

## НОВЫЕ ПОДХОДЫ К ФИЗИКЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ И ИЗВЕРЖЕНИЙ ВУЛКАНОВ

**В. В. Кузнецов**

*Институт космофизических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН*

*684034 Камчатский край, Елизовский район, с. Паратунка, ул. Мирная, 7,*

*email: vvkuz38@mail.ru*

Автором разрабатывается принципиально новая модель землетрясения: ударная волна (УВ) в момент землетрясения, образуясь в районе гипоцентра, выходит на поверхность Земли и отражается. При этом возникает отраженная волна растяжения (разгрузки), направленная в противоположную (от УВ) сторону. Взаимодействие этих волн приводит к сильным движениям таким, как разрывы поверхности, разуплотнение грунта, колебательные движения грунта и т.п.

Известно, что землетрясения и извержения вулканов происходят на Земле примерно в одно время и в одном и том же месте (например, на побережье Тихого Океана). При анализе сейсмической волновой картины под очагом вулканов показано, что в большинстве случаев магматический очаг не имеет корней, уходящих в мантии к внешнему ядру Земли. Каким образом тогда возникает изолированный от внешнего мира магматический очаг, и как в нем происходит подогрев магмы? В этой работе предлагается принципиально новая модель вулкана, согласно которой возникновение магматического очага и его регулярная «подпитка» энергией происходит за счет УВ землетрясений. Физика этих «вулканических» землетрясений (ВЗ) несколько отличается. В обычных землетрясениях ударная волна, распространяясь в упругой среде, приходит к поверхности земли практически без потерь и производит разрушения грунта. В вулканических землетрясениях (ВЗ) УВ встречает на своем пути неупругую (например, пористую) среду, в которой возникает волна разгрузки, и УВ диссипирует с нагревом среды и образованием магматического очага. Очевидно, что на поверхности земли такое землетрясение «следов» не оставляет. Аналогичная ситуация возникает в грязевых вулканах, медленных землетрясениях, диатремах, в воронках, образующихся в газогидратах, и т.п. Здесь, естественно, следы остаются. По-видимому, во всех рассматриваемых нами случаях мы имеем дело с некоторой особенностью поведения возмущенной среды, которая «снимает» возмущение путем генерации УВ и переноса энергии возмущения на любое расстояние от источника возмущения.

### **Введение**

Природа демонстрирует некоторую общность между землетрясениями и извержениями вулканов:

- землетрясения и вулканы располагаются на поверхности Земли в одних и тех же местах,
- в настоящее время количество землетрясений и извержений вулканов (в единицу времени) монотонно возрастает;
- частоты повторения землетрясений и вулканов, ранжированных по энергии, ведут себя очень похоже. Это говорит о том, что и землетрясения, и извержения вулканов представляют собой фликкер-шум ( $1/f$ -шум, избыточный шум);
- аномальные флуктуации, для которых характерна обратно пропорциональная зависимость спектральной плотности мощности от частоты. Этот факт ещё раз подтверждает общность этих явлений. Максимальные величины энергии землетрясения ( $10^{25}$  эрг) и вулканического извержения ( $10^{27}$  эрг) находятся на близких уровнях.

Известно, что в преобладающем большинстве моделей вулкана авторы не могут найти причины возникновения обособленного очага и изображают подводящий к нему магму канал (рис. 1). Реально такой подводящий канал имеется только у т.н. супервулканов. Например, таких как Тоба или Йеллоустон. В свою очередь, практически все известные нам вулканы кроме супервулканов имеют характерные конусы. В нашей модели вулкана предпринята попытка найти естественное объяснение этим двум деталям: как может возникнуть магматический вулканический очаг без подводящего канала, и почему при этом обязательно возникает конус.

### Ударно-волновая модель землетрясения

Физика землетрясения, несмотря на то, что эта проблема стоит перед человечеством более 100 лет, до сих пор так и остается не ясной. Как считает популярный журнал LiveScience, одна из десяти тайн Вселенной сформулирована примерно так: «Что происходит в сердце землетрясения?». В чем же состоит причина, и почему эта очень важная проблема, над решением которой работает огромное количество университетов, институтов и компаний во всем мире, не продвинулась практически ни на шаг? Прошло сто лет с первой научной концепции упругой отдачи, высказанной Рейдом после разрушительного землетрясения в 1906 г. в Сан-Франциско [10]. С тех пор не было выдвинуто не то чтобы теории, – ни одной гипотезы, ни одной модели, которая более или менее адекватно описывала бы наблюдаемые в момент землетрясения явления.

