

ПРОЕКТ:

УДАРНО-ВОЛНОВАЯ МОДЕЛЬ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ

В.В.Кузнецов

Описана ударно-волновая модель и эксперименты подтверждающие идею возникновения ударной волны в литосфере. Предложены направления дальнейших исследований..

Образование ударной волны на разрыве характеристики среды

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

Запишем уравнение дивергентного вида:

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

с условием на линии разрыва:

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

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

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

Водородная связь

Водородная связь (Н-связь) - особый вид связи, возникающий за счет того, что атом водорода, связанный с сильно электроотрицательным элементом (азотом, кислородом, фтором и др.), испытывает недостаток электронов и поэтому способен взаимодействовать с неподеленной парой электронов другого электроотрицательного атома этой же или другой молекулы. Водородная связь - разновидность невалентного взаимодействия между атомом водорода Н, ковалентно связанным с атомом А группы А-Н молекулы RA-Н и электроотрицательным атомом В другой молекулы. Наличие водородных связей и их кооперативные свойства, в частности, в воде приводит к тому, что её свойства изменяются в зависимости от количества водородных связей. Так, например, во льду водородных связей много, их количество уменьшается по мере того, как лед тает. В талой воде водородных связей - меньше, ещё меньше их в нагретой воде и практически нет - в воде кипящей. Если бы вода полностью лишилась возможности образовывать водородные связи, то превратилась бы в пар, конденсирующийся в жидкость при 100 °С. Водородные связи присутствуют не только в воде, но и в литосфере, определяя её особые свойства. Природа водородной связи состоит в том, что электронная плотность на линии

H...O (N, F и т.п.) смещается к отрицательному атому. Это способствует сближению электронов отрицательных атомов соседних молекул. В результате расстояния O - O, O - N и т.п. становятся значительно меньше чем они были бы без атома H. Явление укорочения длины атомных связей двух молекул A и B: A - B (без водорода) и A - H...B (с присутствием атома водорода), иллюстрирует таблица.

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

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

О возможности образования ударной волны в литосфере.

Идея представить землетрясение как следствие выхода ударной волны (УВ) на поверхность Земли оформилась более 20 лет тому назад. Автора проекта в большей степени интересовали особенности образования сильных движений грунта, возникающих в момент выхода УВ на поверхность, возникновения в этот момент волны разгрузки (ВР) и взаимодействие УВ и ВР направленных в противоположные стороны и вызывающие собственно сильные движения: разрывы поверхности, разломы, колебания поверхности и пр. Прохождение УВ по литосфере и взаимодействие её с неоднородностями среды - приводят к расщеплению УВ и генерации объемных сейсмических волн. Особенностью УВ, отличающей её от сейсмических волн, является то, что она увлекает за собой среду, двигающуюся со скоростью – массовой скоростью – существенно меньшей, чем скорость УВ. Движение сплошной среды в момент землетрясения регистрируется за счет искажения сейсмических волн. Этот эффект ошибочно был принят за движение трещины. В УВ модели землетрясения оставался один не до конца выясненный вопрос: как и почему возникает УВ в сплошной среде? Первое решение состояло в синхронном лавинообразном раскрытии трещин и образовании при этом УВ. Оно, при ближайшем рассмотрении – не проходило. Второе решение базировалось на кооперативности водородных связей. Действительно, уже давно известно, что водородные связи (ВС) обладают таким уникальным (принципиально – квантовым) свойством как синхронное (кооперативное) разрушение ВС или их одновременный поворот на заданный угол. Это свойство присуще т.н. структурным фазовым переходам (СФП).

[СФП (конфигурационные фазовые переходы, полиморфные превращения) - фазовые переходы в кристаллических твёрдых телах, состоящие в перестройке структуры этих тел за счёт изменения взаимного расположения отдельных атомов, ионов или их групп и приводящие обычно к изменению типа симметрии кристалла. СФП могут происходить при изменении одного или нескольких термодинамических параметров - температуры T , давления p , концентрации компонент (в случае *сплава* или *твёрдого раствора*) и др. Наиболее изучены СФП. по температуре. Как правило, при понижении T до T_k происходят СФП из кристаллической структуры с более высокой симметрией в кристаллическую структуру с более низкой симметрией. При этом исходная и конечная кристаллическая модификации (фазы) могут резко отличаться по свойствам. СФП обычно сопровождаются изменением свойств твёрдого тела - упругих, электрических, магнитных и т. п. Если изменяется только точечная симметрия кристалла, то СФП называются собственными, если изменяется трансляционная симметрия,- несобственными. Последние

приводят к возникновению *сверхструктур*, как соизмеримых, так и несоизмеримых, а также *доменов* (ориентационных и трансляционных)].

