

УДК 550.34

УДАРНО-ВОЛНОВАЯ МОДЕЛЬ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ

В.В.Кузнецов

Институт геофизики СО РАН, Новосибирск, 630090

Поступила в редакцию:

Адрес для переписки: 630090, Новосибирск, Институт геофизики СО РАН, пр. Коптюга 3. Кузнецов В. В. тел. р. (3832) 332816; т.д. (3832) 303468; Факс: (3832) 332513; E-mail: kuz@uiggm.nsc.ru

Предлагается ударно-волновая модель землетрясения - принципиально новая гипотеза, включающая описание физики землетрясения, суть которой состоит в том, что в недрах Земли образуется ударная волна (УВ), которая проходит через литосферу, формируя очаг, выходит на поверхность Земли и отражается. При отражении УВ на поверхности Земли возникают её разрывы, разломы и разрушения. Согласно модели, очаг землетрясения представляет собой некий объем когерентной акустически активной среды, обладающей дальним порядком, в котором образуется и распространяется практически без потерь и даже с усилением ударная волна. УВ расщепляется на акустических границах объема очага, при этом возбуждаются объемные волны. При выходе УВ на поверхность Земли, она отражается и уходит в глубь Земли. При отражении УВ образуются другие, в основном поверхностные волны большой амплитуды: «пластические» волны, волны разгрузки и растяжения (ВР) и т.п. Взаимодействие этих волн с ударной волной и между собой на земной поверхности является причиной возникновения отколов, разрывов, смещений и т.д., т.е. явлений «трясения» земли. Ударная волна, как разрывное решение на стационарном акустическом фоне, согласно модели, формируется в недрах Земли за счет возникновения дальнего порядка и реализации механизма когерентного лавинного образования трещин. Взаимодействие возникающих при образовании трещин акустических волн, при вполне определенных условиях их распространения, может привести к возникновению так называемых центрированных волн. Эти волны образуются за счет реализации явления пересечения одноименных характеристик. При распространении центрированной волны по геологической среде, в ее характеристиках (давлении и плотности) появляются разрывы, т.е. происходит генерация ударной волны в среде, в которой изначально разрывов не было. Рассмотрены различные варианты явления выхода УВ на поверхность, определено отношение модели к характеристикам землетрясения, к проблеме его прогноза.

ВВЕДЕНИЕ. Физика землетрясения, несмотря на усилия ученых многих стран, практически не претерпела эволюции в течение почти 100 лет после известной работы Рейда [23]. В наше время, в преобладающем большинстве вариантов моделей, как и у

Рейда, очаг землетрясения связан с образованием огромной трещины, которая, «пробивая» многие десятки (и даже сотни) километров земной коры и литосферы, достигает земной поверхности и производит здесь разрушения. Согласно этим моделям, колоссальные объемы литосферы, с характерным размером порядка сотни километров, в течение времени основного удара («толчка») землетрясения, длительностью порядка единиц секунд, изменяют свое местоположение относительно окружающего их пространства на высоту в сантиметры, и даже метры.

Механистическая модель Рейда требует ее уточнения и, возможно, замены. Например, одним из возражений против механизма Рейда является то, что все попытки обнаружить и проследить в глубь Земли трещину, вдоль которой происходит смещение огромного массива горной породы, оканчивались безрезультатно. Складывается впечатление, что такой трещины в природе нет, и быть не может. В пользу такого сомнения говорит то, что ни прямыми наблюдениями, ни сейсмическими, ни методами электроразведки наличие трещины установить не удалось. В качестве другого сомнения в модели Рейда можно принять невероятность того, что землетрясения, образующиеся на глубине 7 км и 700 км, имеют один механизм очага - трещину.

Вероятно, правы Аки и Ричардс [1], обсуждая два аспекта физики землетрясения и полагая, что оно имеет «две стороны медали»: с одной стороны, землетрясение - это сейсмический разрывный источник, в котором происходит скольжение по плоскости разрыва, и, с другой стороны - это объемный источник, связанный с внезапным (взрывным) расширением очаговой области. Первый источник связан со смещением, второй - с деформациями. Авторы [1] демонстрируют подход, в котором оба источника оказываются связанными.

Тем не менее, известны несколько попыток создания альтернативных моделей очага землетрясения. Например, в одной из них разломы и разрушения, возникающие на земной поверхности при сильных землетрясениях, являются результатом взаимодействия (в частности, интерференции) сейсмических волн, излучаемых очагом [24]. В этой работе предлагается привлечь механизм передачи энергии от очага к земной поверхности путем переноса ее упругими, сейсмическими волнами. Чтобы создать необходимую для разрушения земной поверхности интенсивность волн, авторами привлекаются механизмы их усиления. В качестве одного из таких, рассматривается интерференция волн. Возможно, причина не совсем удачного (на наш взгляд) представления модели образования разлома за счет интерференции сейсмических волн состоит в том, что взаимодействие, приводящее к пространственному перераспределению их энергии, основывается на принципе суперпозиции, который справедлив только на линейной стадии. Усиления сейсмической волны, достаточного для разрушения земной поверхности (разуплотнения грунта, образования трещин, отколов и т.п.), при интерференции волн получить нельзя, в принципе. Для достижения этого эффекта необходимо в среде каким-

либо способом возбудить упругие волны очень высокой интенсивности, при которой их взаимодействие друг с другом и со средой находится в далекой нелинейной стадии. Однако это будут уже совсем другие волны. На стадии сильной нелинейности обычно рассматриваются механизмы образования и взаимодействия очень интенсивных, т. н. ударных волн (УВ), как между собой, так и со средой. Принято считать, что УВ, т.е. упругие волны сжатия, в принципе, не могут разрушить твердую среду (горную породу, в нашем случае), по которой распространяются, хотя, возможно, это и не вполне справедливое утверждение. В механике разрушения известны волны очень высокой интенсивности, которые распространяются с разрушением среды. Это «волны» плавления, деструкции, испарения и т.п., но не ударные волны сжатия. (Кавычки показывают, что эти явления к волновым явлениям, в обычном понимании этого слова, можно отнести весьма условно).

В физике высоких плотностей энергии (изучающей взрывы, УВ, кумулятивные струи, воздействие мощных пучков частиц и света, и т.п.) хорошо известно, что разрушение твердого вещества возможно только в том случае, когда УВ выходит на «свободную» поверхность упругого тела и отражается [5]. При отражении УВ от свободной поверхности, образуется волна разгрузки (разрежения, растяжения), которая может быть причиной разрушения поверхности. «Волна» разрежения, распространяясь в направлении увеличения плотности вещества, диссипирует и очень быстро затухает. (Обратим внимание на то, что УВ, которая распространяется вдоль направления уменьшения плотности среды (задача решалась для атмосферы), движется автономно, самоускоряется и практически не затухает [5]). Известны эксперименты, в которых наблюдалось явление разрушения (откола) при отражении УВ от поверхности грунта и образование волны разрежения (ВР) [2]. В этих экспериментах УВ создавалась при подрыве в скважине заряда взрывчатого вещества. Если ВР по тем или иным причинам не возникала, не наблюдались и отколы. При заглублении сейсмографа на два-три метра в грунт, ВР на нем уже не регистрировалась, хотя при этом на поверхности наблюдались и ВР, и отколы. Этот результат подтверждает факт разрушений грунта только при появлении ВР, а так же то, что ВР, «распространяясь» по среде, быстро диссипирует.

Цель настоящей работы состоит в изложении основ принципиально новой модели землетрясения [11]. Суть модели заключается в описании последовательной реализации происходящих в литосфере процессов и явлений:

- В недрах Земли, в напряженном, изотропном геологическом теле возникает акустически активная среда, в которой раскрываются трещины, генерируя при этом звуковые импульсы, и происходит взаимодействие между раскрывающимися трещинами путем обмена акустическими волнами [10]. В такой среде, при выполнении определенных условий, может возникнуть когерентная структура, обладающая дальним порядком.

- Когерентное сложение звуковых импульсов от одновременно раскрывающихся трещин приводит к возникновению т.н. централизованных волн. Эти волны образуются за счет реализации явления пересечения одноименных характеристик.

- При распространении централизованной волны по геологической среде, в ее характеристиках (давлении и плотности) появляются разрывы. Распад разрыва приводит к генерации ударной волны (УВ) в некоторой области литосферы, определяемой в сейсмологии как гипоцентр землетрясения.

- УВ распространяется по ограниченному объему Земли («очагу» землетрясения) от гипоцентра к поверхности Земли и усиливается за счет «подкачки» звуковыми импульсами от раскрывающихся на ее фронте трещин. При распространении УВ по очагу и при ее расщеплении на акустических границах очага, происходит генерация объемных волн.

- УВ выходит на свободную поверхность Земли и при ее отражении от поверхности образуется волна разгрузки (ВР) и другие поверхностные волны.

- Взаимодействие УВ и ВР приводит к возникновению на поверхности Земли отколов, сжатий, разрывов, разломов и растяжений поверхности, нодальных плоскостей, разделяющих зоны разломов и разрушений.

Заметим, что в преобладающем большинстве ранее рассмотренных случаев [5], задачи об образовании ВР решались для твердых тел (металлов, в частности), к разряду которых, далеко не всегда можно отнести грунты (т.е. достаточно пористые среды), которые, в основном, и разрушаются при землетрясении. Однако, в [7] показано, что в пористой среде тоже может образоваться ВР. Ее возникновение связано с зависимостью в пористом теле предела текучести от давления.

Дальнейшее развитие ударно-волновой модели, возможно, позволит получить более ясное понимание происходящих в земных недрах процессов, а так же получить их строгое математическое описание и создать численную модель образования УВ в недрах Земли, движения ее по литосфере и выхода на земную поверхность. При создании настоящей модели использовались явления, хорошо изученные в других областях физики.