Двадцать пять лет тому назад автором этой статьи была предложена ударно-волновая модель землетрясения [3], которая в цикле последующих за ней работ рассматривает последовательность таких механизмов [5-7]:

- 1) возникновение упругих напряжений в литосфере и мгновенный сброс этих напряжений путем формирования УВ;
- 2) транспортировка УВ по литосфере, взаимодействие её со средой, приводящее к генерации сейсмических волн, распространяющихся по всему объему Земли;
- 3) выход УВ на поверхность Земли и формирование т.н. сильных движений грунта.

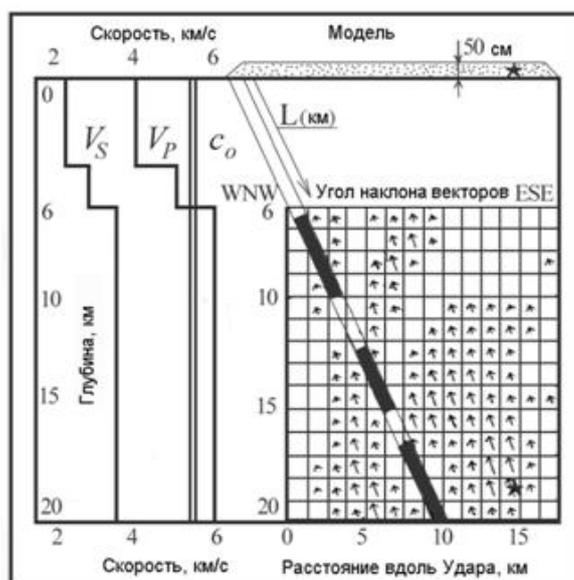
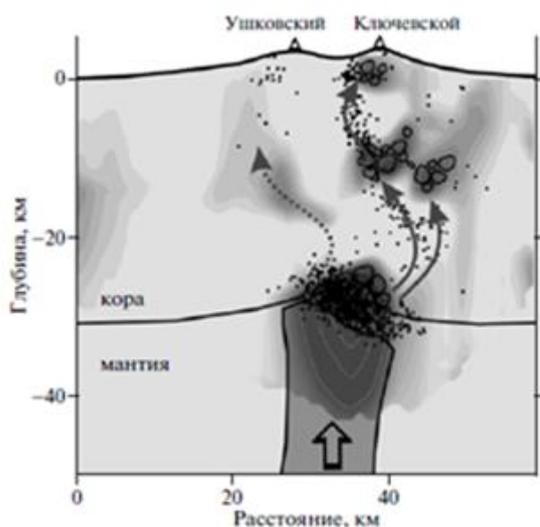


Рис. 1. Структура коры под Ключевской группой по данным 2004 г. [8].

Рис. 2. Модель разрывов Нортриджского землетрясения (справа) [12,13]. В левой части рисунка – распределение по глубине скоростей P-, S-волн и УВ  $c_0$  [11].

### Генерация и распространение сейсмических волн 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 УВ, распространяющихся в твердых телах со скоростью  $c_0 < V_P$ , известно, что на неоднородностях земной коры и литосферы очага землетрясения может происходить расщепление УВ. С расщеплением связаны возникновение волны растяжения и генерация «пластических» и объемных волн. Далекими сейсмостанциями фиксируются именно те объемные волны, которые возбуждаются в очаге при расщеплении УВ. По характеру распространения этих волн обычно делается заключение о механизме очага землетрясения.

Рассмотрим процессы, сопутствующие распространению УВ по очагу землетрясения, т.е. по геологической среде от места образования УВ, гипоцентра землетрясения, до поверхности Земли. Положим, что геологическая среда обладает неоднородностями в виде слоистости, трещиноватости, резких изменений плотности и скорости звука и т.п. На принятом в физике УВ языке все неоднородности можно считать слабыми разрывами. Приведем несколько положений теории этих явлений, имеющих непосредственное отношение к физике землетрясения в рамках ударно-волновой модели на примере Нортриджского землетрясения 1994 года.

На рис. 2 справа изображена модель разрывов Нортриджского землетрясения. В левой части рис. 2 показано одномерное распределение скоростей сейсмических Р- и S- волн по глубине. На рис. 2 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  $L$  которой примерно 22 км. Вдоль этой линии можно изобразить временную шкалу, на которой выделяются три, следующих один за другим, удара. В работе [13] 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 [11], 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  $\sim 60 - 70^\circ$ .

Согласно наблюдениям, объемные волны возбуждаются на всем протяжении очага – от эпицентра землетрясения практически до поверхности Земли. Обратим внимание на такую деталь, следующую из работы [12]: на глубине двух-трех километров и выше (рис. 2), т.е. вблизи земной поверхности, генерации объемных волн не наблюдается.