При СПФ может происходить перестройка структуры, например, меняться тип кристаллической решетки. Этот процесс может приводить к резкому изменению плотности среды, т.е. изменению её термодинамических параметров pT и образованию ударной волны (в случае землетрясения).

Медленный СПФ

Если СПФ происходит недостаточно быстро, то и перестройка структуры будет происходить медленно и ударной волны не образуется. В этом случае возможны два варианта: в первом изменение давления передается от зоны, где произошел СПФ, к поверхности путем релаксации упруго-вязкой среды. На поверхности Земли при этом возникают медленные движения. Этот процесс известен. Он получил название «медленного землетрясения».

Возможен второй вариант. Среда, в которой извергаются вулканы может (предположительно) так перестроиться (за счет изменения структуры ВС), что изменяется температура её плавления. В этом случае температура плавления изменившейся за счет СПФ среды может оказаться ниже температуры окружения. Среда плавится, что приводит к образованию магматического очага вулкана.

Приведем поясняющий пример. Лед отличается от воды тем, что в его структуре ВС значительно больше, чем в воде. Представим себе, что нам удалось во льду, находящимся при температуре ниже нулевой, - каким-либо образом разрушить ВС. Разрушение ВС – это вынужденное плавление. В той части льда, где были разрушены ВС, может образоваться вода, несмотря на то, что температура его значительно ниже температуры плавления. Вполне возможно, что очаг вулкана образуется в литосфере именно таким способом. При таком подходе легко объясняется пространственное совпадение очагов вулканов и землетрясений.

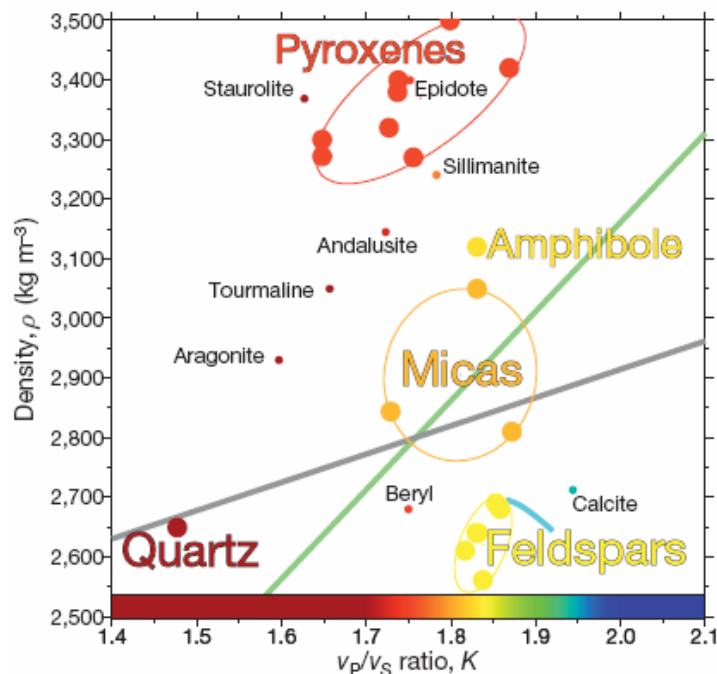


Рис. 1. Диаграмма: (ρ / K) , где ρ - плотность, $K = v_p/v_s$. Серая линия – натурные измерения, зеленая – лабораторные. В область, ограниченную этими линиями, попадает кварц [Lowry A. R., Pérez-Gussinyé M. The role of crystal quartz in controlling Cordilleran deformation // Nature.2011. V.471, P. 353–357].