ОБРАЗОВАНИЕ УДАРНОЙ ВОЛНЫ. Может ли возникнуть УВ в твердой оболочке Земли, если сейсмический фон стационарен и нет внешних взрывных возмущений? В [8, 11] идея возникновения УВ в литосфере Земли обосновывалась тем, что при нагрузке в твердом упругом и прочном геологическом теле возникают трещины, которые, при раскрытии, генерируют звуковые импульсы. Эти импульсы, распространяясь по среде и достигая готовой к раскрытию новой микротрещины, стимулируют ее раскрытие и генерацию еще одного импульса [10, 14] и т.п. Если в среде микротрещин много, то первый импульс одновременно «запускает» раскрытие других трещин и возникает очень много импульсов, интенсивности которых складываются. Таким образом, в среде, в которой могут образоваться микротрещины, определенным образом ориентированные,

возможно осуществление режима “сверхизлучения”, впервые предсказанного для оптики Р. Дикке [16], еще до открытия лазеров, и практически реализованного уже после их широкого распространения. Если предположить, что в напряженной упругой среде возможен режим акустического сверхизлучения, т.е. фактически стимулированного образования трещин, то звуковые импульсы от синхронно образующихся трещин, когерентно складываясь, могут образовать уединенную акустическую волну, которая, в принципе, может превратиться в волну ударную.

Постулированный нами механизм землетрясения, по сути, очень близок к т.н. режиму лавинного образования трещин. Он отличается от общепринятой его трактовки тем, что в результате лавинного образования трещин, вместо одной большой трещины (по Рейду), в которую объединяются много - много мелких, эти же трещины “объединяют” свои звуковые импульсы (звуковые, сейсмические волны), формируя при этом отдельную волну [4]. Такая волна, распространяясь по геологическому телу, может из волны акустической превратиться в волну ударную. При этом вместо привычного в физике землетрясения разрыва смещений будет происходить перемещение разрыва характеристик среды на фронте ударной волны (возникает, в терминах [1], разрывный источник). Рассеяние УВ на акустических неоднородностях очага землетрясения вызывает генерацию объемных волн, и, таким образом, в ударно-волновой модели реализуется объемный (в терминах [1]) источник.

Ансамбль излучающих звук трещин рассматривался в [10] как двухуровневая система, аналогичная возбужденной лазерной среде, в которой выполняется принцип детального равновесия. Будем считать, что время релаксации отдельной трещины (время её «залечивания») значительно меньше времени существования устойчивой моды акустической системы. В системе происходит генерация отдельных «квантов»: $e = \hbar\omega = (\sigma^2/E) l^3$, (e – энергия «кванта», \hbar – аналог постоянной Планка, l – длина трещины, $\omega \sim 1/\tau_0$ – “частота” излучаемой волны акустической эмиссии, $\tau_0 = l/u$ – время раскрытия трещины, u – скорость ее раскрытия, σ – напряжение в системе, E – модуль Юнга). На верхнем энергетическом уровне акустически активной системы находятся микротрещины, размером $l_0 \approx 1$ микрон, а на нижнем – раскрывшиеся трещины $l \approx 100$ микрон. Ограничение размера трещины сверху вызвано тем обстоятельством, что трещины большого размера имеют тенденцию к дальнейшему росту и практически не могут залечиваться после раскрытия [25]. Энергия образования микротрещины $e_0 = (\sigma^2/E) l_0^3$ значительно меньше энергии раскрывшейся трещины, поэтому ее можно не учитывать при оценке величины звукового «кванта», образующегося при раскрытии трещины. Если $\sigma = 3 \cdot 10^7$ Н/м², $E = 10^{10}$ Н/м², то $e = 10^{-7}$ Дж (для трещины 100 мкм). Скорость раскрытия трещины $u \approx 10^5$ см/с, длительность акустического импульса $\tau_0 \approx 10^{-7}$ с, а частота излучения - $\omega \approx 10^7$ 1/с. Раскрытие трещины сопровождается излучением сейсмической

сдвиговой S-волны, которая распространяется в горной породе со скоростью $V_S \approx 3-4$ км/с.

Интенсивность сейсмической волны от раскрывающейся трещины частотой $\omega \approx 10$ МГц, при распространении ее в горных породах, затухает в 2.7 раза, на расстоянии ~ 1 см. Это расстояние является характерным для нашей модели. Как будет показано ниже, оно определяет ширину фронта УВ (δ).

Однако для того, чтобы сейсмическая волна, образующаяся при раскрытии трещины, могла без потерь пройти расстояние от гипоцентра до поверхности Земли (~ 10 км), частота сейсмических колебаний должна быть $\omega \approx 1 - 10$ Гц, а размер трещины, соответственно, $l \sim 1$ км, что не соответствует начальным условиям рассматриваемой модели. Следовательно, двухуровневая структура, аналогичная оптической, не вполне соответствует модели взаимодействия трещин. В такой модели нет возможности получить эффект дальнего порядка за счет прохождения акустических «квантов» от трещин вдоль среды. Как это, например, происходит в лазере, где квант излучения свободно и многократно проходит через оптический резонатор.

Экспериментальные данные по наблюдению акустической эмиссии в напряженном образце горной породы показывают [3], что в некоторые случайные моменты времени возникает взрывоподобное нарастание (типа цепной реакции) количества трещин N в единицу времени t и, соответственно, количества звуковых импульсов:

$$dN/dt = U + (f - g) N,$$

здесь U – скорость спонтанного зарождения трещин; $\phi = f - g$ – разность между факторами, определяющими разветвление и обрыва цепей, причем, если $\phi > 0$, $dN/dt \sim N$, – происходит лавинообразное нарастание количества трещин N ($\tau \sim N^{-1}$). Близкое по характеру явление известно в оптике, в частности, в физике лазеров как сверхизлучение. Дикке [16] предсказал, что система, состоящая из двух уровней, может спонтанно перейти в основное состояние за время, обратно пропорциональное числу возбужденных излучателей N : $\tau \sim N^{-1}$. Мощность системы $P \sim I/\tau \sim N h\omega_0/\tau \sim N^2$. В случае обычного спонтанного излучения, когда излучатели не зависят друг от друга, интенсивность $P \sim N$. В лабораторных экспериментах со сжатием образцов горной породы в момент усиления интенсивности акустической эмиссии наблюдалась зависимость: $P \sim N^2$.

В результате спонтанного увеличения интенсивности акустической эмиссии (действия эффекта сверхизлучения) происходит генерация «видеоимпульса» с предельной частотой излучения (по фронту) ~ 1 кГц [3]. Такой видеоимпульс, в отличие от импульса акустической эмиссии от раскрывающейся трещины, может распространяться на значительно большее расстояние, чем 1 см.

Принципиальным моментом механизма взаимодействия между трещинами является то, насколько эффективно рассеиваются сейсмические волны на трещине и

микротрещине. Приведем несколько очевидных соображений, касающихся особенностей рассеяния волны на микротрещине [1], которые будем использовать в дальнейшем.

1. Рассеянные волны образуются в результате взаимодействия между первичными волнами и неоднородностями среды – трещинами и микротрещинами.

2. Первичная Р-волна в направлении своего распространения не создает поля рассеянных S-волн дальней зоны.

3. В направлении распространения S-волны рассеянные Р-волны не излучаются.

4. Мощность, уносимая рассеянными волнами, определяется тремя основными параметрами: линейным размером объема неоднородной области, характерным размером неоднородности (размером трещины или микротрещины) и длиной сейсмической волны.

5. Рассеяние становится пренебрежимо малым, когда размер неоднородности оказывается много меньше длины волны.

Иллюстрируем сказанное рисунком (рис 1). Предположим, что в некотором объеме напряженной горной породы образовалась структура параллельных друг другу трещин и микротрещин. Раскрытие одной из микротрещин сопровождается излучением S-волны, которая, рассеиваясь на трещине, переизлучает Р-волну, распространяющуюся в направлении ориентирования трещин и S-волну, распространяющуюся поперек луча Р-волны. Рассеиваясь на микротрещине, S-волна приведет к её раскрытию, и каскад явлений повторится. 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: $\Delta y/V_P = -\tau_0 + x/V_S$. Оценим величину x , для чего примем: $\Delta y = x$, $V_P = 5$ км/с, $V_S = 3$ км/с, $\tau_0 = 10^{-7}$ с, тогда $x \approx 700$ мкм (что вполне реально). Таким образом, эта оценка показывает, что пересечение Р-волн от раскрывающихся микротрещин, расположенных на расстоянии 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 взрывных 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. 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. 1). При этом возникает волна сжатия, в вершине которой плотность вещества среды и давление в волне возрастают. Такая волна может стать ударной.

Случай, когда все сходящиеся характеристики пересекаются в одной единственной точке – предельный. Более вероятна ситуация, при которой появляется целая область пересечений, в которой находится некая точка, называемая точкой возврата. Именно этой точке приписывается возникновение ударной волны. Считается, что в точке возврата появляется произвольный разрыв, при распаде которого, собственно, и возникает ударная волна. Величина начального разрыва может быть весьма малой: $\varepsilon = (p_2 - p_1)/p$, где ε – малый параметр. Разлагая в ряд формулы, характеризующие ударную волну (законы сохранения и адиабату Гюгонио), по параметру ε и отбрасывая члены с ε^3 , легко показать, что $p_1 \approx p_2$, $\rho_1 \approx \rho_2$ и т.д. Оценим величину $\varepsilon(\rho)$ для случая возникновения трещин в напряженной среде. Предположим, что в см^3 среды плотностью ρ_1 образовалось n трещин, каждая длиной $l = 100$ мкм и «шириной» 10 мкм. Расстояние между трещинами $\approx 2l$. Объем одной трещины $\Delta V \approx 10^{-8} \text{ см}^3$. Увеличение объема за счет одновременного возникновения n трещин $\Delta V n \approx 10^{-3} \text{ см}^3$. Масса вещества среды, в которой образовалось n трещин, не изменилась, а объем, занимаемый этой массой, уменьшился на 10^{-3} . Отсюда: $(\rho_1 - \rho_2) / \rho_1 \approx 10^{-3}$, ($\varepsilon \approx 10^{-3}$).

На рис. 1 изображена ситуация, в которой происходит пересечение волн от раскрывающихся трещин. Одновременный приход волн в одну общую точку (О) может привести к возникновению новой высокочастотной волны. Эта волна, по определению, не может распространяться на расстояние, большее 1 см. Как отмечалось выше, расстояние в 1 см определяет ширину фронта УВ (δ). Возможно, аналогичная ситуация, когда волны пересекаются, может возникнуть и с «видеоимпульсами» сверхизлучения, если они могут возникнуть одновременно и достаточно близко друг к другу, чтобы эффект пересечения состоялся. В этом случае дальное действие системы трещин будет значительно больше, чем в случае взаимодействия отдельных трещин. Синфазное сложение видеоимпульсов наиболее вероятно, если они проявляют свойства солитонов [4]. В случае такого сложения высокая частота (10 МГц) определяет ширину фронта УВ. Однако в этом случае условие: $\tau \sim 1/N$ может не выполняться, и сложение видеоимпульсов уже нельзя рассматривать как сверхизлучение.

