

УДК 550.34+550.371

## МОДЕЛЬ СИЛЬНЫХ ДВИЖЕНИЙ В ЭПИЦЕНТРЕ ЧУЙСКОГО ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ КАК СЛЕДСТВИЕ ВЫХОДА УДАРНОЙ ВОЛНЫ НА ПОВЕРХНОСТЬ ЗЕМЛИ

В.В. Кузнецов

Институт космофизических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН,  
п. Паратунка, Камчатская обл. 684034, Институт геофизики СО РАН, г. Новосибирск.

**Аннотация.** Предлагается модель сильных движений грунта в рамках разрабатываемой автором ударно-волновой модели землетрясения. Известная в физике высоких плотностей энергии информация о поведении твердого вещества при выходе на его поверхность ударной волны, возникновении при этом волны разрежения, а так же физика взаимодействия этих волн представлены в контексте этой модели. Результатом взаимодействия ударной волны с волной разрежения является образование разрывов на поверхности, вспучивание поверхности твердого тела, возникновение сложной картины сильных движений поверхностного слоя. Получены оценки эффектов.

*землетрясение - сильные движения – ударно-волновая модель*

**Abstract.** The supposed model of soil strong motions, the well-known information in physics of the high-density energy namely the solid conditions evolved from the shock wave run up to its surface with the reposition wave raising and the waves interaction mechanism are discussed in the context of the earthquake shock wave model developed by the author. Interaction between shock and reposition waves causes solid surface ruptures, heaving and compound pattern of strong motions of the surface layer. The actions are estimated. (V.V. Kuznetsov. **A MODEL OF STRONG MOTIONS RAISED BY THE SHOCK WAVE RUN UP TO THE EARTH SURFACE AT THE CHUISKY EARTHQUAKE EPICENTRE**).

*earthquake – strong motion – shock-wave model*

### Чуйское землетрясение на Горном Алтае (M = 7.5, 03/09/27)

На юге Горного Алтая на территории Кош-Агачского района 27 сентября 2003 г. в 11 час. 33 мин. по Гринвичу произошло сильное землетрясение с магнитудой 7.5 (по оценке ГС СОРАН и 7.3 – по оценке ГС РАН), которое произвело значительные разрушения в селах Бельтир (8 баллов), Чаган-Узун, Ортолык, Курай, Акташ (6-7 баллов). Очаг землетрясения располагался в пределах Северо-Чуйского хребта, Чуйской и Курайской межгорных впадин и разделяющего их Чаган-Узунского приподнятого блока.

Землетрясение сопровождалось многочисленными афтершоками. Наиболее сильные из них два: первый - 27.09.03 в 18 час. 52 мин. по Гринвичу с магнитудой M = 6.4 и второй - 1.10.03 в 1ч. 03 мин.28 сек. по Гринвичу с магнитудой 7.0. Главный удар афтершока 1 октября произошел в районе пос. Акташ (место расположения сейсмостанции), где отмечались повреждения зданий 7-ми, 8-ми бальной интенсивности.

Магнитуды, координаты, а так же глубины гипоцентров, основного толчка и двух афтершоков, согласно данным Международной Сейсмологической сети USGS, National Earthquake Information Center: 1) 2003/09/27 11:33 M 7.5 Z = 18 км 50.06N 87.73E; 2) 2003/09/27 18:52 M 6.3 Z = 33 км 50.08N 87.81E; 3) 2003/10/01 01:03 M 6.7 Z = 10 км 50.19N 87.67E. Наибольший интерес для нас представляют точные параметры Главного удара. По предварительным данным Геофизической службы СО РАН, при использовании сети сейсмостанций Алтае-Саянской опытно-методической сейсмологической экспедиции (АСОМСЭ), его координаты: 49.8N 88.3E, что значительно отличается от данных международной сети. Согласно уточненным АСОМСЭ данным, координаты гипоцентра Главного удара: 50.09N 87.98E, глубина 18 км. В АСОМСЭ уточнены глубины гипоцентров сильных

афтершоков, которые не превышают глубины основного толчка, т.е. меньше или равны 18 км.

Область первичных, сильных разрушений поверхности земли (область выхода очага на поверхность) изобразим в плане в виде прямоугольника со сторонами  $\approx 5 \times 20$  км<sup>2</sup>, причем, его 20-ти километровая сторона проецируется вдоль долины (разлома) Кускуннур.

Зная координаты гипоцентра и размер области афтершоков, а так же район основных разрушений, очаг землетрясения представим в виде параллелепипеда размером  $5 \times 20 \times 18$  км<sup>3</sup>, длинная грань которого ориентирована вдоль разлома Кускуннур, а его боковые поверхности наклонены к поверхности земли на угол примерно  $65^\circ$  в юго-западном направлении. В дальнейшем, при интерпретации результатов наблюдений сильных движений, будем использовать (как следует из заголовка статьи) ударно-волновую модель землетрясения. Из этой модели следует, что очаг землетрясения объемный, а габариты очага оцениваются из нижеследующих соображений. Глубина гипоцентра 18 км, расстояние, ограничивающее область основных разрушений вдоль разлома, порядка 20 км, поперек разлома – около 5 км. Область разрушений смещена относительно эпицентра землетрясения примерно на 5 км. Угол в  $65^\circ$  определяется глубиной гипоцентра и величиной этого смещения. Согласно нашей модели, главный удар Чуйского землетрясения пришелся под этим углом к поверхности. Это означает, что фронт ударной волны относительно плоскости поверхности земли был не параллелен ей, что соответствовало бы углу прихода  $90^\circ$ , а подходил к поверхности под углом около  $25^\circ$  ( $90^\circ - 65^\circ$ ). Два главных афтершока Чуйского землетрясения внесли свой «вклад» в сильные движения грунта, однако, оценить направления главных ударов этих землетрясений с желаемой точностью, вероятнее всего, не удастся. Судя по характеру афтершоков и особенностям разрушений (со слов очевидцев), направления главных ударов этих землетрясений отличались от направления главного толчка. Их наиболее вероятные направления: второго, – на северо-восток, в направлении с. Чаган-Узун; третьего, – на северо-запад, вдоль по разлому Кускуннур, в направлении альплагеря Актру (см. рис. 1).

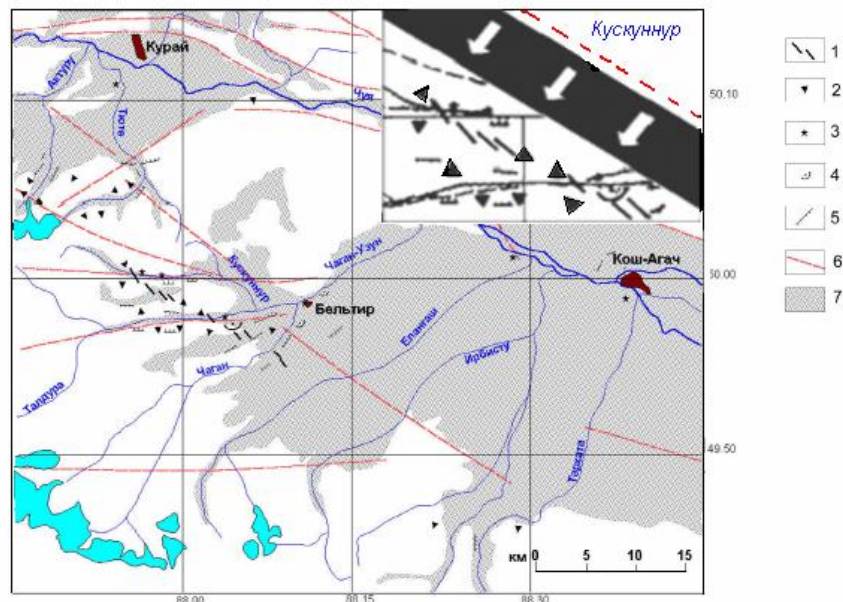


Рис. 1. Карта распространения сейсмодислокаций [1]: 1 – сеймотектонические разрывы; 2 – обвалы и осыпи; 3 – разжижения грунта; 4 – оползни; 5 – сейсмогравитационные трещины отрыва и оседания; 6 – разломы; 7 – озерные и ледниковые отложения. В верхнем правом углу схема, на которой белыми стрелками отмечено направление главного удара землетрясения, и область очага, обозначенная черной заливкой, показывающей расположение гипоцентров афтершоков. Прерывистая линия показывает разлом Кускуннур.