Для решения этой задачи обратимся к физике распространения УВ и образования волны разгрузки (ВР) в сплошной среде. ВР может образовываться не только при выходе УВ на свободную поверхность, а, как показано Зельдовичем и Райзером [2], и при прохождении ее через вещество, нагруженное внешним давлением. Для этого необходимо выполнение ряда условий: вещество должно быть сжато внешним давлением до величины порядка предела текучести материала ( $p_{кр}$ ). Амплитуда УВ должна быть больше  $p_{кр}$ . В этом случае возбуждаются и распространяются по среде две волны, одна – “упругая” со скоростью  $v_p$ , другая – “пластическая” со скоростью  $c = (K/\rho)^{1/2}$ . УВ расщепляется на упругую и пластическую волны. По нагруженному телу “бежит” ударная волна разгрузки в сторону, обратную распространению УВ. Кроме этого, может образовываться 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 УВ [2]. Заметим, что если скорость УВ значительно выше, чем местная скорость звука, расщепления волн вообще не происходит.

Соотнесем сказанное к нашей модели. Предположим, что предел текучести материала среды ( $p_{кр}$ ) порядка 1 кбар. Это давление примерно соответствует глубине около 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. 2), проходящем через гипоцентр землетрясения, определены вектора подвижек, соответствующие интенсивности объемных волн [12]. Как следует из этой работы, все волновые векторы направлены под углом  $\approx 5 - 60^\circ$  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 также в некоторых более глубоких областях разреза. В рамках нашей модели полученный результат можно интерпретировать следующим образом. На малых глубинах нет эффекта расщепления УВ, поэтому не возникает ВР, и нет 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 небольших глубинах, на которых не может происходить расщепления УВ и, соответственно, генерации объемных волн.

### Физика вулканического извержения

#### Источники тепла

Одной из нерешённых проблем проявления вулканической активности является определение источника тепла, необходимого для *локального плавления* базальтового слоя или мантии. Такое плавление должно быть *узколокализованным*, поскольку прохождение сейсмических волн показывает, что кора и верхняя мантия обычно находятся в твёрдом состоянии. Более того, тепловой энергии должно быть достаточно для плавления огромных объёмов твёрдого материала.

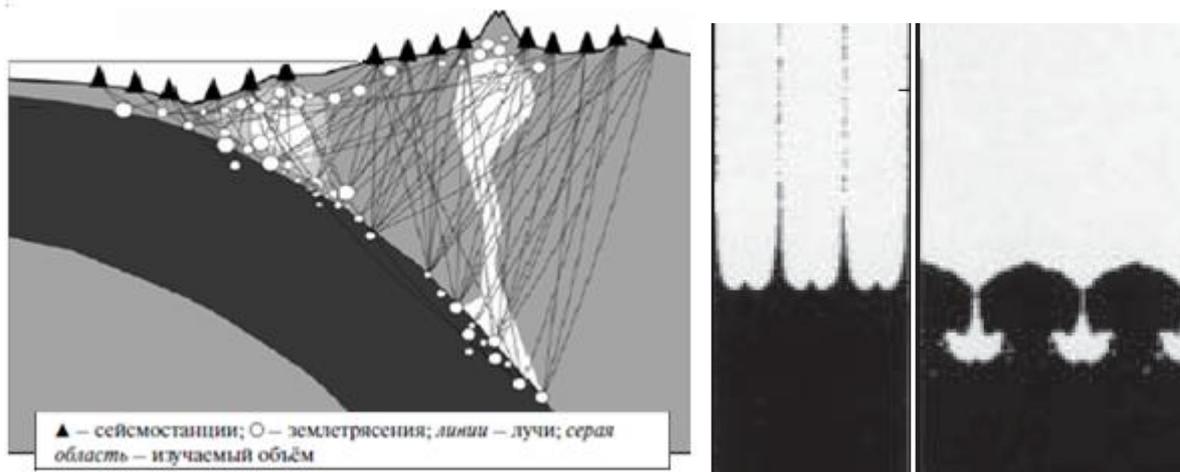


Рис. 3. Схемы лучей для выполнения томографической инверсии на локальной схеме [8].

Рис. 4. Результаты численного моделирования неустойчивости Рихтмайера-Мешкова [1].

В настоящее время существуют три гипотезы. По одной плавление обусловлено локальными высокими концентрациями радиоактивных элементов, но такие концентрации в природе кажутся маловероятными; другая гипотеза предполагает, что тектонические нарушения в форме сдвигов и разломов сопровождаются выделением тепловой энергии. Существует ещё одна точка зрения, согласно которой верхняя мантия в условиях высоких давлений находится в твёрдом состоянии, а когда вследствие трещинообразования давление падает, происходит так называемый фазовый переход, когда твердые породы горной мантии плавятся, и по трещинам происходит излияние жидкой лавы на поверхность Земли. Ни одна из этих гипотез не принята. Проблема остается открытой, что стимулирует поиск принципиально новых ее решений.