Принципиальным моментом СПФ является то, что он реализуется на больших объемах и, что очень важно, - одновременно. Это принципиально важный момент для землетрясения. Принято считать, что землетрясение можно представить как точку. Именно в точку сходятся направление лучей приходящих на сейсмоприёмники сейсмических волн. Характерное время источника волн определяется с секундной точностью. С другой стороны, хорошо известно, что землетрясение – явление объемное, занимающее объем, называемый очагом. Размеры очага сильного землетрясения достигают тысячи км. Возникает естественный вопрос: как можно синхронизовать среду размером в 1000 км с секундной точностью? Этот вопрос можно попытаться решить с привлечением кооперативных свойств ВС.

Тогда возникает следующий вопрос: как быстро может происходить СФП, ведь для образования УВ необходимы очень маленькие времена? И вопрос последний: имеется ли в литосфере минерал, который обладает такими свойствами как: наличие ВС, способность к быстрому и кооперативному СФП и, наконец, такой минерал должен присутствовать в литосфере в огромных количествах?

Все эти вопросы прояснились лишь в последнее время. Главный для нашей модели результат был получен в результате исследования проведенного английскими учеными в Кордильерах и в лаборатории (рис. 1). Ученые обнаружили, что отложения кристаллического кварца всегда сопровождают горные гряды или линии разломов на территории Калифорнии, Айдахо, Невады и Юты. Чтобы подтвердить свои предположения, ученые сравнили локализацию залежей кварца с геологической картой этого региона. Совпадение оказалось «совершенно потрясающим».

Геофизики предполагают, что залежи кварца показывают участки хрупкой земной коры, где зарождается геологическое событие — землетрясение или извержение вулкана. Кроме того, залежи кварца могут отвечать и за движения континентов, известные как «дрейф материков», и за движения отдельных литосферных плит. Например, последнее сильное землетрясение в Японии, сдвинуло острова примерно на 2,4 метра ближе к США. 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».

Представления Лоури о пленках жидкости и их влиянии на образование землетрясения или вулкана представляются наивными. Ценность полученного результата состоит в том, что кварц действительно может быть тем материалом, в котором возникают такие явления как землетрясения и вулканы.

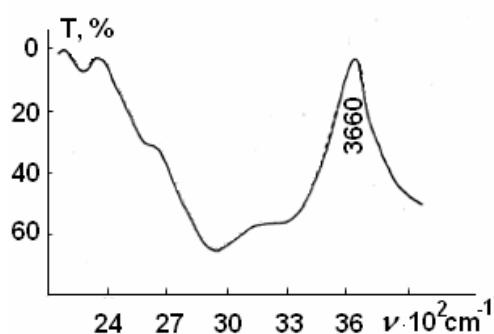


Рис. 2. ИК спектр кристаллического кварца КВ, толщина слоя 1 см [Вильщук В.А., Алексеев П.Д., Стенькин Ю.А. Стабильные центры с водородной связью в матрице кристаллического кварца // Вестник Омского университета, 1998, Вып. 1. С. 29-31].

Возникает вопрос, имеются ли в составе кварца ВС? Авторы (рис. 2) показали, что инфракрасные (ИК) спектры кварца позволяют сделать выводы о возможной природе образующихся молекулярных центров (МЦ) с водородной связью (Н-связь), их влиянии на свойства кварцевых изделий. Этот позволяет сделать вывод о наличии в самом кварце ВС.

На рис.2 представлен ИК спектр кристаллического кварца марки КВ, полученный на толстых образцах. Полоса поглощения 3660 см^{-1} в спектре образца соответствует неассоциированным группам ОН, либо комплексам типа Si-OH...O-Si с Н-связями.