Чуйское землетрясение 2003 произошло в районе разлома Кускуннур (координаты гипоцентра Главного удара: 50.09° N, 87.98° E), по всей видимости, не случайно. Известно, что 9 декабря 1761 г. практически в том же районе произошло Монгольское землетрясение (M = 7.7; 50.0° N, 90.0° E), координаты которого совпадают с координатами Чуйского землетрясения. Из описания Монгольского землетрясения: «удары шли с востока на запад» - в Семипалатинске, «от зюйд-веста к осту» - в Красноярске и Барнауле; в Бийске – «с западу на восток»; в Томске - «землетрясения не происходило» [2] следует, что оба этих землетрясения в отдаленных пунктах проявлялись примерно одинаково. Согласно данным, приведенным в [3] координаты этих землетрясений заметно различались. Однако, если совпадение координат Чуйского 2003 и Монгольского 1761 г. все же имело место, то это дает основание полагать, что они произошли практически в одном и том же районе и, по-видимому, на одной и той же глубине. В этом случае подтверждается бытующее среди сейсмологов мнение, что землетрясения происходят в одних и тех же местах, в которых геологическая среда способна «сбросить сейсмическую энергию» такого высокого уровня, и уже «делала» это раньше. Иначе, создавая теоретические модели землетрясения, следовало бы более внимательно изучать очаги произошедших ранее разрушительных землетрясений.

### **Основы ударно-волновой модели землетрясения.**

Ударно-волновая модель землетрясения базируется на трех взаимосвязанных концепциях. Во-первых, в тектонически напряженной геологической среде возникает когерентная структура, в которой происходит взаимодействие между раскрывающимися трещинами и генерируемыми при этом звуковыми импульсами, причем таким образом, что испускаемый раскрывающейся трещиной звуковой импульс, рассеиваясь на микротрещине, «помогает» ей раскрыться. Микротрещина, раскрываясь, генерирует следующий импульс, который способствует раскрытию другой трещины и т.д. Возникает процесс лавинного образования трещин. В этом процессе звуковые импульсы способны когерентно складываться в области гипоцентра землетрясения, что может привести к возникновению (генерации) ударной волны. Процесс лавинного образования трещин, по-видимому, не единственный способ возникновения когерентной структуры в недрах Земли. На больших глубинах, где вещество Земли находится в состоянии, больше соответствующем жидкости, чем упругому телу, аналогичное взаимодействие может возникать между кавитирующими пузырьками и звуковыми импульсами, возникающими при их «схлопывании». Есть основания считать, что в подобных когерентных средах может возникнуть звуковое излучение, аналогичное, по сути, оптическому сверхизлучению, предсказанному Дикке [4] и реализованному в последствии в лазерах.

Во-вторых, как отмечалось, в результате когерентного взаимодействия - сложения звуковых волн очень большого количества трещин, в акустически активной среде может возникнуть т.н. разрыв термодинамических характеристик, что приводит к образованию ударной волны. В процессе транспортировки ударной волны из области её генерации (гипоцентра землетрясения) к поверхности земли, волна рассеивается (расщепляется) на неоднородностях среды, вызывая при этом излучение объемных сейсмических волн. Кроме этого, ударная волна сжатия, распространяясь по очагу, залечивает (захлопывает) существовавшие в геологическом теле трещины и микроразрывы, после чего эта среда становится способной к последующей генерации афтершоков - т.е. землетрясений, «стимулированных» главным ударом. Продолжая аналогию с оптикой, можно полагать, что афтершоковый режим является акустическим аналогом фосфоресценции (флюоресценции), возникающей в оптической среде после прохождения через неё сильного светового импульса.

И, наконец, в-третьих, ударная волна, выходя на поверхность Земли, отражается, образуя волну разрежения. Взаимодействие ударных волн с волнами разрежения приводит к возникновению разрывов поверхности, относительному смещению, вспучиванию и проседанию почвы, образованию т.н. «земляных волн» и пр. явлений, объединяемых

общим понятием «сильные движения» при землетрясении. Другой, используемый в сейсмологии термин, соответствующий этим явлениям, носит название макросейсмика [5].

Настоящая работа посвящена обсуждению третьей части модели в применении к сильным движениям Чуйского землетрясения. Две первых части ударно-волновой модели землетрясения в той или иной степени обсуждены в работах [6, 7]. Имеются ли достаточные экспериментальные данные и физическая модель, подтверждающие правомерность первых двух? Действительно, некоторые данные имеются, хотя пока ударно-волновая модель землетрясения ещё не воспринимается сейсмологами. В подтверждение сказанному сошлемся на результаты лабораторных экспериментов, проводимых при обжати образцов горных пород на прессах [8 -11]. Авторами этих работ неоднократно наблюдалось явление самопроизвольного усиления интенсивности акустической эмиссии, которое затем, так же самопроизвольно, - прекращалось. В работе [12] делается попытка найти объяснение этому явлению с точки зрения самоорганизации когерентной структуры на основе взаимодействия звуковых волн с раскрывающимися трещинами. Высказывается предположение, что эффект усиления акустической эмиссии имеет некоторую общность с оптическим сверхизлучением. Любопытный факт, досконально исследованный в [11], состоит в том, что эффекты акустического сверхизлучения происходят далеко не во всех типах горных пород. Так, например, изучение режимов акустической эмиссии гранитов двух различных типов, внешне практически не отличающихся один от другого, показало, что при нагружении образцов на прессах, они ведут себя по-разному. На серии образцов гранита из одного месторождения эффект резкого усиления интенсивности акустической эмиссии, названной нами акустическим сверхизлучением, постоянно присутствует, однако, на серии образцов гранитов другого типа – эффекта нет. Этот результат, неоднократно подтвержденный экспериментально, дает основание полагать, что и в земных недрах должны встречаться геологические тела, реология которых такова, что в них могут развиваться процессы самоорганизации и генерироваться, в конечном счете, землетрясение, а в других телах, на первый взгляд идентичных первым, таких явлений возникнуть не может.

Естественно, возникает вопрос, имеются ли данные о взаимодействии ударных волн и волн разрежения в грунте? Такие данные так же есть, например, сошлемся на работу, где описаны эксперименты, в которых наблюдалось явление разрушения (откола) грунта при отражении ударной волны от его поверхности и образование волны разрежения [13]. В этих экспериментах ударная волна создавалась при подрыве заряда взрывчатого вещества в скважине. Если волна разрежения по тем или иным причинам не возникала, не наблюдались и отколы. При заглаблении сейсмографа на два-три метра в грунт, волна разрежения на нем уже не регистрировалась, хотя при этом на поверхности наблюдались и эта волна и, связанные с её возникновением, - отколы. Этот результат подтверждает факт разрушений грунта только при появлении волны разрежения (разгрузки), а так же то, что эта волна, распространяясь по среде, быстро диссипирует.

## **Результаты предварительного изучения сильных движений Чуйского землетрясения**

Участники экспедиции в эпицентральную зону Чуйского землетрясения от Горно-Алтайского университета (время работы - первые числа октября) обнаружили трещины уже в с. Курай, а также по дороге на Актру. В Курае трещина шириной до 10 см и длиной порядка 100 м образовалась в районе болота на окраине села. По дороге на Актру (на рис. 1 река Актра) трещины наблюдались обычно вдоль крутых откосов, ширина их была 1–2 см, длина не превышала 5 м. Похожие трещины, но большей протяженности наблюдались на Чуйском тракте в районе Чаган-Узуна (Чаган на рис. 1). На въезде в с. Бельтир, в результате оползня было порвано дорожное полотно (этот случай широко известен благодаря снимкам в прессе). Одна из трещин прошла через с. Бельтир, вдоль ул. Москанова, значительно повредив дома, которые на нее попали. Ширина трещины (провала) от 1 до 5 м, глубина проседания грунта – от 0.5 м до 1 м. Были обследованы несколько трещин протяженностью порядка 1 км на плато Ада-Кель (водораздел Елангаша и Чагана). Со слов местных жителей известно, что в эпицентре землетрясения в урочище

Арха-Узюк, в широкой седловине на водоразделе рек Талдура-Кускуннур образовалось два больших провала в направлении Карагема (нет на рис. 1) и разлома Кускуннур.