Аддитивное сложение звуковых импульсов в ударной волне определяет ее энергию:

$$I = N \times (\sigma^2 / E) l^3,$$

здесь N – число трещин, принявших участие в формировании УВ. После генерации УВ, трещины, образовавшиеся в геологическом теле, “залечиваются” в течение некоторого

времени, и затем система вновь готова к генерации ударной волны. Механизм такого «залечивания» трещин описан в [25].

Если допустить, что объем активной геологической среды (объем очага землетрясения) составляет $V = 10 \times 10 \times 100 \text{ км}^3$, то $N = 10^{24}$, и энергия УВ: $I = 10^{24} \text{ эрг}$. Плотность энергии $I/V = 10^5 \text{ эрг/см}^3$ - примерно в 10 000 раз меньше, чем энергия, запасенная в таком же объеме тротила. Эта энергия эквивалентна нагреву одного см^3 горной породы примерно на $0,01^\circ \text{ С}$ и т.п. Соотнесем полученную нами оценку с плотностью энергии очага, принятой в сейсмологии. Например, согласно [6], для землетрясения с $M = 8.6$, плотность энергии $E/V = 1000 \text{ эрг/см}^3$, что в 100 раз меньше, чем получилось у нас. Этот факт может говорить, например, о том, что достаточно, чтобы в процессе генерации приняли участие только 1 % трещин из всех имеющихся и т.п.

Как известно, энергия УВ в значительной степени сосредоточена в ее фронте. Примем толщину фронта равной 1 см, тогда объем фронта УВ: $V^* = 100 \text{ км} \times 10 \text{ км} \times 1 \text{ см} = 10^{13} \text{ см}^3$. Удельная энергия на фронте: $I^* = 10^{11} \text{ эрг/см}^3$ или, для нормальной плотности горной породы $\rho = 3 \text{ г/см}^3$, $I^* = 3 \text{ кДж/г}$. Давление на фронте УВ $\sim 10^{11} \text{ дин/см}^2$. Естественно, это завышенные оценки, однако, удельная энергия и давление на фронте такого уровня могут привести к сильному сжатию горной породы в ударной волне и её разрушению в волне разгрузки.

Принято считать, что характерное время землетрясения [6] определяется размером тела (L) и скоростью сейсмических волн (V_p). Если, к примеру, принять: $L = 14 \text{ км}$, а $V_p = 7 \text{ км/с}$, то характерное время $t = 2 \text{ с}$. Отсюда следует, что чем сильнее землетрясение, тем длиннее «импульс» главного удара. Аналогичным образом можно оценить t в нашей модели. Однако для этого сначала необходимо выяснить, с какой скоростью распространяется постулированная нами УВ. По-видимому, можно считать, что ударная волна, вызывающая землетрясение, даже катастрофическое, «не самая сильная», по классификации Зельдовича и Райзера [5]. Такая волна распространяется в твердом теле с «акустической» скоростью $c = (V_p^2 - 4V_s^2/3)^{1/2}$, что для: $V_p = 7-8 \text{ км/с}$ и $V_s = 4-4.5 \text{ км/с}$ дает значение скорости УВ примерно 5-6 км/с. Характерное время «импульса» землетрясения (по данным наблюдений) порядка 6-8 с.

Другая ситуация должна была бы наблюдаться, если в землетрясении реализовался бы режим сверхизлучения. Здесь [16] длительность импульса $t \sim 1/N$, откуда следует, чем больше магнитуда (энергия) землетрясения, тем короче t . (Автоматически это приводит к тому, что мощность землетрясения $P \sim I/t$, оказывается $\sim N^2$). Если это время: $t < t_n$, где t_n - характерное время «накачки» (по аналогии с оптикой) образца упругой энергией, то реализуется режим сверхизлучения. Если имеет место обратное неравенство: $t > t_n$, то происходит сверхлюминесценция (и УВ не образуется). В случае примерного равенства: $t \approx t_n$, УВ генерируется в виде отдельных коротких импульсов. (Заметим, что практическая сейсмология «располагает» почти полным набором этих вариантов). Величину t_n можно

оценить, привлекая кинетическую теорию прочности [13], как долговечность образца при его разрушении τ :

$$t_n = \tau = \tau^* \times \exp[(U_n - \gamma\sigma)/kT],$$

здесь τ^* - период тепловых флуктуационных колебаний атома в конденсированном теле (τ^* порядка 10^{-13} с), U_n - предел прочности среды (численно равен теплоте испарения ее вещества), $\gamma\sigma$ - работа внешних сил при разрушении, kT - тепловая энергия. Эти формулы связывают параметры геологического тела (L) с прочностными, внешними и упругими характеристиками среды.

Наша модель построена на взаимодействии трещин между собой по принципу: “трещина – волна - трещина”. В качестве экспериментального подтверждения такого взаимодействия мы используем тот факт, что в ряде лабораторных экспериментов обнаружен эффект внезапного, внешне ничем не инициированного, спонтанного роста акустической эмиссии (АЭ) в образцах горных пород при постоянной нагрузке [3, 18]. Более того, в этих экспериментах обнаружено, что гипоцентры АЭ в образце с течением времени группируются как во времени, так и в пространстве - объединяясь в кластеры (“пачки” импульсов) в некоторых областях образца [3, 21, 22]. Эти результаты можно считать экспериментальным подтверждением акустического сверхизлучения. По-видимому, мы можем полагать, что обнаруженные в лабораторных экспериментах эффекты возникновения кластеров (сверхизлучения - в нашей интерпретации), могут “проявиться” и в горных породах. Таким образом, идея сверхизлучения (и, как следствие ее, - генерация УВ) лабораторными экспериментами подтверждена.

Теоретически проблема образования УВ, как результат кумуляции многих импульсов, рассмотрена, например, в [4]. Обозначим волновую переменную $\varphi(x, t) = F(x - vt)$ через некоторую функцию аргумента $(x - vt)$, тогда условие постоянства φ при постоянстве аргумента можно записать в дифференциальной форме:

$$d\varphi = (\partial\varphi/\partial x)dx + (\partial\varphi/\partial t)dt = 0.$$

При $dx/dt = v$ получается простейшее волновое уравнение: $\partial\varphi/\partial t + v(\partial\varphi/\partial x) = 0$, играющее фундаментальную роль в теории волновых процессов.

Одним из решений этого уравнения является бегущая плоская гармоническая волна:

$$\varphi(x, t) = A \sin(\omega t - kx - \zeta_0).$$

Здесь, A - амплитуда, ω - частота, k - волновой вектор, ζ_0 - фаза.

Ударная волна обычно описывается приближенными уравнениями, учитывающими нелинейность, дисперсию и диссипативные свойства среды. Широкий класс таких явлений представлен уравнением Бюргерса – Кортевега - де Фриза [4]

$$\partial\varphi/\partial t + v_0(\partial\varphi/\partial x) = -\epsilon\varphi(\partial\varphi/\partial x) + v(\partial^2\varphi/\partial x^2) - \beta(\partial^3\varphi/\partial x^3),$$

где ϵ , v , β - константы, отражающие влияние, соответственно, нелинейности, диссипации и дисперсии. Относительно УВ возможны два решения: стационарная ударная волна

описывается уравнением Бюргерса ($\beta = 0$) и УВ в виде отдельного импульса (солитона), - уравнением Кортевега-де Фриза ($v = 0$). Нас, в дальнейшем, будет интересовать второе решение:

$$\varphi = A \operatorname{sech}^2[(x - vt)/\Lambda],$$

где $\Lambda = (12\beta/\epsilon A)^{1/2}$, $v = v_0 + \epsilon A/3$, A - амплитуда. Характерная протяженность, “длительность” фронта Λ , УВ тем меньше, чем больше A (условие сверхизлучения). С увеличением амплитуды A , УВ - убыстряется.

В физике нелинейных процессов известно явление укрупнения фронта УВ за счет того, что частицы геологической среды, находящиеся в пучности ударной волны (где плотность среды выше), движутся быстрее, чем соседние частицы, находящиеся вне пучности [4]. Волновой профиль укрупняется настолько, что может привести к опрокидыванию УВ, т.е. разрыву сплошности среды. Стабилизирующим фактором, предохраняющим волну от опрокидывания, является дисперсионный механизм, т.е. наличие нелинейной зависимости частоты Фурье гармоник от вязкости среды и волнового числа k :

$$\omega_k = kc - \beta k^3,$$

здесь c и β - константы и c - имеет смысл скорости звука. Нелинейный член βk^3 ограничивает укрупнение УВ. Характерная ширина фронта УВ имеет порядок:

$$\delta \sim (\beta/\alpha)^{1/2},$$

где α имеет физический смысл увеличения скорости распространения УВ, по отношению к местной скорости звука [4]. С учетом того, что укрупнение фронта УВ может привести к тому, что при $\delta < 1$ см прекратится подпитка ударной волны за счет раскрывающихся на ее фронте трещин, ширина фронта УВ - стабилизируется

НАПРАВЛЕНИЕ “ГЛАВНОГО УДАРА”. Ударная волна образуется в недрах Земли в некоторой области, называемой гипоцентром землетрясения, и распространяется в направлении к земной поверхности, формируя собственно очаг и т.н. плоскость “главного удара” (main shock). Плоскость главного удара, как правило, располагается под углом к поверхности Земли. Этот угол меняется примерно от 45° до 90° к горизонту. Рассмотрим, чем определяется величина этого угла.

