пространственной структуры кальсинита [11] (б, б')

необходимой энергией достаточно иметь концентрацию ВС в веществе порядка 1 %.

Обратимся к экспериментам по сжатию кальсинита — это минерал гидрокарбоната калия (KHCO_3). Он давно изучается как объект, обладающий ВС, в которых проявляются свойства квантовой запутанности. Сжатие кальсинита приводит к резкой, одновременной по всему объему образца перестройке структуры ВС (рис. 4), что вызывает изменение его удельного объема (т. е. плотности). Аналогичные результаты получены и для других образцов горных пород, в составе которых могут находиться атомы водорода и кислорода (азота, фтора и др.). Как отмечалось авторами многих исследований, такие перестройки ВС происходят мгновенно в больших объемах; возможно, эта особенность и названа кооперативностью ВС.

Известно, что в магматических породах содержатся практически все химические элементы, в том числе и водород. Из нашей модели следует, что сейсмичность должна быть связана с наличием водорода в горной породе. Оказывается, это хорошо известный в практической сейсмологии факт. В качестве его подтверждения сошлемся на рис. 5.

Предположим, что регистрируемый в этой работе водород связан с образованием ВС. Здесь возможны два варианта: либо ВС образуются при прокачке породы водородом, либо водород выделяется при разрушении ВС. В принципе, возможно, что функционируют оба механизма одновременно.

Вернемся к рис. 1, а и предложим объяснение акустического сверхизлучения с использованием идеи квантового запутывания и нелокальности. Предположим, что если кристаллическая структура не имеет квантовой связанности между своими элементами, обладающими ВС, то с течением времени ВС постоянно образуются и разрушаются. При разрушении ВС испускаются акустические импульсы, временная последовательность которых (N) создает некий акустический фон $I \sim N$. Если N водородных связей оказываются квантово запутанными (по принципу: каждая со всеми), т. е. протоны связей становятся неразличимы между собой, и вся структура описывается единой волновой функцией, то разрыв одной из них ведет к одновременному разрыву всех N связей (редукция волновой функции). Акустический сигнал при этом возрастает и становится равным $I \sim N^2$. Структура вещества, содержащего ВС, при этом изменяется, в слое резко возрастает плотность, а интенсивный акустический фон создает дополнительное давление: формируются условия для возникновения УВ.

Приведем один из примеров квантового запутывания фотонов. В эксперименте флуоресцентное излучение собиралось широкоапертурными линзами и направлялось в противоположные от источника стороны [5]. Фотоны через интерференционные фильтры и

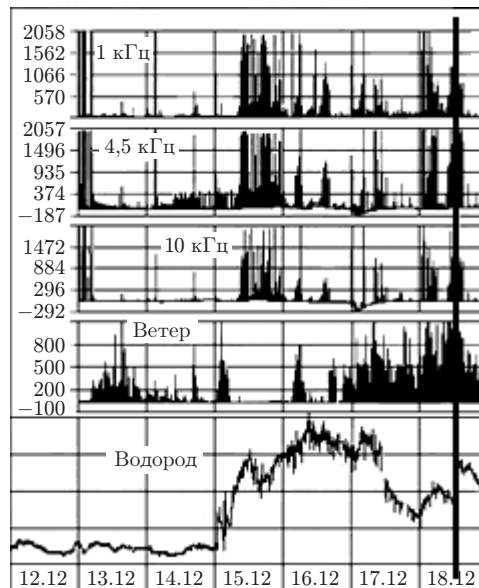


Рис. 5. Сопоставление колебаний сейсмоакустической эмиссии с изменением концентрации растворенного водорода в потоке термальной воды во время и после землетрясения 18.12.2002 на Камчатке (землетрясение обозначено вертикальной линией) [12]

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 (см. рис. 1, в, ср. с рис. 1, а), спадающего по экспоненте с постоянной времени 5 нс (время жизни промежуточного каскада).

Обсуждаемый нами материал дает основание полагать, что и эксперименты, и наблюдения акустической эмиссии, представленные на рис. 1, а, б, связаны не с образованием трещин, как предполагалось, а с эффектами квантовой запутанности ВС и редукцией волновой функции, следствием которой может быть образование УВ.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Кузнецов В. В.** Введение в физику горячей Земли. — Петропавловск-Камчатский: КамГУ, 2008.
2. **Dicke R. H.** Coherence in spontaneous radiation processes // *Phys. Rev.* — 1954. — V. 93, N 1. — P. 99–110.
3. **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.
4. **Купцов А. В.** Особенности высокочастотной геоакустической эмиссии на заключительной стадии подготовки землетрясения: дис. ... канд. физ.-техн. наук / ИКИР. — Петропавловск-Камчатский, 2006.
5. **Aspect A.** Bell's theorem: the naïve view of an experimentalist // *Quantum [Un] speakables — From Bell to Quantum Information / R. A. Bertlmann, A. Zeilinger (Eds).* — Springer, 2002.
6. **Жуков А. И.** Применение метода характеристик к численному решению одномерных задач газовой динамики // *Труды Мат. ин-та им. В. А. Стеклова.* — 1960. — Т. 58.

7. **Заславский Г. М., Сагдеев Р. З.** Введение в нелинейную физику. — М.: Наука, 1988.
8. **Зельдович Я. Б., Райзер Ю. П.** Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. — М.: Наука, 1966.
9. **Забабахин Е. И.** Некоторые вопросы газодинамики взрыва. — Снежинск: РФЯЦ-ВНИИТФ, 1997.
10. **Кузнецов Д. М., Смирнов А. Н., Сыроешкин А. В.** Акустическая эмиссия при фазовых превращениях в водной среде // Рос. хим. журн. — 2008. — Т. 52, № 1. — С. 114–121.
11. **Allan D. R., Marshall W. G., Pulham C. R.** The high-pressure crystal structure of potassium hydrogen carbonate (KHCO_3) // Amer. Mineralogist. — 2007. — V. 92. — P. 1018–1025.
12. **Кузьмин Ю. Д., Лупатов В. М., Купцов А. В.** Экспериментальные гидрогеохимические наблюдения на Верхнепаратунской гидротермальной системе (предварительные результаты) // Международный геотермальный семинар, 2004, Россия, Камчатка.