Наиболее подробно следы сильных движений, т.е. макросейсмические эффекты, изучены совместной группой Института физики Земли и Алтайского университета. Результаты предварительного изучения сильных движений Чуйского землетрясения 2003 представлены в [1]. В дальнейшем, в этом разделе будем в основном цитировать эту работу, иногда привлекая неопубликованные данные очевидцев. Нарушения рельефа, по оценке авторов [1], образуют овал длиной 70 км и шириной около 15 км. Этот овал вытянут вдоль простирания разрыва (СЗ-ЮВ) и хорошо коррелирует с ориентировкой длины оси овального облака эпицентров афтершоков. В центральной части этого овала располагается выделенная нами зона наиболее сильных движений. Концентрация вторичных сейсмодислокаций меняется, затухая по мере удаления от линейной вытянутой области выхода очага на земную поверхность.

Обсуждая итоги предварительных исследований сильных движений Чуйского землетрясения, будем следовать авторам [1], которые выделяют четыре вида нарушений: 1) сеймотектонические разрывы, 2) обвалы и оползни, 3) вспучивание и проседание почвы и 4) излияние воды и грязи на поверхность, и образование грифонов.

*Сеймотектонические разрывы, вспучивание и проседание почвы.*

Очаг землетрясения, в ходе вспарывания земной коры, «вышел на поверхность» в виде системы первичных сейсморазрывов, прослеженной на протяжении 20 км в бассейне р. Чаган-Узун на восточном погружении Северо-Чуйского хребта (рис. 2). Первичный характер разрывов характеризуется их морфологией и то, что эти трещины представляют собой систему параллельных рвов, секущих различные формы рельефа. Эта система вытянута в северо-западном направлении на протяжении 20 км.

Сеймотектонические разрывы представляют собой эшелонированную систему трещин сжатия и расширения, укладывающуюся в линию СЗ простирания. Такая структура сеймотектонического разрыва, по мнению авторов [1], характеризует подвижку в очаге как сдвиг в горизонтальной плоскости. Строение зоны сейсморазрывов несколько отличается для различных участков. Так, например, на водоразделе рек Чаган и Елангаш разрыв разветвляется на две основных трещины, которые затем смыкаются, представляясь трещинами СЗ ориентировки (рис. 2-а). По западной ветви разрывов наблюдается правостороннее смещение на 0.5 м, по восточной, - смещение достигает 0.2 м. Блок, заключенный между этими рвами, опущен на 0.2-0.3 м и рассечен многочисленными диагональными трещинами. Поперечные разрывы перемежаются вспучиваниями и напозанием почвы высотой 0.3-0.7 м. Картина разрушений в долине реки Талтуры несколько отличается. Здесь алювиальные отложения рассечены рвами шириной до 2 м и длиной до 50 м. и закрытыми трещинами с амплитудой правого сдвига 0.1-0.2 м. Трещины сопровождаются линейными зонами с вздыбленной на высоту до 0.5 м почвой. Наиболее впечатляющие сеймотектонические разрывы деформировали земную поверхность в широкой седловине на водоразделе рек Талтура-Кускуннур. Ширина седловины составляет около 4 км, сложена она отложениями морены среднего плейстоцена. Зона сейсморазрывов здесь имеет субширотное простирание. Сами сейсморазрывы выстраиваются в эшелонированную систему зияющих рвов, смыкающихся линейными зонами сжатия (рис 2-б). Сейсморвы в этой районе принимают колоссальные масштабы, характеризуясь шириной до 10 м, длиной до 50 м и глубиной более 10 м. По отдельным зияющим разрывам амплитуда правого сдвига составляет 0.5 м. Зоны сжатия здесь представляют собой валы вспучивания высотой до 2 м и длиной до 50 м и надвиги, сдваивающие слой почвы. Сейсморазрывы разветвляются на две ветви и зажимают между собой просевшие блоки (микрограбены). На восточном борту седловины ширина такого микрограбена составляет не более 50 м, а амплитуда опускания около 0.5 м. На западном склоне просевший блок имеет ширину до 500 м и он опущен с амплитудой до 2.5 м. Авторы отмечают, что в зоне

эпицентра Чуйского землетрясения находятся следы предыдущих землетрясений (возможно, так же и Монгольского землетрясения 1761 г). Землетрясения, происходившие ранее, так же как современные, были следствием разрядки одного и того же очага. Чуйское землетрясение, по всей видимости, не является уникальным, - оно лишь несколько «обновило» следы прошлых, возможно, более сильных землетрясений. Этот факт однозначно демонстрирует, что очаг сильного землетрясения оказывается «привязанным» к определенной геологической структуре.

#### Обвалы и оползни.

Одно из наиболее эффектных и впечатляющих последствий Чуйского землетрясения находится в урочище Арха-Узюк, на правом берегу реки Талдура, где произошло нарушение рыхлого осадочного чехла на склоне, ослабленном вечной мерзлотой. После землетрясения в этом районе сошел оползень шириной около 1 км, вся его поверхность при этом была разбита сетью трещин шириной 1–3 м и глубиной до 10 м и более. Рядом с оползнем образовались ряд трещин сходных размеров. Несколько трещин прошло вдоль по хребту. В дальнейшем возможно сползание блоков, на которые эти трещины разбили склон. Само название места (в переводе – «оборванный лес») говорит о том, что подобное явление там наблюдается не в первый раз. По-видимому, это самый масштабный след землетрясения – крупный оползень на правом берегу реки Талдура, он приурочен к зоне выхода очага на поверхность, причем стенка отрыва оползневых масс точно ложится в зону распространения первичных сейсморазрывов, один из которых, по мнению авторов, мог служить «заколом» на поверхности склона, инициировав при этом, сход оползня. Оползень отсел по стенке отрыва высотой около 150 м и продвинулся в долину на расстояние не меньше 100 м. Объем оползневой массы по приблизительным подсчетам составляет около 30 млн. м<sup>3</sup>. Ширина оползневого тела более 500, длина – около 700 м. Подобные оползни меньших масштабов образовались на склонах долин рек Чаган и Чаган-Узун. Образовавшиеся сейсморазрывы «вскрыли» зону вечной мерзлоты.

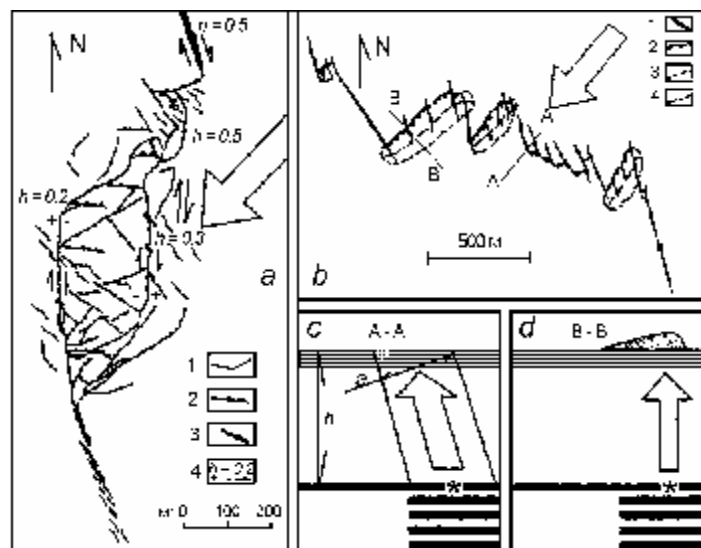


Рис. 2. Слева: (а) структура сейсморазрыва на водоразделе рек Чаган и Елангаш [1]: 1 – закрытые трещины и разрывы, 2 – валы вспучивания, 3 – сейсморвы, 4 – амплитуда (м) и направления смещения. Большая стрелка – направление главного удара, параллельные стрелки – направления подвижек почвы. Справа сверху: (b) структура сейсморазрыва на водоразделе р. Талдура-Кускуннур. 1 – сейсморвы; 2 - бровки валов вспучивания; 3 – контуры валов вспучивания; 4 – оси валов вспучивания [1]. Справа внизу: (с, d) разрезы по А-А и В-В, звездочка – гипоцентр, стрелка – направление главного удара, а - фронт УВ.