Воспользуемся теорией разрушения, развитой Кулоном более 200 лет тому назад и дополненной Мором примерно 100 лет спустя [12]. Эта теория описывает величину угла между осью нагружения образца и плоскостью его разрушения. В нашей модели среда далека до стадии разрушения. Обратим внимание на ту часть теории Кулона-Мора, которая описывает условия формирования пространственного угла образования трещин. Разрушение образца, как известно, происходит именно под этим углом θ . Кулон обнаружил, что разрушение происходит под углом $\theta = 45^\circ - \varphi/2$, где угол φ можно оценить по известному критерию Кулона-Мора, записанному в главных напряжениях:

$$\sin\varphi = [1/2 \times (\sigma_I - \sigma_{III})] / [c \times \operatorname{ctg}\varphi - 1/2 \times (\sigma_I - \sigma_{III})],$$

здесь c - прочность горной породы, σ_I и σ_{III} главное и дополнительное напряжения. Из этой формулы следует, что если: $\sigma \rightarrow 0$, то $\varphi \rightarrow 90^\circ$, а $\theta \rightarrow 0^\circ$ и наоборот, если: $\sigma \rightarrow \infty$, то $\varphi \rightarrow 0^\circ$, а $\theta \rightarrow 45^\circ$. Т.о. с увеличением глубины h и, естественно, увеличением литостатической нагрузки σ , угол θ будет возрастать от 0° до 45° (см. рис. 2а). Обратим внимание на полученный результат. Он говорит о том, что в среде, которая “нагружена” только за счет статики вышележащих слоев, не может возникнуть дальний порядок и, очевидно, не может быть землетрясений. Возможно, это не совсем так при больших величинах σ ($\sigma \geq 5$ кбар), когда угол φ будет очень мал и угол раскрытия трещин $\theta \approx 45^\circ$. Однако, при меньших величинах σ , угол θ может быть меньше 45° . Для того, чтобы в такой среде возник дальний порядок, необходимо каким-либо способом “довернуть” угол θ до необходимого значения. В принципе, это можно сделать с помощью “боковой”, тектонической нагрузки (рис. 2б). Возможно, эта нагрузка вызывается глобальными тектоническими причинами, возможно, именно она приводит к дрейфу плит и континентов. Обратим внимание на конкретное следствие нашей модели. Величина литостатической нагрузки σ несколько килобар, величина тектонической “боковой” σ , должна быть того же порядка. Это намного больше, чем величина напряжения, вызываемая лунно-солнечными приливами (7 бар). Может быть, что именно в этой разности величин σ и состоит причина отсутствия корреляции между приливами и сейсмичностью.

Рассмотрим случай, когда угол θ определяется литостатической нагрузкой и напряжением, возникающим в т.н. зонах субдукции. Здесь σ является результатом векторного сложения двух напряжений, действующих под углом друг к другу (рис. 2в). Угол образующихся трещин в зоне их возникновения $\theta > 45^\circ$ и приближается к 90° . Рисунок 2г иллюстрирует возможность, как с помощью небольшой по величине дополнительной нагрузки, можно обеспечить в системе дальний порядок и пространственную когерентность. Этим примером, в частности, демонстрируется возможность проявления широко обсуждаемого сейсмологами т. н. триггер - эффекта.

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ УДАРНЫХ ВОЛН НА ПОВЕРХНОСТИ ЗЕМЛИ. Рассмотрим волновую картину процессов формирования в недрах Земли УВ, движение ее к дневной поверхности, возникновение ВР и взаимодействие волн. Воспользуемся приемом из практики изучения УВ. Изобразим рассматриваемые процессы на x -диаграмме, где x - координата, а t - время. Обозначим: x_0 , t_0 - координату и время выхода УВ на свободную поверхность (см. рис. 3). Предположим, что в земной коре, на глубине между $x = 0$ и $x = x_b$, и, далее, до x_0 , расположено геологическое «тело», обладающее определенными свойствами: во-первых, это должно быть прочное тело, способное к накоплению упругой энергии и активному образованию трещин; во-вторых, оно должно быть изотропным. В таком теле не должно быть неоднородностей, у которых заметно различаются между

собой плотность и скорость звука (ρc). На таких неоднородностях происходит рассеяние УВ. 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 участвующие в процессе вполне определенного размера, не более 100 - 200 микрон, которые потом, после события, могли бы “залечиться” так, чтобы тело могло быть готово к очередному событию. (Это условие не исключает присутствие трещин других размеров). При выполнении этих требований в т.н. сейсмоактивной среде такого геологического тела возможно возникновение акустического стимулированного сверхизлучения и образование сильной акустической, центрированной волны, а затем и ударной волны.

Принято считать, что УВ возникает в тот момент, и в том месте пространства, где скорость распространения волны в среде превысит местную скорость звука. В нашей модели скорость распространения УВ может быть и ниже местной скорости звука, поэтому образование УВ, скорее всего, произойдет в той области пространства (x_b, t_b), где амплитуда колебаний частиц в уединенной волне окажется настолько большой, что волна уже не может рассматриваться как сейсмическая (гуковская). В этой области пространства могут возникнуть разрывы в сплошной геологической среде, и акустическая волна превратится в центрированную волну. Эта волна будет распространяться как ударная со скоростью, большей, чем скорость раскрытия трещин, без потерь и даже с усилением за счет того, что УВ движется по акустически активной среде, которая “подпитывает” ее звуковыми импульсами от образующихся в среде трещин (как автоволна). На фронте УВ возникает избыточное давление, которое вызывает образование «затравочных» микротрещин, которые, синхронно раскрываясь, «отдают» ударной волне свои звуковые импульсы. Во-вторых, УВ движется в направлении к земной поверхности в среде с примерно экспоненциальным характером убывания ее плотности по мере приближения к ее «дневной» поверхности. Как мы отмечали, движение УВ при этом автомодельно и происходит без потерь. (По всей видимости, это утверждение справедливо и для УВ, образующихся на глубинах 100, 400 и даже 700 км).

В точке (x_0, t_0) УВ выходит на земную (свободную) поверхность (см. рис. 3) и образует ВР, “двигающуюся” в обратном (по отношению к УВ) направлении. Длительность импульса (удара) УВ конечна (обозначим ее Δt). За это время УВ охватывает пространство на земной поверхности $\Delta x = V_x \times \Delta t$.

Известно, что волна разрежения (ВР) в среде с нормальными термодинамическими свойствами образоваться может, но далеко распространяться от места образования - нет (теорема Цемплена) [5]. Взаимодействие фронтов УВ и ВР происходит практически в точке возникновения ВР. (Поэтому, выражения типа: “бегущая” волна разрежения, - взяты в кавычки). Как известно, на фронте УВ происходит сжатие вещества среды, а в области фронта ВР - растяжение. Взаимодействие фронтов УВ и ВР приводит к удвоению

величины растягивающих напряжений – разрывов и удвоению величины массовой скорости. Это явление аналогично тому, как в электромагнитной волне, распространяющейся вдоль линии, возникает удвоение напряжения на ее разомкнутом конце.

КОСОЕ ПАДЕНИЕ УДАРНОЙ ВОЛНЫ. Рассмотрим пример, когда УВ “падает” на свободную поверхность под углом α . Из сейсмических наблюдений этот угол, соответствующий направлению “главного удара” (main shock) землетрясения, находится в пределах $40-50^\circ$ к горизонту. Например, при землетрясении в Спитаке (1988, Армения), угол α равен примерно 50° , а в случае землетрясения в Нортридже, чудом не разрушившего Голливуд (1994, США, Калифорния), $\alpha \sim 40^\circ$ и т.п. Область разрушений такого землетрясения примерно равна: от эпицентра вдоль направления распространения УВ $\approx \Delta x$, а поперек этого направления, равна - линейному размеру очага. Во время землетрясения в Нортридже длительность импульса УВ составляла примерно 8 секунд. При скорости распространения УВ (вдоль поверхности Земли) порядка 3-4 км/с, область разрушений $\Delta x \approx 30$ км. Причем, что характерно для землетрясений с косым падением УВ, эпицентр землетрясения (как проекция гипоцентра), обычно “не совпадает” с районом максимальных разрушений. В качестве примера, подтверждающего это, можно привести диаграмму разрушений землетрясения в Нортридже, где эпицентр находится в стороне от области максимальных разрушений [17]. Аналогичная ситуация наблюдалась и в Спитаке, и во многих других землетрясениях.

Рассмотрим характер сил и напряжений, возникающих в пространстве взаимодействия волн (УВ и ВР), при косом падении УВ (рис. 4). Фронт УВ подходит к земной поверхности снизу под углом α , со скоростью $V_{ув}$. Ударная волна в точке “А”, находящейся на земной поверхности, образует волну разгрузки, которая начинает распространяться в обратном направлении к УВ. Вдоль поверхности, от точки “А”, в противоположные стороны, “бегут” две волны: УВ и ВР, каждая со скоростью V_x . Фронт УВ имеет конечный размер a , определяемый размером очага (УВ). Таким образом, в некоторый момент времени, косая УВ выйдет на земную поверхность полностью. Это произойдет в точке “В” нашей диаграммы.

Остановимся на обсуждении двух случаев: 1) $V_{ув} > V_x$, 2) $V_{ув} < V_x$. В первом, ВР в любой точке на земной поверхности образуется раньше, чем туда подойдет УВ (волна, распространяющаяся вдоль поверхности со скоростью V_x). На участок поверхности действуют “сжимающие” усилия: обе волны направлены навстречу друг другу (левая часть рис. 4). Во втором случае, в каждую точку поверхности, УВ подойдет раньше, чем там появится ВР. Здесь, наоборот, действуют “растягивающие” силы (правая часть рис. 4).

Таким образом, 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. Разрывы и разломы совпадают в нашей модели с нодальными плоскостями, отделяющими зоны сжатия от зон растяжения. Соответственно, фазы вступления поверхностных волн, возникающих при образовании разрывов и фиксируемые сейсмостанциями, “повторяют” фазы направлений растяжения-сжатия, определяемых (как, например, в Нортридже) по величине доплеровского изменения стабильной частоты радиосигналов со спутников (система GPS). Аналогичная ситуация образования зон растяжений-сжатий происходит в объеме очага, где УВ расщепляется, образуя ВР на акустических границах (различиях в плотности и скорости распространения сейсмических волн). Возможно, расщепление УВ является причиной возникновения объемных волн очага с различными полярностями первых вступлений, фиксируемых сейсмостанциями на очень больших удалениях от очага.