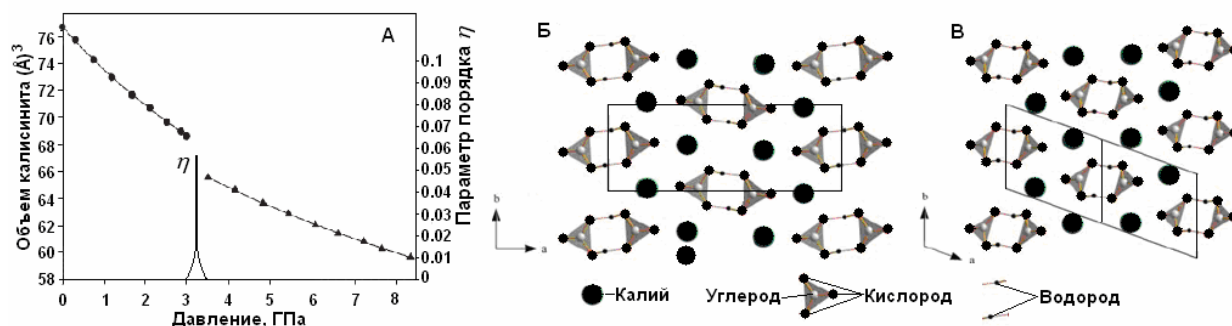


Рис. 3. Изменение удельного объема ($\Delta V/V = 4\%$) в калисините при давлении 3.2 GPa –А, изменение пространственной структуры калисинита - Б, В. [Allan D.R., Marshall W.G., Pulham C.R. The high-pressure crystal structure of potassium hydrogen carbonate (KHCO_3) // American Mineralogist. 2007. V. 92. P.1018-1025].

Задача возникновения УВ в твердом теле с ВС была бы близка к решению, если бы на кварце наблюдался СФП да ещё за столь малые времена. Таких данных обнаружить мне не удалось, зато хорошо известно, что СФП был обнаружен в калисините при давлении 3.2 ГПа (рис.3). Справа на этом рисунке показано как может происходить СФП за счет поворота углов ВС. При этом плотность калисинита изменяется на 4%.

При СФП резко возрастает параметр порядка (ПП). ПП – термодинамическая величина, характеризующая дальний порядок в среде, возникающий в результате спонтанного нарушения симметрии при фазовом переходе. Равновесный ПП равен нулю в неупорядоченной фазе и отличен от нуля в упорядоченной. При ФП 2-го рода ПП непрерывно возрастает от нулевого значения в точке перехода, а при ФП 1-го рода – сразу принимает конечное значение.

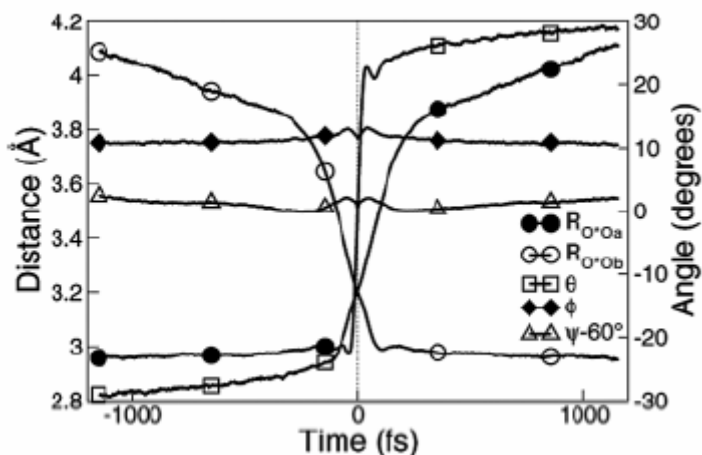


Рис. 4. Время реориентации воды: скорость изменения длин ВС и их угловых величин в зависимости от времени (fs- фемтосекунды $=10^{-15}$ сек) [Laage D. Hynes J.T. A molecular jump mechanism of water reorientation // Science. 2006. V. 311. P. 832-835].

Остается последний из поставленных вопросов: каково же время переориентации СПФ. Этот вопрос исследован для воды, как вещества, в составе которого существуют ВС. Насколько известно, таких исследований ни с кварцем, ни с другими твердыми природными веществами, содержащими ВС, - не проводилось. Обратимся к полученным результатам по исследованию времени реориентации ВС (рис. 4). Рисунок показывает, что кооперативные явления по реориентации ВС происходят очень быстро, что удовлетворяет требованию образования УВ.