Основной толчок и самые сильные афтершоки землетрясения сопровождалась массовыми обвалами и осыпными явлениями. Часто обвалы наблюдались на склонах, с углом



наклона, менее угла естественного откоса ( $25^\circ$ ). В отложениях осыпей долины р. Актру наблюдается аномальное распределение обломков разной величины: в верхней части большинства осыпных конусов сконцентрированы наиболее крупные обломки, что свидетельствует о развитии импульсных обвальных явлений.

#### *Грифоны.*

Одним из характерных явлений, сопутствующих этому землетрясению, являются выбросы и разливы разжиженного песка и грязи в виде грифонов или грязевых вулканчиков. Приурочены они в основном к низменным водонасыщенным, рыхлым породам (глины, суглинки, пески), способным при динамических воздействиях, в частности при землетрясениях 7 и более баллов, «разжижаться» до текучего состояния и изливаться на поверхность. При этом образуются грифоны в виде конических или песчанно-глинистых «вулканчиков» воронкообразной формы. Авторы [1] описывают грифоны, в которых наблюдается выброс глины на поверхность в виде слоя толщиной не менее одного метра и занимаемой площадью около  $50 \text{ м}^2$ . Объем песчанно-глинистой грязевой массы такого грифона, без учета ушедшей воды, значительно больше, он превышает  $1000 \text{ куб. м}$ . Количество грифонов в эпицентральной зоне никто не подсчитывал, по общему впечатлению, грифонов очень много. Известно, что грифоны бывают не только грязевые, а так же пылевые и песочно-пылевые «вулканчики», которые неоднократно наблюдались во время Ташкентского землетрясения 1966 г.

По информации от очевидцев в долине Чагана высота фонтана фонтанирующих источников достигала 5 м, в Бельтире и Ортолыке - 2 м, в Чаган-Узуне, Курае, Джазаторе, на стоянке в 2 км западнее Мухор-Тархаты - 0.5 м. Воронки проседания на месте фонтанов составляли: в долине Чагана от 2 до 8 м, в долине Талтуры - 2.5 м, в Бельтире - 1,5 м, в Ортолыке 2м, в прочих местах 0,1 - 0,3 м. Источники фонтанировали в течение 1-5 часов после толчка, затем шло спокойное излияние с пульсацией, усиливающееся при повторных толчках. В долине Чагана, на оси зоны сейсморазрывов, по словам чабанов, приводимыми этим авторами, фонтан высотой 5 м, образовавшийся в 150 м от стоянки, бил 1-2 часа, выбрасывая песок, гравий и крупную гальку (примесь ее до 30% в выбросе). Конус выноса достигал 60 м в диаметре. В Бельтире (на стадионе) и долине Талтуры в результате выбросов образовались грязевые озера площадью в 10000 и 6000 кв.м соответственно. Уровень воды в реках повысился, то есть очень сильно усилилось излияние вод из-под земли. В озере Огырак-Кель, расположенном на окраине Бельтира в первое время после толчка уровень воды поднялся на 1м, в первые минуты после толчка вода бурлила.

В заключение этого раздела отметим важную геологическую особенность района, о которой мы упоминали выше, и которую необходимо учитывать при построении модели сильных движений. Эта особенность состоит в том, что сильные движения в основном происходят в слое грунта толщиной не более 20-30м, а нижней границей слоя является верхняя граница вечной мерзлоты. Известно, что верхняя граница вечной мерзлоты фиксируется примерно на следующих глубинах: 6–10 м - в районе Бельтира, 9–13 м - в районе Кош-Агача, 2–3 м - в урочище Узюк. Мощность (толщина) слоя мерзлоты составляет от 45–75 до 400 м.

### **Общие закономерности при выходе ударной волны на поверхность Земли**

*Основные соотношения для ударных волн (УВ) [14 – 16]:*

Закон сохранения массы:

$$\rho_0 D = \rho_n (D - u_n) \text{ или } u_n + \varepsilon D = 0,$$

где  $\rho_n$  – плотность вещества на фронте волны,  $\rho_0$  - невозмущенная плотность,  $D$  – скорость распространения фронта волны,  $u_n$  - скорость течения среды за фронтом ударной волны.

Закон сохранения импульса:

$$- \sigma_n = p_n - p_0 = \rho_0 u_n D,$$

где  $p_0$  – начальное давление среды (до прохождения ударной волны),  $p_n$  – давление на фронте ударной волны.

Уравнение сохранения энергии имеет классический вид:

$$E_n - E_0 = \frac{1}{2}(p_n - p_0)(v_0 - v_n),$$

где  $E_0$  и  $E_n$  – внутренняя энергия до фронта ударной волны и за её фронтом,  $v_0$  и  $v_n$ , соответственно, – удельные объемы ( $v = 1/\rho$ ).

В неподвижной среде ( $u_0 = 0$ ) соотношения скоростей на фронте ударной волны представляются в виде:

$$\begin{aligned} D &= [\rho/\rho_0 (p - p_0) / (\rho - \rho_0)]^{1/2}, \\ u &= [1/\rho \rho_0 (p - p_0) (\rho - \rho_0)]^{1/2}. \end{aligned} \quad (1)$$

Уравнения (1) справедливы для сухого грунта. Если грунт водонасыщенный, то  $D$  и  $u$ , после подстановки уравнения состояния водонасыщенного грунта в виде [17]:

$$\rho = \rho_0 \{ \alpha_1 (p/p_0)^{-1/k_1} + \alpha_2 [k_2(p - p_0)/\rho_2 c_2^2 + 1]^{-1/k_2} + \alpha_3 [k_3(p - p_0)/\rho_3 c_3^2 + 1]^{-1/k_3} \}^{-1}$$

где  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$  – содержание компонент (по объему): воздуха, воды и твердого грунта, соответственно, ( $\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 = 0$ ),  $k_1, k_2, k_3$  – показатели изоэнтропы соответствующих компонентов; будут определяться следующим образом:

$$\begin{aligned} D^2 &= (p - p_0)/\rho_0 \{ 1 - \alpha_1 (p/p_0)^{-1/k_1} - \alpha_2 [k_2(p - p_0)/\rho_2 c_2^2 + 1]^{-1/k_2} \\ &\quad - \alpha_3 [k_3(p - p_0)/\rho_3 c_3^2 + 1]^{-1/k_3} \}^{-1}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} u^2 &= (p - p_0)/\rho_0 \{ 1 - \alpha_1 (p/p_0)^{-1/k_1} - \alpha_2 [k_2(p - p_0)/\rho_2 c_2^2 + 1]^{-1/k_2} \\ &\quad - \alpha_3 [k_3(p - p_0)/\rho_3 c_3^2 + 1]^{-1/k_3} \}. \end{aligned}$$

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

Экспериментально неоднократно отмечалось, что при прохождении УВ через среду происходит «разрыв» фронта (толщиной  $l$ ). Принято считать, что этот эффект связан с переходом среды в квазизидкое состояние, характеризующееся наличием у среды динамической вязкости [18]. Например, в пресованном порошке соли NaCl, при прохождении ударной волны ( $u = 10^3$  м/с,  $l = 10^{-3}$  м,  $\tau = 10^{-6}$  с) разрыв фронта соответствовал вязкости  $\eta = 10^4 - 10^5$  Пз. Вязкость сплошного материала каменной соли имеет порядок  $10^{14} - 10^{15}$  Пз, что на десять порядков меньше вязкости, наблюдаемой в ударных экспериментах. Можно оценить величину вязкости по параметрам колебательного неустойчивого характера сильных движений почвы при Нортриджском землетрясении 1994 г. При этом вертикальный размер пространства, на котором наблюдался колебательный процесс в эпицентре землетрясения:  $a \approx 1$  м, величина напряжения в главном толчке землетрясения:  $\sigma \approx 100$  бар, а скорость колебаний частиц грунта  $v$  достигала 1 м/с. Знание этих параметров позволяет оценить величину вязкости «жидкой» среды:  $\eta = \sigma a/v \approx 10^5 - 10^6$  Пз. Полученные оценки вязкости показывает, что вещество грунта в момент землетрясения в его эпицентре находится в «квазизидком» состоянии. (Речь идет о том, что в такой среде в момент её нагружения во время удара, величина деформации в зависимости «напряжение-деформация», находится в нелинейной области). Это обстоятельство позволяет воспользоваться формулами Эйлера, Навье-Стокса и Пуазейля для течения жидкости, соответственно:

$$\begin{aligned} dv/dt &= F - 1/\rho \text{ grad } p, \\ dv/dt &= F - 1/\rho \text{ grad } p + \chi dv, \\ v &= \int_S u dS, \end{aligned}$$