Заметим, что первый случай взаимодействия УВ и ВР между собой, по-видимому, предпочтительней второго: скорость УВ (“из глубины” – $V_{ув}$) обычно больше, чем при ее движении вдоль поверхности (V_x). По крайней мере, в обоих рассматриваемых выше примерах косоугольного падения УВ, и в Спитаке, и в Нортридже, характер разрушений и фазы поверхностных волн соответствуют именно первому случаю, а не второму.

НОРМАЛЬНОЕ ПАДЕНИЕ УДАРНОЙ ВОЛНЫ. Согласно ударно-волновой модели землетрясения, УВ формируется и движется к земной поверхности под углом в 45° в том случае, когда основные нагрузки на геологическое тело складываются из: нормальных напряжений (т.е. вертикальных, литостатических) и боковых (тектонических). Только в таких случаях возможно достижение дальнего порядка и одинакового угла раскрытия трещин, равного примерно 45° . Эта ситуация характерна для тектонически активных регионов, удаленных от краев плит. Вдоль краев плит возникают напряжения под острым углом к нормальным (литостатическим). Например, это могут быть зоны спрединга или субдукции. Здесь, кроме литостатической нагрузки, необходимо учитывать и “наклонные” напряжения. Положим эти напряжения достаточно значимыми. Их суммарное воздействие на геологическое тело, в котором образуется акустически активная среда, приводит, в конечном счете, к тому, что угол преимущественного образования трещин, а, следовательно, и угол подхода УВ к дневной поверхности, становится больше 45° и приближается к 90° . Этот случай можно рассматривать как нормальное падение УВ на свободную поверхность. Если какая-либо из нагрузок на геологическое тело распределена в пространстве неравномерно, то когерентной структуры (дальнего порядка) не возникает. Подчас, даже небольшое стороннее усилие, например, такое как подъем уровня грунтовых вод (триггерный эффект), может привести нагруженную систему трещин в когерентное состояние и вызвать образование УВ и землетрясения. Иллюстрация этого эффекта изображена на рис. 2.

Ни фронт УВ, ни земную поверхность нельзя считать идеальными плоскостями. Рассмотрим две возможные ситуации падения УВ: в первом случае - фронт УВ выпуклый (волна расходящаяся, рис. 5, слева); во втором случае - фронт волны вогнутый (УВ - сходящаяся, рис. 5, справа). Земную поверхность считаем плоской. В первом варианте центральная (выпуклая) часть волны раньше других, соседних ей частей волны, подходит к земной поверхности, отражается и образует ВР, которая “движется” в обратном направлении. В момент главного удара землетрясения может сложиться ситуация (изображенная в левой части рис. 5), когда центральная часть пространства, занятого ВР, подвергается растяжению, а его периферийная часть, где еще продолжает распространяться УВ - сжатию. В правой части рис. 5 – ситуация, обратная первой. Здесь, в центральной части волны, среда еще подвержена сжатию, а на ее периферии - растяжению. В точке контакта УВ и ВР, из-за взаимодействия их фронтов, возникает удвоение растягивающих усилий и образуется разлом типа сброса. Эти ситуации, соответственно, отражены на разломно-плоскостных диаграммах, помещенных в нижней части рис. 5.

Мы рассмотрели только плоские случаи падения УВ и соответствующие им разломно-плоскостные диаграммы. Известно, что в сейсмологической практике встречаются диаграммы разломов, находящихся под различными углами к плоскости наблюдений, что не противоречит нашей модели. Складывается впечатление, что по разломно-плоскостной диаграмме и картине разломов на поверхности Земли всегда можно подобрать конфигурацию взаимодействующих фронтов ударных волн и волн разгрузки.

ГЕНЕРАЦИЯ ОБЪЕМНЫХ ВОЛН. 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.

До сих пор мы объясняли характер разрушений при землетрясении, как результат воздействия на земную поверхность волны разрежения, образующейся непосредственно у поверхности и быстро затухающей. В такой модели пока не находится места генерации объемных волн. Согласно наблюдениям, объемные волны возбуждаются на всем протяжении очага - от гипоцентра землетрясения практически до поверхности Земли. Обратим внимание на такую деталь, следующую из работы [26]: на глубине двух-трех

километров и выше, т.е. вблизи земной поверхности, генерации объемных волн, как правило, 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 в [5], и при прохождении ее через вещество, нагруженное внешним давлением. Для этого необходимо выполнение ряда условий: Вещество (согласно [5]) должно быть сжато внешним давлением до величины порядка предела текучести материала ($p_{кр}$). Амплитуда УВ должна быть больше $p_{кр}$. Скорость распространения УВ должна быть ниже, чем скорость Р-волн: $V_{ув} < V_p$. В этом случае возбуждаются и по среде бегут две волны, одна - “упругая”, со скоростью V_p , другая – акустическая (пластическая), со скоростью $c = (K/\rho)^{1/2}$. Ударная волна расщепляется на упругую и пластическую волны, тогда по нагруженному телу “бежит” волна растяжения 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 [5]. Ещё раз обратим внимание на то, что если скорость УВ значительно выше, чем местная скорость звука, расщепления волн вообще не происходит. Это означало бы, что очаг вообще волн не излучает.

Соотнесем сказанное к нашей модели. Предположим, что предел текучести материала среды ($p_{кр}$) порядка 1 кбар. Это давление примерно соответствует глубине около 3 км. По нашим оценкам скорость УВ примерно 3 - 4 км/с. Скорость распространения Р-волн такого порядка значений соответствует глубине около 2 - 3 км. Отсюда следует, что на таких малых глубинах (меньших 2 - 3 км) расщепления УВ и генерации ВР происходить не может. Действительно, этот эффект наблюдался, как отмечалось выше, и при землетрясении в Нортридже, и во время других землетрясений. На вертикальном разрезе, проходящем через гипоцентр землетрясения в Нортридже, определены вектора подвижек, соответствующие интенсивности объемных волн [26, 27]. Как следует из этих работ, все волновые векторы направлены под углом $\approx 45^\circ$ к горизонту, а их интенсивности изменяются, от максимальной до нуля, вдоль плоскости разреза. На малых глубинах (2 - 3 км) векторов подвижек нет. Они не наблюдаются также 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. Рассмотрим случай, когда не обнаруживается генерации объемных волн в некоторых более глубоких частях разреза. Это может говорить, например, о том, что УВ на своем пути встречается с ослабленной зоной среды очага, в которой не происходит ее расщепления, либо УВ пересекает область пространства, в которой, по ряду причин,

скорость звука значительно ниже скорости ее распространения. Всё это может служить препятствием к расщеплению УВ и образованию волн разрежения.

Заметим, что развиваемый нами подход находит простое и естественное объяснение еще одному явлению. Речь идет о том, что при взрывах ядерных 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. Другой причиной отсутствия генерации объемных волн может быть слишком большая скорость распространения УВ от взрыва. Во всех примерах нами предполагалось, что если нет расщепления УВ, нет ВР, не возникает и объемных волн с различными фазами вступлений.

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 Ричардса [1] подвижка частиц геофизической среды Δw (slip) при распространении трещины со скоростью V приводит к появлению дополнительного напряжения τ_{yz} . Упрощая формулу 15.3 из этой книги и учитывая только значимые параметры, запишем приближенное равенство:

$$\tau_{yz} \approx \mu u/V,$$

где μ модуль сдвига ($\mu = 400$ кбар на глубине 20 км), $u = d\Delta w/dt$ – скорость распространения скольжения (slip-velocity). Подстановка полученных из эксперимента значений $v = 5$ км/с и $u = 1$ м/с определяет величину напряжения τ_{yz} : τ_{yz} , порядка 100 бар.

Оценим величину сжатия среды Δp после прохождения по ней ударной волны. Согласно оценке, приведенной в книге Зельдовича и Райзера [5],

$$\Delta p = \rho c u,$$

где u , как и раньше, медленная скорость течения среды после воздействия на неё УВ, ρc – акустическое сопротивление среды. Если принять: $u = 1$ м/с, а $\rho c = 3 \text{ г/см}^3 \times 5 \text{ км/с}$, то окажется, что величина Δp порядка 100 бар. Совпадение этих оценок не случайно, по-видимому, это 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 проскальзывания, полученной в модели Рейда и массовой скорости, следующей из ударно-волновой модели, может говорить о том, что наша модель, возможно, адекватна физическому механизму землетрясения. Ранее мы отмечали, что УВ можно представить

как движение разрыва, конечно, это совсем не тот разрыв, который постулировался в модели Рейда. Это локальный разрыв, время существования которого равно длительности фронта УВ, а, в пределе, - длительности импульса УВ.

ОБСУЖДЕНИЕ МОДЕЛИ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ. В ударно-волновой модели предлагается феноменологическая последовательность явлений, происходящих в прочной нагруженной давлением среде, где возможно возникновение дальнего порядка и когерентности структуры образующихся трещин. По-видимому, в среде возможно получение эффекта стимулированного сверхизлучения, как средства “сбросить” накопившееся напряжение. В результате механизма, аналогичного так называемому “лавинному образованию трещин”, в этой среде (геологическом сейсмически активном теле) образуется, за счет сложения звуковых импульсов от синхронно раскрывающихся трещин, мощная, уединенная звуковая волна,двигающаяся к дневной поверхности. В области пространства, в которой интенсивность волны окажется такой большой, что она уже никак не может быть сейсмической (гуковской) волной, она начинает двигаться по «правилам» распространения ударных волн. Амплитуда перемещений частиц среды на фронте УВ достигает, и даже становится больше, размера трещины l . Реальна ли такая волна, есть ли подтверждения ее существования, или это только вымысел? Могут ли возникать в геологической среде, при прохождении через нее УВ, «пластические» волны? Каков механизм взаимодействия волн при «трясении земли»?

Ударные волны в грунте фиксировались в экспериментах со взрывом и высокоскоростным ударом. Возникновение пластических волн и поведения среды в момент трясения земли как жидкости можно иллюстрировать рисунком, приведенным во многих книгах по физике землетрясения [1, 6]. На этом рисунке приведены данные, записанные во время известного Паркфилдского землетрясения 1966 г., полученные с датчика горизонтальных перемещений, установленного в 80 м от разлома Сан Андреас. Характер перемещений частиц среды в момент землетрясения, скорость их перемещения и ускорение адекватны ситуации с образованием волн на поверхности воды после того, как в воду бросили камень.