Как отмечалось выше, для возникновения землетрясения или вулкана необходимо, чтобы огромное пространство активной среды принимало участие в СФП. Теоретических подходов к решению такой задачи нет, нет и инструментальных наблюдений. Для решения этого вопроса потребуются проведение целого комплекса исследований как лабораторных, так и численного моделирования, как теоретических проработок, так и сейсмологических наблюдений.

Основные направления исследований данного Проекта:

- **Разработка принципа минимизации** гравитационной энергии как причину возникновения сейсмичности и вулканизма,
- **Развитие модели горного удара** как техногенного землетрясения, оценка эффектов в шахте, возникающих в процессе выхода УВ на внутреннюю поверхность шахты,
- **Обоснование физики эффектов, предшествующих возникновению землетрясения:** акустических, электромагнитных, в атмосферном электрическом поле, в атмосфере и воде.

- **Обоснование целесообразности** развития теоретических и экспериментальных исследований многочастичной сцепленности – как «прорывную» идею современной науки,
- **Кооперативность ВС** (квантовая сцепленность) – как причина возникновения звука предшествующего удару землетрясения; связь акустической эмиссии перед землетрясением и исчезновение её перед ударом (сейсмическое затишье);
- **Разработка математической модели** квантовой сцепленности многочастичных систем при моделировании структурных фазовых переходов при высоких температурах и давлениях. За основу берется метод тензорного описания многочастичной сцепленности, который был предложен американским ученым М. Левиным (Гарвард), при описании топологических квантовых переходов при нулевых температурах. Согласно последним работам В.Вердала квантовая сцепленность сохраняется и при высоких температурах.
- **Проведение экспериментальных исследований** явления акустического сверхизлучения возникающего в образцах горных пород при испытании их на прессах. Выяснить возникает ли режим кооперативности на одном, двух и более образцах. Выяснить имеется ли связь между акустическим сверхизлучением и возникновением ударной волны.
- **Проведение полевых наблюдений.** Сбор материалов по наблюдению и исследованию предвестников землетрясений на поверхности земли, в атмосфере и воде. Исследование явлений изменения акустического и электромагнитного фона перед землетрясением.
- **Численное моделирование:** выхода ударной волны на поверхность, механизма распространения ударной волны от гипоцентра землетрясения до поверхности Земли, т.е. формирование очага землетрясения. В результате численного моделирования должно быть получено пространственное распределение поля векторов массовой скорости за фронтом ударной волны.
- Подбор наиболее адекватных реологических и термодинамических параметров для грунта и сейсмического разреза среды. Создание базы сильных движений. Используя сейсмологические базы данных, необходимо выяснить реальность постулируемой в ударно-волновой модели землетрясения - связи особенностей морфологии области её

формирования на глубине гипоцентра, с акустическими особенностями очага и разломными диаграммами.

Литература

1. Кузнецов В.В. Ударно-волновая модель очага землетрясения. 1990. - Новосибирск. Препринт ИГиГ, № 8, -18 с.
2. Кузнецов В.В. Физика земных катастрофических явлений. 1992.- Новосибирск: Наука,- 96с.
3. Кузнецов В.В. Ударно-волновая модель очага землетрясения. Науки о Земле: Современные проблемы сейсмологии. - М.: Вузовская книга, 2001. - С. 47-62.
4. Кузнецов В.В. Модель самоорганизации ансамбля излучающих звук трещин // ПМТФ. - 2001. - Т. 42. - № 4. - С. 184-189.
5. Кузнецов В.В. Введение в физику горячей Земли. Петропавловск-Камчатский: КамГУ, 2008. 367 с.
6. Кузнецов В.В. Ударно-волновая модель землетрясения (I). Сильные движения землетрясения как выход ударной волны на поверхность // Физическая мезомеханика. 2009. Т. 12. №. 6. С. 87-96.
7. Кузнецов В.В. Многочастичная квантовая запутанность – «прорывное направление в науке». Квантовая магия. 2011 Т. 8. вып. 1 С. 1101-1119.

В печати:

1. «К вопросу о физике землетрясения». (Пузыревские чтения, 2009). Сдана в ж. «ФТПРПИ» ИГД СО РАН
2. «Горный удар – причина выброса метана в угольной шахте?». Сдана в ж. «ФТПРПИ».