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

*Скорости волн.* Воспользуемся подходом, развитым для оценки скоростей перемещений частиц упругой среды под действием силы, приложенной в очаге землетрясения. Этот



подход был предложен Кейлисом-Бороком и развит Матуямой [19, с. 40]. Скорость перемещения в горизонтальной плоскости:

$$u = 1/4\pi r [\partial^2/\partial x^2 (\varphi - \psi) + \nabla^2 \psi],$$

где  $\varphi$  и  $\psi$  сферические волны вида:  $\varphi = (1/r) F[t - (r/V_P)]$ ;  $\psi = (1/r) F[t - (r/V_S)]$ . Эти волны распространяются на расстояние  $r$  со скоростями  $V_P$  и  $V_S$ , соответственно. Функция  $F(t)$  связана с силой  $f(t)$ :  $f(t) = d^2 F(t)/dt^2$ . Развитый Матуямой подход имеет значение для нашей ударно-волновой модели в том плане, что речь идет не прямо о Р- и S-волнах, а о волнах, имеющих скорости, близкие к скоростям распространения Р- и S-волн. Ударная волна, в твердом теле, как следует из [15] распространяется в зависимости от её интенсивности со скоростью  $D$ , причем:  $V_S \leq D \leq V_P$ .

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

### Особенности распространения ударных волн в грунтах

Приведем некоторые данные по особенностям распространения ударных (взрывных) волн в грунтах [15, 17]. При камуфлетном (подземном) взрыве наблюдается так называемое геометрическое подобие (скейлинг) по корню кубическому из энергии взрыва  $E$  [17]. Данные по многим параметрам движения среды при взрыве удается свести к универсальным зависимостям, если использовать в качестве линейного масштаба комбинацию  $(E/\rho c^2)^{1/3}$ . Большое количество проведенных экспериментов по изучению давления в ударной волне от расстояния и количества взрывчатого вещества подтверждает зависимость [17]:

$$p = p_0 (C^{1/3}/R),$$

где  $p_0$  – начальное давление в атм.,  $R$  – расстояние от взрыва до точки измерения в метрах,  $C$  – вес взрывчатого вещества в кг.

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

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

здесь  $K$  и  $\mu$ - коэффициенты, величины которых приведены в Таблице 1.

Для того чтобы перейти от веса взрывчатого вещества к энергии и применить формулу в нашей ситуации, воспользуемся соотношением между энергией и весом тротила. Известно, что удельная кинетическая энергия тротила равна 4 кДж/г. Положим, что сейсмическая энергия и энергии взрывчатых веществ эквивалентны. (Это не совсем точно, т.к. КПД источника не близок к 100%) Энергия землетрясения с магнитудой  $M = 7.5$  равна  $10^{23}$  эрг, ( $10^{13}$  кДж), что эквивалентно  $10^{12}$  г (одна мегатонна) тротила, тогда параметр  $C^{1/3} \approx 10^3$  кг<sup>-1/3</sup>. Давление  $p$  в очаге (на фронте ударной волны) Чуйского землетрясения ( $M = 7.5$ ), по-видимому, может достигать 1 кбар. Для сравнения, давление на фронте УВ (в нашей интерпретации) при Нортриджском землетрясении  $M = 6.7$ ,  $E = 10^{22}$  эрг, могло достигать 100 бар [19]. Давление на фронте ударной волны (волны сжатия) на расстоянии 650 км от очага, в Новосибирске, если принять самые высокие значения коэффициента  $K$  из Таблицы 1, оказывается порядка 1 бара. Очевидно, что эта оценка, по-видимому, наиболее высокая из всех возможных. Если, к примеру, параметр  $K$  будет меньше, а  $\mu$  – больше, то давление  $p$  будет меньше чем 1 бар (1 атмосфера) на несколько порядков.

Величина смещения грунта во время главного толчка Чуйского землетрясения, по данным, полученным А.Г.Филиной на Новосибирской сейсмостанции, составляет примерно 50 микрон. Зная величину смещения, можно попытаться оценить деформацию  $\varepsilon$ , производимую приходящей волной:  $\varepsilon \approx (1 - 5)10^{-3}$  из следующих ниже соображений. Согласно [17] величина напряжения  $\sigma$  водонасыщенного грунта, соответствующая  $\varepsilon = 0.1$ , составляет примерно 500 бар и эта величина возрастает линейно с ростом  $\varepsilon$ :  $\sigma \sim \varepsilon$ . Эта закономерность дает основание оценить  $\sigma = p \approx 5$  бар при  $\varepsilon \approx 10^{-3}$ . Аналогичная зависимость ( $\sigma \sim \varepsilon$ ) для вакуумированного песка приведена в [18], откуда следуют примерно те же цифры для величины  $\sigma$ . Скорость звука в таком грунте  $\approx 400$  м/с. По-видимому, реальная величина  $\sigma$  меньше, однако эти оценки показывают (при различных способах их получения) один порядок величин напряжения в волне. Скорость распространения волны, амплитуда которой составляет 5 бар от очага Алтайского землетрясения (в приближении, что волна плоская) до сейсмостанции Новосибирск, расположенной примерно в 650 км от очага равна 3.6 км/с. Это намного больше, чем местная (в грунте) скорость звука. Возникает вопрос, что это за волна (ударная или нет) приходит к сейсмостанции, расположенной так далеко (650 км) от очага землетрясения? Согласно представлениям, развиваемым в [17], волна такой амплитуды ударной быть не должна. Однако, если производная  $d^2\sigma/d\varepsilon^2 > 0$ , волну можно считать ударной вне зависимости от величины  $\sigma$  [17, стр. 52]. Там же показано, что если условие  $d^2\sigma/d\varepsilon^2 > 0$  не выполняется, - волну можно считать плоской волной сжатия, которая распространяется в упруго-пластической среде.

Таблица 1

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

### Явления на поверхности Земли, связанные с выходом на неё ударной волны

Акцентируем внимание на процессах, сопровождающих выход не слишком сильной ударной волны на поверхность (см. рис. 3). Выход наклонной к линии горизонта ударной волны изображен на рис. 3-1. Здесь фронт ударной волны, шириной  $a$ , двигающийся со скоростью  $c_0$ , подходит под углом  $\alpha$  к земной поверхности, вещество которой обладает плотностью  $\rho$ . Распространение ударной волны сопровождается сравнительно медленным движением сплошной среды с массовой скоростью  $u$ . Ударная волна отражается на участке АВ и уходит вниз со скоростью  $c_0$ . При отражении возникает быстро затухающая волна разгрузки (разрежения, растяжения), движение которой сопровождается перемещением вещества со скоростью  $u_0$ . Действие на грунт силы, связанной с перемещением массы с вертикальными (вверх) компонентами этих скоростей приводят к разуплотнению, расширению грунта и подъему его относительно начального уровня на высоту порядка метра, как это, например, наблюдалось при Чуйском [1] и Нортриджском землетрясениях [20].

На участке АВ может возникнуть система сил, направленных друг навстречу другу соответственно тому, как направлены горизонтальные компоненты массовых скоростей:  $u - u_0$  (рис. 3-4), либо  $u' - u'_0$  (рис. 3-6).

На рис. 3-2 изображено распределение плотности до (слева) и после выхода нормально падающей ударной волны (справа). Видно, что после выхода ударной волны и отражения её от поверхности, вещество с плотностью  $\rho_1$  (меньшей  $\rho_0$ ) находится выше начального уровня. Аналогичная картина представлена на рис. 3-3, где изображены скорости в нормально падающей ударной волне со скоростью  $c_0$  и массовые скорости  $u$  и  $u' \gg 2u$  до выхода ударной волны на поверхность (слева) и после её выхода на поверхность. На рисунках 3-5 и 3-7 изображены разломные диаграммы, соответствующие ситуациям, изображенным на рисунках 3-4 и 3-6. Темные секторы диаграмм показывают области сжатия, светлые – растяжения.

По данным сейсмологической сети ИОЦ ГС РАН определен механизм основного толчка Чуйского землетрясения, который практически совпадает с диаграммой, изображенной на рис. 3-5, что может говорить в пользу предлагаемой модели.