#### Плавление среды в ударной волне.

Учтем некоторые выявленные сравнительно недавно особенности воздействия УВ на среду. Крупномасштабным молекулярным моделированием динамики распространения ударной взрывной волны и квази-изоэнтропического (адиабатического) сжатия дефектных кристаллов показано [9], что в случае распространения УВ по пластической среде в ней возможно т.н. виртуальное плавление. Суть эффекта сводится к тому, что на фронте УВ уменьшается температура плавления вещества на 80 %, что составляет, например, для меди  $\Delta T \approx 4\,000\text{ K}$ . В результате взаимодействия УВ с пластической средой получается некий продукт, получивший название переохлажденной жидкости. Этот продукт релаксирует и повторно кристаллизуется за время порядка пикосекунды.

#### Подтверждение нашей модели

Автор работы [8], используя алгоритм локальной томографии в тех случаях, когда станции и источники расположены на расстояниях до сотни км, определяет пространственное

распределение сейсмических скоростей одновременно с расчетом параметров источников сейсмического сигнала. Такие исследования проводятся в регионах с сильно неоднородной структурой (например, в зоне действия вулканов). Чтобы уменьшить влияние нелинейных эффектов, связанных с искривлением траекторий сейсмических лучей и ошибками локализации источников сигнала сейсмических волн, расчеты выполняются итеративно с пересчетом лучей и координат источников сигналов в полученной трехмерной модели сейсмической среды. Приведенный автором [8] рис. 3 иллюстрирует, как из одномерной модели путем включения нескольких итераций происходит локализация землетрясений в 3D-скоростной модели инверсии. С точки зрения нашей ударно-волновой модели вулкана полученная картинка подтверждает предложенную нами модель образования магматического очага без подводящего канала. При этом мы полагаем, что объем, выделенный на рис. 3 серым цветом, – это магматический очаг. Проходящие сквозь него ударные волны, возможно, отдают свою энергию очагу, обеспечивая его дополнительный разогрев. Рисунок 3, конечно, не является прямым доказательством правоты нашей модели. По крайней мере, он модели не противоречит.

### **Неустойчивость Рихтмайера-Мешкова**

В случае развития классической гидродинамической неустойчивости Рихтмайера-Мешкова (НРМ) при прохождении УВ через контактный разрыв из „тяжелого“ материала в „легкий“ вещество границы приобретает приращение скорости, противоположное по фазе профилю начального возмущения. Развитие возмущений границы носит инерционный характер и определяется начальными условиями задачи [1] (рис. 4).

### **Заключение**

Особенность распространения УВ в литосфере приводит к тому, что плавление в УВ может происходить только на глубине большей 3 км. Именно этот факт является причиной появления конуса выноса породы в вулкане. Развитие НРМ в очаге может быть причиной выбросов магматического материала из жерла вулкана.

### **Список литературы**

1. Бахрах С.М., Безрукова И.Ю., Ковалева А.Д. и др. Кумулятивный характер неустойчивости поверхности конденсированного вещества // Письма в ЖТФ. 2006. Т. 32. вып. 3. С. 19-24.
2. Зельдович Я. Б., Райзер Ю. П. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. М.: Наука, 1966.
3. Кузнецов В.В. Ударно-волновая модель очага землетрясения. 1990. - Новосибирск. Препринт ИГиГ, № 8.
4. Кузнецов В.В. К вопросу о физике плюма // Геофизический журнал. 2008. Т.30. № 6. С. 76-92.
5. Кузнецов В.В. Введение в физику горячей Земли. - Петропавловск-Камчатский. КамГУ, 2008.
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. Ударно-волновая модель землетрясения. Формирование ударной волны. Физика очага и афтершоки // Квантовая магия. 2011. Т. 8. вып. 2. С. 2125-2151.
8. Кулаков И.Ю. Взгляд на процессы под вулканами через призму сейсмической томографии // Вестник РАН. 2013. Т. 83. № 8. С. 698-710.
9. Levitas V.I., Ravelo R. Virtual melting as a new mechanism of stress relaxation under high strain rate loading, Supporting Information // Proc. Nat. Acad. Sci. USA. 2012. 109(33):13204-7.
10. Reid H.F. The elastic-rebound theory of earthquakes // Bull. Department Geology. Univ. Calif. Publ. 1911, V. 6. N 19. P. 413-444.
11. 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.
12. Somerville P., Saika C., Wald D., Graves R. Implications of the Northridge earthquake for strong ground motions from thrust faults // BSSA. 1996. V. 86. N. 1B. P. S115-S125
13. Zeng, Y., Anderson J. G. A composite source modeling of the 1994 Northridge earthquake using Genetic Algorithm // Bull. Seism. Soc. Am. 1996. V. 86. N. 1B/ P. 71-83.