Приведенный пример – далеко не единственный случай, когда твердая среда ведет себя как жидкость. Обратимся к наблюдениям поведения грунта в непосредственной близости от мощного сейсмодвижителя. При некоторых режимах, вокруг сейсмодвижителя возникает т.н. присоединенная масса, когда частицы среды движутся синхронно с вибратором. Этот эффект авторами, его открывшими, интерпретировался как возникновение необычной волны [15]. Авторы обнаружили «недопустимо высокую для рыхлого грунта фазовую скорость (1300 м/с)». Скорость этой волны резко снижалась примерно в 10 раз на расстоянии около 5 м от края платформы и еще через 5 – 10 метров превращалась в обычную рэлеевскую скорость в рыхлом грунте.

Этот результат стимулировал наши исследования особенностей работы сейсмодвижителя в качестве «управляемого землетрясения». Естественно, в данном случае речь шла только о той стадии землетрясения, при которой происходит собственно «трясение земли». Эта идея оказалась весьма плодотворной. Нам удалось зарегистрировать ряд возмущений геофизической среды, таких как изменение величины магнитного поля, атмосферного электрического поля, изменения теллурического поля. Как известно, подобные возмущения считаются признаками готовящегося землетрясения. Сюда относят и возбуждение инфразвука. Нами было обнаружено возмущение E-слоя ионосферы при работе мощного сейсмодвижителя (сейсмоионосферный эффект) [9, 19, 20]. Колебания частиц грунта близки вибратора в необычной «волне» [15] происходят синфазно с платформой вибратора. Вероятнее всего, сама «волна» - это колебания т.н. «присоединенной массы», известного явления в гидродинамике. Тем не менее, эту «волну» можно рассматривать, в контексте нашей модели, как некоторый аналог ударной волны. Одновременно с этой «волной», вблизи вибратора генерируются поверхностные волны типа волн Рэлея (или волн Лэмба). Взаимодействие этих волн с колебаниями присоединенного грунта вызывает, в миниатюре, широкий спектр движений среды, свойственных землетрясению (трещины, slip-эффекты, нодальные линии).

В сейсмологии, в разделе физики землетрясения, принято считать, что такие параметры землетрясения, как его энергия (I), энергия излучения объемных волн (E_v), магнитуда землетрясения (M), сейсмический момент M_0 , взаимосвязаны. Связанными с ними оказываются: площадь поверхности разлома S , площадь области афтершоков S_A , период (длительность главного удара) T , объем очага землетрясения V , и т.д. [6]. Как эти зависимости могут быть объяснены в рамках нашей модели? Такие детали модели как, возникновение сколов, разуплотнений грунта, движения массы грунта за ударом землетрясения и ряд других, прямо следуют из физики процессов, сопутствующих выходу ударной волны на свободную поверхность тела [5]. В этой книге также разобран вопрос о генерации объемных волн за счет расщепления волн сжатия и разгрузки. Рассмотрен эффект перехода вещества в текучее состояние при прохождении через вещество ударной волны. Практически все эти эффекты имеют место при землетрясении и с той или иной степенью подробности отражены в нашей модели. Модель предполагает, что в механизме образования ударной волны значимую роль играют процессы акустического сверхизлучения. Возможно, это происходит именно так, но, как мы отмечали выше, только на раннем этапе формирования УВ. Как следует из [6] (см. Приложение I), между I и T (здесь T - время нарастания) корреляции вообще не наблюдается. С точки зрения нашей модели этот факт можно объяснить, например, тем, что длительность импульса, при распространении УВ, за счет влияния дисперсионных эффектов среды возрастает до величины в несколько секунд и оказывается практически независимой от величины начальной интенсивности.

Пока в нашей модели “выпало” понятие о сейсмическом моменте M_0 . Это очень важная характеристика землетрясения. По физическому смыслу, момент M_0 - это энергия (ρdV), где роль ρ “играет” модуль сдвига μ , а “объем” – объем $V = LDU$. Для землетрясения с $M = 7$, величина сейсмического момента $M_0 = 2 \times 10^{26}$ дин·см (считай, эрг). Это колоссальная энергия, которая способна, например, перевести в пар объем горной породы в один кубический километр, или испарить её слой толщиной в 1 метр, если $L = 100$ км, а $D = 10$ км. Очевидно, что энергии такого порядка не могут выделяться при землетрясениях с $M = 7$, поэтому момент M_0 не может характеризовать величину диссипированной при землетрясении энергии.

Принято считать, что $M_0 \approx 10^4 I$, причем M_0 – величина интегральная, и она обычно оценивается по спектру приходящих от очага сейсмических волн. Представим себе, что УВ распространяется по очагу, объемом XYZ , где Z его глубина. Энергия ударной волны I сосредоточена в объеме $X\Upsilon\delta$, поэтому можно записать: $M_0 = (kZ/\delta) I$, где k доля энергии УВ, которая идет на образование объемных волн (примем $k = 10^{-2}$). Если считать, что $Z = 10$ км, $\delta = 1$ см, то действительно $M_0/I = 10^4$.

Предположим, что сейсмический очаг выполняет роль не только «трансформатора» ударной волны в объемные сейсмические волны, но и собственно источника УВ. Учтем, что КПД преобразования энергии, накопленной напряженной средой, в ударную волну может быть порядка 0.01 % (выше у нас получалась оценка КПД ≈ 0.1 %), тогда, в другой интерпретации, параметр M_0/I может показывать эффективность преобразования энергии очага в энергию УВ. В этой оценке учитывается не диссипативная, а только «реактивная» составляющая энергии очага.

Если мы правильно определили механизм неглубоких землетрясений, то каков механизм землетрясений глубоких? Буквально все когда-либо рассматриваемые модели очага не способны ответить на него вразумительно. Будем исходить из того, что высказанная нами модель верна и действительно разрушения на земной поверхности, и генерация объемных волн в очаге землетрясения - все это следствия одного явления – формирования в области очага ударной волны. Возникает вопрос, каким образом может возникнуть УВ на глубине 700 км, где среда ведет себя скорее как «жидкость», чем как кристаллическое тело? Учтем гениальную мысль, высказанную Ньютоном, относительно того, что “Природа проста и не роскошествует различными причинами вещей”, и выскажем относительно механизма глубоких землетрясений довольно фантастическую идею. Вспомним, что землетрясение - это способ сброса, диссипации тектонических напряжений, в основе которого положены разрыв сплошности среды и образование трещин. (Это общепринятая точка зрения, она используется и в нашей модели). Если в литосфере на глубине 500 - 700 км могут возникнуть разрывы сплошности, то это, скорее, будут уже не трещины, а “пузыри”. Известно, что при схлопывании пузыря возникает

звуковой импульс (кавитация, или холодное кипение). Нам остается предположить, что, как и раньше, звуковые импульсы от схлопывающихся “пузырей” могут возникнуть одновременно и когерентно, и, складываясь друг с другом, образовать УВ. Эта идея может оказаться совсем не фантастичной, т.к. в лабораторных экспериментах с пузырями в жидкости обнаружены явления усиления УВ и даже её генерации на стационарном фоне.

Определим отношение модели к прогнозу землетрясения. Количество звуковых импульсов, «принявших участие» в формировании УВ, по определению случайно, поэтому, **землетрясение, уже начавшись, еще само не знает, каким получится** [8]. Достоверный прогноз силы землетрясения, по всей видимости, не возможен. Однако применение ударно-волновой модели в проблеме прогноза землетрясения может оказаться вполне приемлемым и даже полезным. Например, речь может идти об оценке сейсмической опасности того или иного объекта: города, плотины гидроэлектростанции, атомной электростанции и т.п. Зная сейсмический разрез и геодинамическую обстановку, а так же располагая численной моделью выхода УВ на поверхность, можно оценить угол прихода УВ и максимально возможные разрушения для интересующего объекта, следует изучить, имеется ли геологическое тело, способное генерировать УВ соответствующей энергии. Если окажется, что все эти «атрибуты» в наличии, и разрушительное землетрясение неизбежно, остается только попытаться создать искусственным способом преграду, рассеивающую УВ на пути к объекту, например, путем подземного подрыва ядерного заряда.

Обсуждая физику очага землетрясения, мы базировались на известном явлении образования трещины под действием внешнего давления. Основные используемые экспериментальные результаты получены на лабораторных установках. Досконально не известно, как ведет себя горная порода на больших глубинах, достигающих 700 км (гипоцентров самых глубоких землетрясений). Не известно, образуются там «пузыри» или что-либо подобное им. Небольшой опыт геофизиков, полученный на сверхглубоких скважинах, показал, что все мы очень плохо представляем себе состояние вещества даже на глубине в первые десятки километров. Поэтому, предлагая ту или иную модель явления, происходящего в недрах Земли, не следует забывать об этом и относиться ко всем таким моделям (в том числе и к модели обсуждаемой здесь) соответственно.