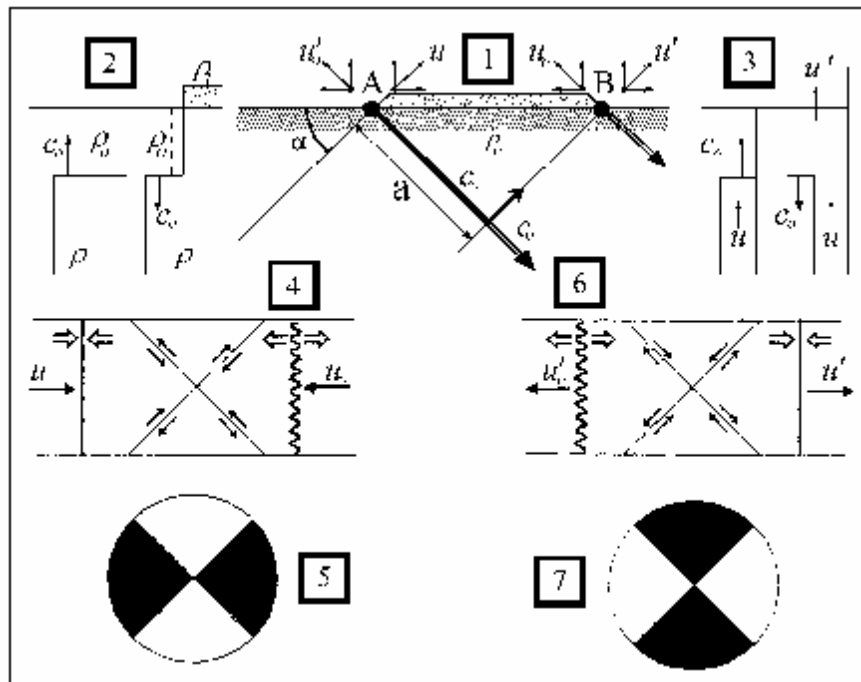


Рис. 3. Выход ударной волны (шириной  $a$ ) на поверхность Земли под углом  $\alpha$  к линии горизонта. Пояснения в тексте.

### Угол выхода ударной волны на поверхность

Гипоцентр Чуйского землетрясения по уточненным данным расположен на глубине 18 км. «Ось овала зоны активности» афтершоков практически совпадает с разломом Кускунур. Область первичных разрушений отстоит от этого разлома примерно на 5-7 км. Это может означать, что главный удар землетрясения (его очаг) выходит на поверхность под углом порядка 65 градусов. Несовпадение области эпицентра землетрясения с эпицентром разрушений является свойством многих землетрясений. Например, в уже упоминаемом выше Нортриджском землетрясении угол, под которым происходил главный удар, составлял примерно 40 градусов. Величину этого угла можно оценить таким же способом, а можно по анализу пространственной структуры расположения афтершоков [23]. Обе оценки совпадают.

Рассмотрим, к каким выводам можно прийти, если известна величина этого угла. Как следует из ударно-волновой модели, в сейсмически активной, напряженной геологической среде кроме литостатической нагрузки должна быть еще одна (или несколько) других напряжений, которые, взаимодействуя со средой, приводят её в некоторое, названное нами, - когерентное состояние. Если среда находится в таком состоянии, то в ней может развиваться процесс лавинного образования трещин и генерации при этом акустических волн, которые, взаимодействуя с трещинами, помогают им раскрыться в едином процессе. В результате, в среде может возникнуть разрыв характеристик среды (например, плотности) и образоваться ударная волна. Угол выхода ударной волны на поверхность не случаен. Он определяется рядом обстоятельств, связанных с характером нагрузок и реологией среды: Во-первых, это литостатическая нагрузка, величина которой пропорциональна глубине. Она приводит к возникновению трещин, углы раскрытия которых относительно вектора напряжений, направлены, согласно закона Кулона-Мора (см. рис. 4-а). В среде, напряженной только литостатическим давлением, углы раскрытия трещин сильно различаются по глубине. В такой ситуации когерентной структуры возникнуть не может. К литостатической нагрузке «добавим» напряжение, возникающее в результате приложения силы, действующей в горизонтальном направлении. Если распределение нагрузки окажется таким, что в результате сложения литостатической и боковой, углы раскрытия трещин окажутся одинаковыми и направленными примерно под углом в 45 градусов, то и ударная волна подойдет к поверхности Земли снизу под этим углом к горизонту (рис. 4-б).

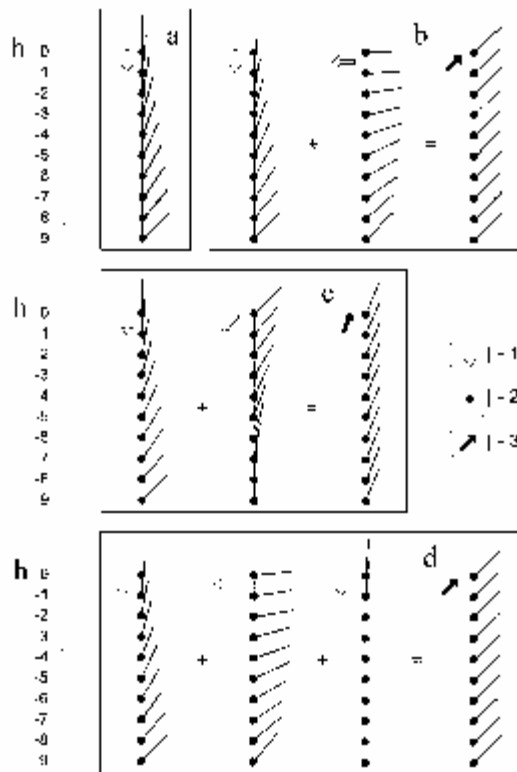


Рис. 4. Изменение угла образования трещин при вариации характера нагрузки на среду: а - вертикальная, литостатическая; б - литостатическая + боковая; с - литостатическая + "под углом"; д - то же, что "б" + дополнительная, внешняя. Дальний порядок и пространственная когерентность возникают в случаях: "б, с" и "д". 1 - направление действия нагрузки; 2 - положение трещины и ее направление; 3 - направление пространственной когерентности.

Представим себе, что в формировании угла выхода ударной волны, иначе, выхода основного удара - «угла когерентности» принимает участие напряжение, действующее под углом к поверхности Земли. Это напряжение может быть, связано, например, с влиянием разломов (рис. 4-с). В этом случае угол выхода ударной волны оказывается больше чем

45 ° и приближается к углу 90°. На рис. 4-d изображена ситуация, в которой когерентность среды достигается путем небольшой добавки, обязанной, например, действию атмосферных возмущений, или влиянию лунных приливов и пр. Эту ситуацию принято считать триггерным эффектом.

Таким образом, угол когерентности, это угол относительно поверхности Земли, определяющий направление раскрытия трещин и распространения волн, которые участвуют в раскрытии этих трещин.

### Взаимодействие волн, возникающих при выходе ударной волны на поверхность

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  $x$ - $t$  диаграмме, где  $x$  - координата, а  $t$  - время. Обозначим:  $x_0$ ,  $t_0$  - координату (глубину гипоцентра) и время формирования ударной волны в геологическом теле (см. рис. 5). Предположим, что в земной коре, на глубине между  $x = 0$  и  $x = x_0$ , и, далее, до  $x_1$ , находится геологическое «тело», обладающее определенными уникальными акустическими 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 ( $\rho c$ ). На таких неоднородностях происходит рассеяние (расщепление) УВ и генерация объемных волн. Характер нагрузки (напряжений) тела (в-третьих) должен быть таким, чтобы в нем могла возникнуть пространственно когерентная структура микротрещин или, иначе, - возникнуть (на языке физики когерентных структур) 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 (режима лавинного образования трещин) и возбуждение сильной акустической, централизованной волны, а затем и ударной волны.

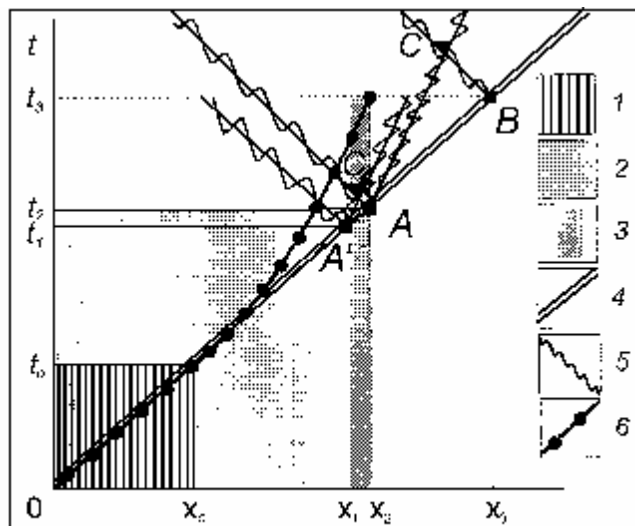


Рис. 5. Волновая картина формирования ударной волны, волны разрежения и их взаимодействия в геологическом теле и на его поверхности. 1 - геологическое тело; 2 - земная кора; 3 - поверхность; 4 - фронт УВ; 5 - фронт волны разрежения (ВР); 6 - кривая распределения скоростей Р-волн по глубине.

В точке  $(x_1, t_1)$  УВ выходит на границу между геологическим телом и рыхлым грунтом, а в точке  $(x_2, t_2)$  - на земную (свободную) поверхность. В каждой из этих точек происходит отражение УВ и возникновение волн разрежения (ВР), "двигающихся" в обратном (по отношению к УВ) направлении. Длительность импульса (удара) УВ конечна (обозначим ее  $\Delta t$ ). За это время УВ охватывает пространство на земной поверхности  $\Delta x = V_x \times \Delta t$  - в точке  $(x_3, t_3)$ , где так же может возникнуть ВР. Таким образом, на поверхности Земли, в области эпицентра землетрясения, в пространстве  $(x_1 - x_3)$ , - возникает ансамбль волн: ударных и разрежения. Эти волны, взаимодействуя между собой и с окружающим пространством, вызывают комплекс сложных волновых и гидродинамических явлений, приводящих, в конечном счете, к разрывам поверхности, разуплотнениям, вспучиваниям и проседаниям грунта, излиянию на поверхность жидкой фазы (мокрого песка и глины) в виде грифонов и т.п. На рис. 5 черным кружком (точка С) отмечено место пересечения ВР, в котором могут возникнуть разрывы сплошной среды. Рассмотрим эти явления подробнее.

### **Взаимодействие ударной волны с преградой, приводящее к возникновению отколов и разрушений поверхности**

*Взаимодействие волн.* Рассмотрим механизмы взаимодействия волн, возникающих при выходе ударной волны на «свободную» поверхность твердого тела. Наиболее полно этот вопрос рассмотрен в книге [14], которой будем придерживаться при изложении материала этого раздела.

Как известно, ударная волна, это волна сжатия, на очень узком фронте которой термодинамические характеристики претерпевают разрыв. Эта волна при прохождении через твердое тело приводит к его уплотнению и, при расщеплении на неоднородностях тела, - к генерации и излучению объемных волн. Ударная волна отличается от обычных акустических (сейсмических) волн ещё и тем, что вслед за фронтом УВ происходит движение (течение) вещества твердого тела, причем массовая скорость этого течения значительно меньше скорости УВ, и, чем интенсивнее ударная волна, тем выше массовая скорость. Совсем другая ситуация возникает, например, при выходе ударной волны на поверхность твердого тела. При этом образуется волна разрежения, двигающаяся в сторону, обратную движению УВ. Образование волн, идущих в обе стороны от «свободной» поверхности принято называть распадом разрыва. Разрыв в начальных условиях распространения УВ действительно исчезает, так как образуются два других разрыва. В книге [14] рассмотрены четыре возможных типа распада разрыва, из которых нас будет интересовать лишь четвертый. Все типы распада разрыва изображены на рис. 4 (сверху вниз): 1) Образование двух ударных волн. Такой тип распада встречается при выходе УВ из более «мягкого» вещества в более «жесткое». 2) Образование ударной волны и волны разрежения. Это происходит при выходе УВ из более жесткого вещества в более мягкое. Массовая скорость частиц более жесткого вещества удваивается и в нем начинает распространяться волна разрежения. 3) Образование двух волн разрежения. Они возникают в том случае, когда, строго говоря, разрыва в начальных условиях нет, а волна разрежения приходит на границу двух сред, до этого сжатых и покоящихся. На Земле такая ситуация может возникнуть при выходе ударной волны на поверхность и образовании волны разрежения, которая приходит на границу двух сред, например, грунта, лежащего на гранитном основании, либо рыхлого грунта на границе вечной мерзлоты и т.п. Волна разрежения является фактически волной плавного изменения состояния и не носит характера ударной волны, т.к. фронт такой волны имеет конечную ширину. 4) Образование двух волн разрежения и разрыва сплошного вещества. Такое движение возможно, как и в ситуации 3, но при слабом начальном сжатии. При интенсивной волне разрежения элементы вещества начинают двигаться друг от друга в противоположных направлениях, т.е. происходит откол, - разрушение ранее целого и компактного вещества.



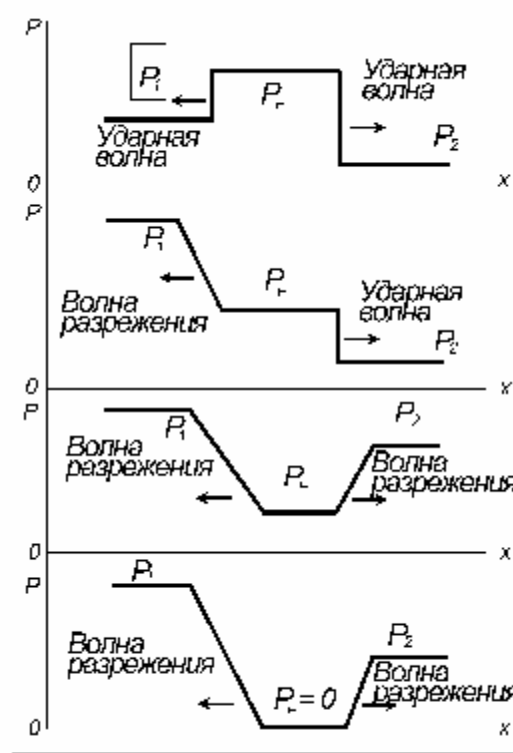


Рис. 6. Возможные типы распада разрыва [14]. Давления  $P_1$  и  $P_2$  – на фронтах УВ и ВР, давление  $P_F$  – в теле, после прохождения по нему этих волн. Стрелки – направления распространения волн.

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

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

**О прочности грунта.** Известно, что теоретическая прочность на разрыв твердого тела  $\sigma_p \approx 0.1 E$ , где  $E$  – модуль Юнга. Учитывая справочные данные, скорости сейсмических волн в грунте и его плотность, можно с уверенностью считать, что величина  $E \approx 1$  кбар. Фактически прочность меньше чем  $\sigma_p$  примерно в 100 – 1000 раз. Для грубых, качественных оценок

примем  $\sigma_p = 1 - 10$  бар, или  $10^6 - 10^7$  дин/см<sup>2</sup>, что соответствует давлению вышележащих слоев грунта  $p = \sigma_p = \rho gh$  на глубине  $h$  порядка нескольких метров (обычная для землетрясений глубина разрыва поверхности).

*Скорость сейсморазрыва.* Воспользуемся подходом оценок эффектов, связанных с отколом, развитых в [14]. Будем полагать, что возникновение первичных трещин сейсморазрывов в грунте идентично появлению откола в твердом теле при воздействии на него ударных волн. В этом случае можно написать формулу для величины скорости раздвижения трещины  $U$ :

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

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

$$U = \sigma_p / \rho_0 C,$$

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

### Модели сильных движений Чуйского землетрясения

Рассмотренные нами явления, объединенные в группу, которая носит название сильные движения (макросейсмичность) при землетрясении, можно разделить по природе механизма. В первую очередь, это ударно-волновой механизм. О физике этого механизма в основном и шла речь выше. Однако некоторые сопутствующие эффекты имеют явно гидродинамический характер. Сюда с очевидностью можно отнести образование грифонов, образование валов вспучивания как своеобразных волн, типа волн на воде, правосторонние сдвиги по простиранию образовавшихся трещин, когда правый борт трещины сдвигается к югу, а левый, - к северу и т.п. Ударно-волновой механизм включает такие вопросы как, образование волн разрежения в результате выхода ударной волны на свободную поверхность и последующее взаимодействие этих волн между собой. Так как в большинстве случаев процессы взаимодействия волн происходят в сравнительно тонком слое грунта, лежащем на гранитном основании или на слое вечной мерзлоты, то, рассматривая эту задачу можно иметь в виду, что особенности распространения и взаимодействия волн в пластине подходят под описание т.н. волн Лэмба.