Список литературы

1. *Аки К., Ричардс П.* Количественная сейсмология. Т. 1-2. М.: Мир, 1983. 880 с.
2. *Гвоздев А.А., Кузнецов В.В.* Откольные явления в грунтах, наблюдаемые при сейсморазведке // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1967. № 5. С. 21-27.
3. *Журков С.Н., Куксенко В.С., Петров В.А.* и др. Концентрационный критерий объемного разрушения твердых тел // Физические процессы в очагах землетрясений. М.: Наука, 1980. С. 78-86.
4. *Заславский Г.М., Сагдеев Р.З.* Введение в нелинейную физику. М.: Наука, 1988. 368 с.
5. *Зельдович Я.Б., Райзер Ю.П.* Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. М.: Наука, 1966. 686 с.
6. *Касахара К.* Механика землетрясений. М.: Мир, 1985. 264 с.
7. *Киселев С.П., Фомин В.М.* Ударная волна разрежения в пористом материале // Докл. РАН. 1995. Т. 341. № 5. С. 630-631.
8. *Кузнецов В.В.* Физика земных катастрофических явлений. Новосибирск: Наука, 1992. 92 с.
9. *Кузнецов В.В., Плоткин В.В., Хомутов С.Ю.* Акустические и электромагнитные явления при вибросейсмическом зондировании // Докл. РАН. 2000. Т. 370. № 2. С. 243-248.
10. *Кузнецов В.В.* Модель самоорганизации ансамбля излучающих звук трещин // ПМТФ. 2001. Т. 42. № 4. С. 184-189.
11. *Кузнецов В.В.* Ударно-волновая модель очага землетрясения // Науки о Земле. Сейсмология. М.: Вузовская книга, 2001. С. 47-62.
12. *Поль Б.* Макроскопические критерии пластического течения и хрупкого разрушения. Разрушение // Сб. науч. тр. / Под ред. Либовиц Г. М.: Мир, 1975. Вып 2. С. 336-520.
13. *Регель В.Р., Слуцкер А.И.* Кинетическая теория прочности // Физика сегодня и завтра. Л.: Наука, 1973. С. 90-175.
14. *Си Г., Либовиц Г.* Математическая теория хрупкого разрушения. Разрушение // Сб. науч. тр. / Под ред. Либовиц Г. М.: Мир, 1975. Вып 2. С. 83-203.
15. *Юшин В.И., Егоров Г.В., Сперанский Н.Ф., Астафьев В.Н.* Акустическое исследование нелинейных и реологических явлений в ближней зоне сейсмического вибратора // Геология и геофизика. 1996. Т. 37. № 9. С. 156-165.
16. *Dicke R.H.* Coherence in spontaneous radiation processes // Phys. Rev. 1954. V. 93. № 1. P. 99-110.
17. *Harp E.L., Jibson R.W.* Landslides triggered by the 1994 Northridge, California, earthquake // BSSA. 1996. V. 86. № 1B. P. S319-S332.
18. *Ishido T., Nishizawa O.* Effect of zeta potential on microcrack growth in rock under relatively low uniaxial compression // J. Geophys. Res. 1984. V. 89. № B6. P. 4153-4159.
19. *Kuznetsov V.V., Plotkin V.V., Khomutov S.Y.* Acoustic, electromagnetic and ionospheric disturbances during the vibroseismic sounding // Geophys. Res. Lett. 1999. V. 26. P. 2017-2020.

20. *Kuznetsov V.V., Plotkin V.V., Khomutov S.Y. et al.* Powerful seismovibrators as a possible source of acoustic and electromagnetic disturbances // *Phys. Chem. Earth (A)*. 2000. V. 25. № 3. P. 325-328.
21. *Kuzunose K., Lei X., Nishizawa O., Satoh T.* Effect of grain size on fractal structure of acoustic emission hypocenters distribution in granitic rock // *Phys. Earth Planet. Inter.* 1991. V. 67. P.194-199.
22. *Lei X., Nishizawa O., Kuzunose K., Satoh T.* Fractal structure of the hypocenter distributions and focal mechanism solutions of acoustic emission in two granites of different grain sizes // *J. Phys. Earth*. 1992. V. 40. P. 617-634.
23. *Reid H.F.* The elastic-rebound theory of earthquakes // *University of California Publ. Geol. Sci.* 1911. V. 6. P. 413-444.
24. *Rial J.A., Saltzman N. G., Ling H.* Earthquake-induced resonance in sedimentary basins // *American Scientist*. 1992. V. 80. P. 566-578.
25. *Smith D.L., Evans B.* Diffusional crack healing in quartz // *J. Geophys. Res.* 1984. V. 89. № B6. P. 4125-4135.
26. *Somerville P., Saika C., Wald D., Graves R.* Implications of the Northridge earthquake for strong ground motions from thrust faults // *BSSA*. 1996. V. 86. № 1B. P. S115-S125.
27. *Wald D.J., Heaton T.H., Hudnut K.W.* The slip history of the 1994 Northridge, California, earthquake determined from strong-motion, teleseismic, GPS and leveling data // *BSSA*. 1996. V. 86. № 1B. P. S49-S70.

Подписи к рисункам статьи Кузнецова В.В. «Ударно-волновая модель землетрясения».

Рис. 1. Когерентное сложение Р-волн (в точке О) от раскрывающихся трещин (1, 2, 3, 4 – широкие вертикальные полосы, тонкие полосы - микротрещины) при распространении S-волны.

Рис. 2. Изменение угла образования трещин при вариации характера нагрузки на среду: *a* - вертикальная, литостатическая; *b* - литостатическая + боковая; *c* - литостатическая + “под углом”; *d* - то же, что “*b*” + дополнительная, внешняя. Дальний порядок и пространственная когерентность возникают в случаях: “*b*, *c*” и “*d*”. 1 - направление действия нагрузки; 2 - положение трещины и ее направление; 3 - направление пространственной когерентности.

Рис. 3. Волновая картина формирования ударной волны (УВ) и ее распространение к поверхности Земли и вдоль нее. 1 - геологическое тело; 2 - земная кора; 3 – поверхность; 4 - фронт УВ; 5 - фронт волны разрежения (ВР); 6 - кривая распределения скоростей Р-волн по глубине.

Рис. 4. Выход ударной волны на свободную поверхность под углом. Обозначения те же, что на рис. 3. Объяснения в тексте.

Рис. 5. Выход ударной волны, нормальной к свободной земной поверхности. Обозначения те же, что на рис. 3. Объяснения в тексте.

EARTHQUAKE'S SHOCK-WAVE MODEL

Kuznetsov VV.

*Institute of Geophysics, Siberian Branch, Russian Academy of Science,
Novosibirsk, 630090, Russia*

The earthquake's shock-wave model as a principle new hypothesis including the description of physics of the earthquake is suggested. Its essence is, that the shock wave is generated inside the Earth depths, this wave is passing through the lithosphere forming the center, then it runs to the Earth surface and the wave is reflected from it initiating disructures, breaks and fractures on the surface of the Earth. According to this model, the seismic center consists in a certain volume of the acoustically coherent active medium with the long-range order, in which the shock wave is formed and then it is spreading with amplification. The shock wave is splitting at the acoustic boundaries of the center, thus the body waves are initiated. At an output of the shock wave to the surface of the Earth, it is reflected and then it leaves deep into of Earth. At the shock wave reflection, others waves are formed, for the most part they are surface waves with high amplitude: "plastic" waves, waves of relief and tension, etc.

The interactions of these waves with the shock wave and among themselves on the surface, produce distructions, disructures, displaces, i.e. phenomena of a ground quake. According to the model, the shock wave, as the break off solution on a stationary acoustic background is formed at the Earth depths through the arising of the long-range order and the embodying of the mechanism of coherent avalanche-type cracks formation. The interaction of the acoustic waves caused by the formation under quite particular requirements of their spreading, can give in the occurrence of so-called centralized waves. These waves are formed at the expense of embodying of the phenomenon of a crossing of the one-type characteristics. At the spreading of the centralized wave through the geological medium, the disructures in its characteristics (pressure and density) occur , i.e. there is a generation of a shock wave inside the medium, in which originally there were no disructures .

The variants of the phenomenon of the output of the shock wave to a surface are surveyed, the relationship between the model and as the characteristics of the earthquake as problem of its forecast is defined.

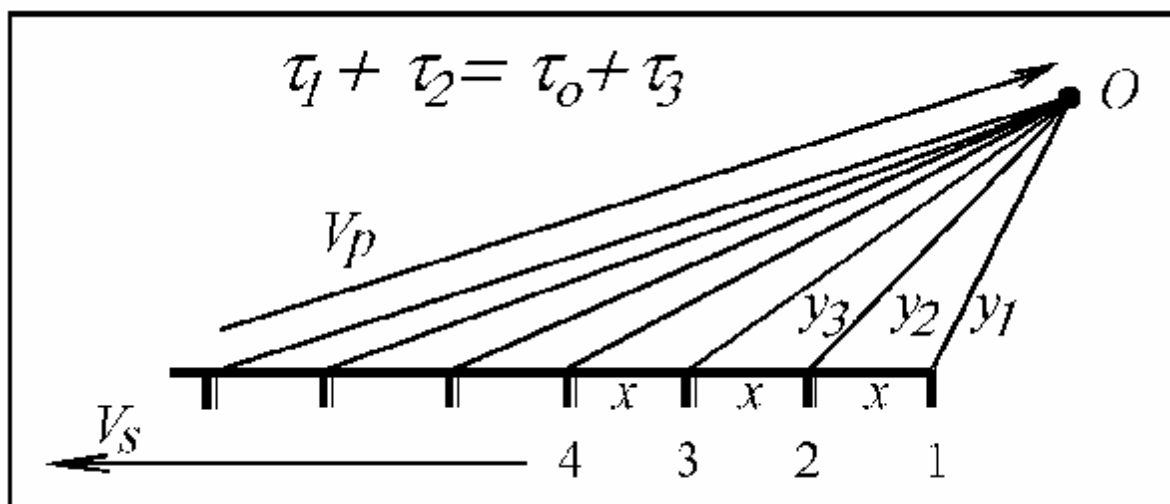


Рис. 1

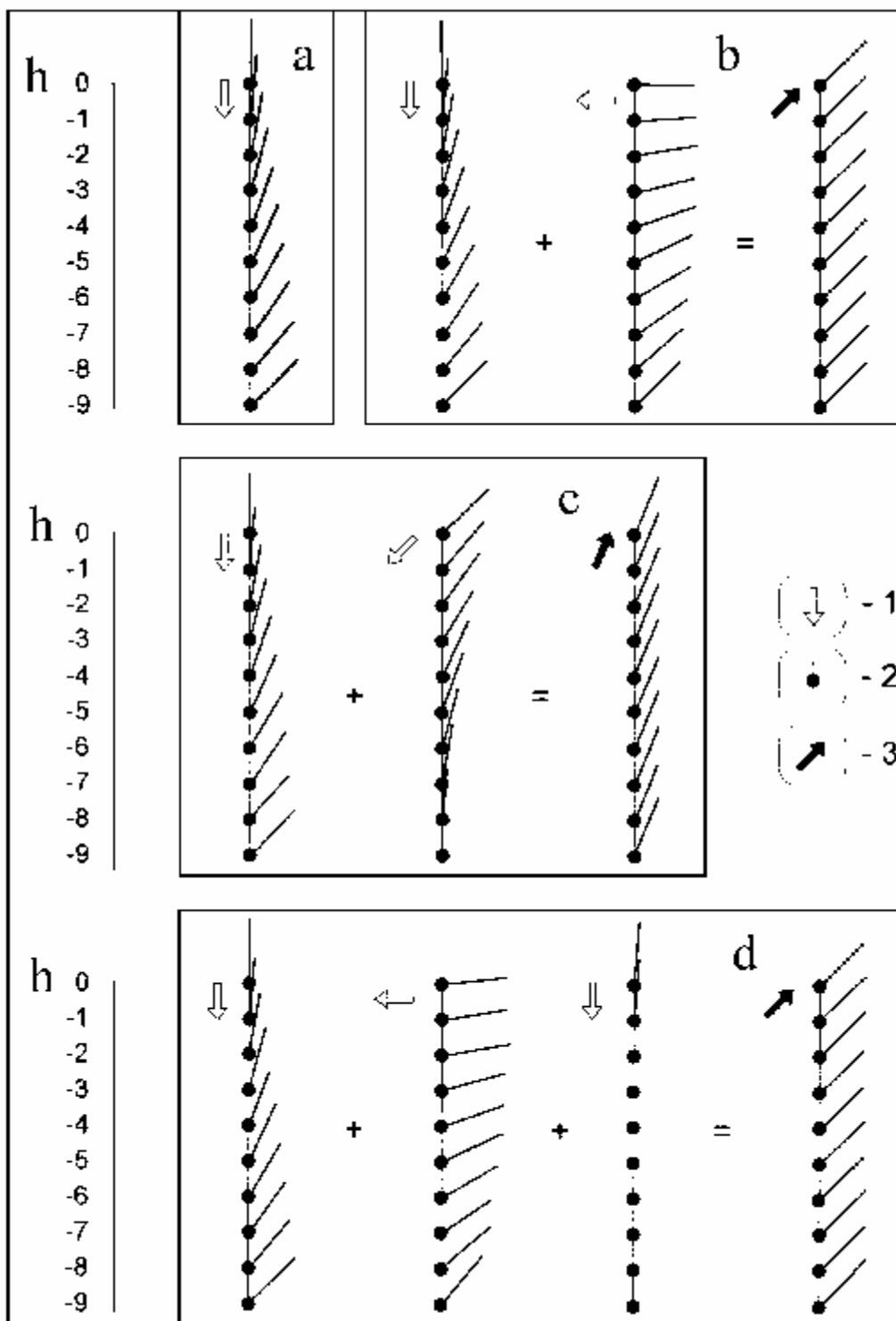


Рис. 2

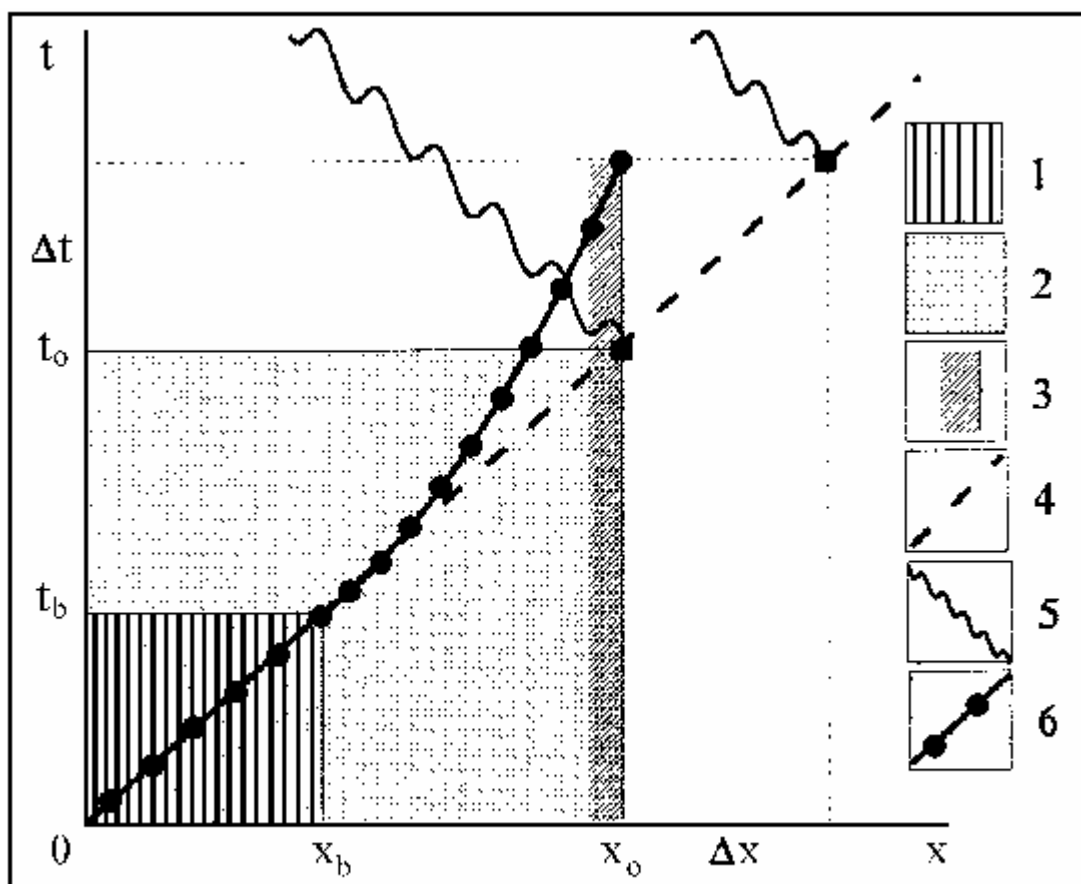


Рис. 3

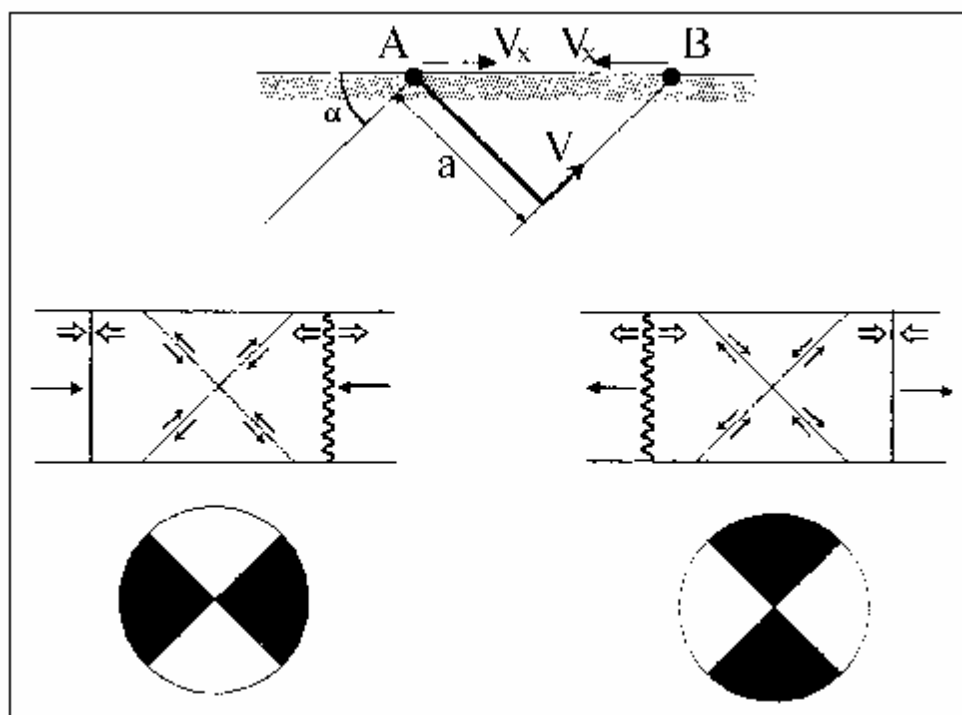


Рис. 4

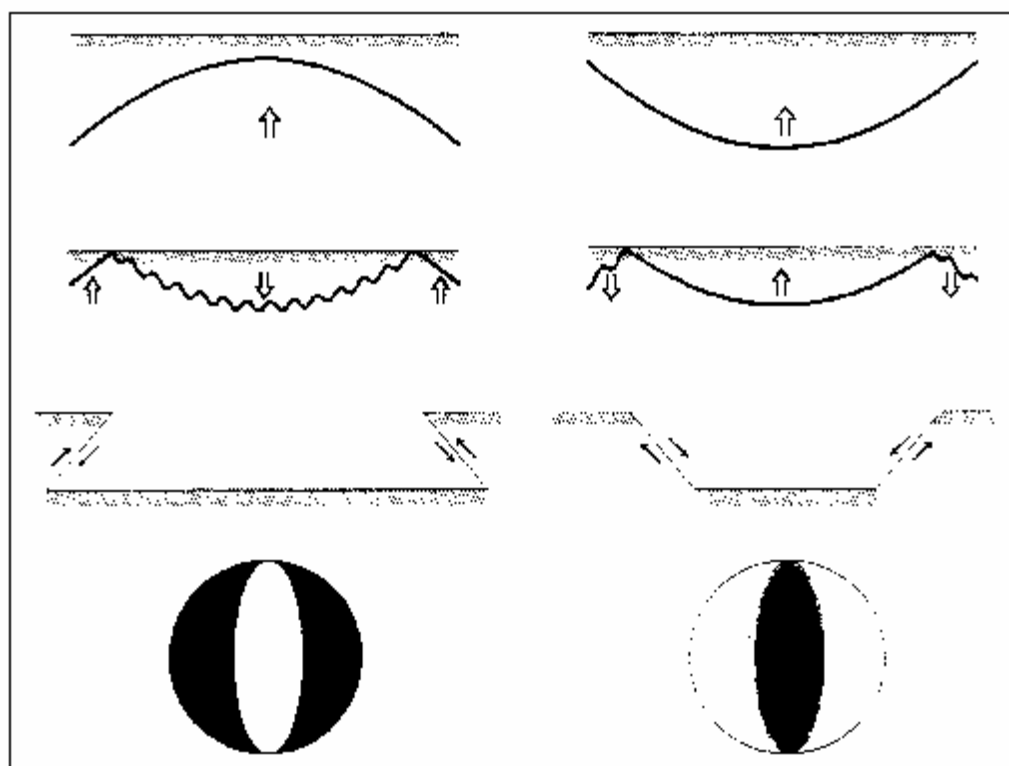


Рис. 5