Гидродинамические задачи базируются на двух главных моментах, следующих из теории ударных волн. Во-первых, это учет того, что при распространении ударных волн вещество, через которое распространяется УВ, движется по направлению волны с массовой скоростью, значительно меньшей, чем скорость распространения ударной волны и волны разрежения. Это движение (течение) вещества направлено вдоль по линиям сжатия-растяжения. Во-вторых, следует учитывать, что сильная ударная волна при распространении через среду приводит её в «квазижидкое» состояние, обладающее конечной величиной вязкости.

Кратко рассмотрим модели сильных движений в контексте физики ударно-волновой модели. Как отмечалось выше, среди множества сопутствующих землетрясению процессов авторы [1] руководствуясь классификацией сейсмогенных нарушений, принятой в мировой практике и в России, выделили четыре вида нарушений:

1) сейсмотектонические разрывы, 2) обвалы и оползни, 3) вспучивание и проседание почвы и 4) излияние воды и грязи на поверхность связанное с образованием грифонов.

Практически все виды нарушений нами рассмотрены выше при описании процессов, сопутствующих выходу ударной волны на поверхность среды. Тем не менее, дадим краткое содержание каждого из них.

*Сейсмотектонические разрывы.* Причины разрывов - взаимодействие двух и более волн разрежения, возникающих при выходе ударной волны на поверхность.

*Обвалы и оползни.* Возникают вследствие «подрезания склона сейсмотектоническими разрывами. Иногда такие явления называются сейсмогравитационными.

*Вспучивание почвы.* Происходит в поверхностном слое при отражении ударной волны от свободной поверхности, в то время как вещество ещё продолжает двигаться как бы вслед за УВ с массовой скоростью, которая в такой ситуации – удваивается. По мнению авторов [1], эти явления возникли на участках транспрессионного изгиба, где зияющие сейсморвы, которые являются структурами растяжения, сменяются структурами сжатия, представленными буграми вспучивания грунтов и напользанием.

*Проседания почвы.* Возможны две причины, или их комбинация. 1) Неравномерное вспучивание там где меньше «вспучилось», – это и есть проседания; 2) Ударная волна, проходя по твердой среде, уплотняет её. При выходе на поверхность, возникает волна разрежения, которая разуплотняет верхний слой среды. В принципе, в силу различных геометрических, реологических и пр. обстоятельств, возможна ситуация, в которой волна разрежения, в некоторой области пространства, - не образовалась. В этом месте вместо вспучивания, будет наблюдаться проседание почвы.

*Правостороннее смещение.* На рис. 2 можно видеть, что направление трещин сейсмотектонических разрывов не совпадают с валами перемещения почвы. Углы расхождения могут достигать 45°. Несмотря на то, что оба явления возникают как результат выхода ударной волны на поверхность грунта, в первом случае картина обязана взаимодействию сильных волн: ударной и разрежения. Во втором случае, имеет место гидродинамический перенос, связанный с тем, что касательные напряжения, согласно закона Кулона-Мора, ориентированы под углом к действующей на тело нагрузке.

*Образование грифонов.* Напряжения, возникающие в грунте в процессе воздействия на него ударной волны, определяются его реологией: чем суше грунт, тем в большей степени преобладают горизонтальные, касательные к поверхности грунта нагрузки над – вертикальными, нормальными к его поверхности. Соответственно, амплитуды перемещений частиц грунта, скорости и ускорения перемещений при воздействии на них ударной волны так же зависят от степени «сухости» грунта. Поэтому, во влагонасыщенном грунте возникают грифоны, а в сухом грунте – разрывы и образование трещин. Если вместо грунта, на поверхности находится монолитная порода, основное направление силы – вертикальное, в этом случае наблюдаются отколы. В сейсмологической практике известны случаи, когда в момент землетрясения откалывается часть скалы, «подпрыгивает», иногда разворачивается при этом, и остается на месте. Совсем другая физика образования грифона, которая, скорее, сродни физике, объясняющей возникновение «султанов» на воде при подводном взрыве [21]. И в том, и в другом случаях основным механизмом является схлопывание пузыря. Ударная волна выходит на поверхность и возникшее при этом давление выталкивает некоторое количество воды с массовой скоростью  $u$ . На поверхности воды образуется воронка в форме впадины.

### **Энергетика разрушений в эпицентре Алтайского землетрясения**

Рассмотрим два различных подхода к оценке энергии разрушений в эпицентре землетрясения: один, - с точки зрения теории упругости, другой - гидродинамики. Обратим

внимание на то, что в преобладающем большинстве работ по физике землетрясения принято считать потери на разрушения очень малыми, - менее одного процента от полной энергии землетрясения. Выясним, насколько справедливо это утверждение в случае Чуйского землетрясения.

*Сейсмическая энергия.* В механике землетрясения принято считать [22], что сейсмическая волна, достигая поверхности Земли, вызывает смещение земной поверхности  $x$ :

$$(x = a \cos (2\pi t/T_0),$$

тогда скорость движения грунта:

$$V = - (2\pi a_0/T_0) \sin (2\pi t/T_0).$$

Удельная энергия:

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

Кинетическая энергия, излучаемая очагом:

$$E = 3\pi^3 h^2 c t_0 \rho (a_0/T_0)^2.$$

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

Оценим величину  $(a_0/T_0)$ , принимая:  $c = 3,6$  км/с,  $h = 18$  км,  $\rho = 2,7$  г/см<sup>3</sup> и  $E = 10^{23}$  эрг. Величина  $(a_0/T_0)$ , иначе, скорость движения грунта,  $V \approx (5 - 10)$  см с<sup>-1</sup>. По-видимому, эту оценку можно принять как некоторое усреднение, т.к. в эпицентре 7.5 бального землетрясения скорость движения грунта значительно (в 10 – 20 и более раз) выше, хотя, конечно, это утверждение измерениями не обосновано. Тем не менее, такая оценка полезна, и в дальнейшем, обсуждая параметры сильных движений в эпицентре Чуйского землетрясения, будем ориентироваться на неё.

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

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

Предположим невероятный случай, что вся энергия землетрясения  $E$  пошла, например, на разуплотнение грунта на поверхности  $S = 10 \times 10$  км<sup>2</sup> под действием волны разрежения. В этом случае глубина слоя разуплотнения грунта была бы равна  $E/\rho S = 10$  метрам. Эта оценка показывает масштаб явления. Реально наблюдаемые нарушения грунта в эпицентре Чуйского землетрясения были рассмотрены нами выше. Обратимся к рисунку 2 [1], на котором изображена структура сейсморазрывов и зон вспучиваний на водоразделе рек Талдура (на некоторых картах - Талтура) – Кускуннур в эпицентральной зоне разрушений Чуйского землетрясения. Грубая оценка суммарной длины сейсморазрывов, изображенных на этом рисунке, показывает, что это примерно 5 км. Если принять глубину разрывов 5 м, а ширину – 20 м, то объем, который подвергся разрушению, равен  $5 \cdot 10^5$  м<sup>3</sup>. На эту «операцию» было затрачено примерно  $5 \cdot 10^{19}$  эрг. Оценим объем грунта, подвергшегося вспучиванию. Оказывается, что грубая оценка величины этого объема равна объему трещин. Возможно, это совпадение, но, возможно, - это реализация закона сохранения массы в ударной волне. В любом случае, суммарная энергия, потраченная на получение разрывов

и вспучиваний, составляет примерно  $10^{20}$  эрг на один из многих участков земной коры в эпицентре землетрясения. Будем, к примеру, считать, что таких участков 10, тогда получается, что на реализацию этого типа сильных движений и разрушений в эпицентре землетрясения «уходит» примерно 1 % от суммарной энергии. Пока не учитывалась часть энергии, которая «пошла» на работу грифонов, подвижку среды как квазижидкости и образование оползней.

Оценим, для сравнения, порядок кинетической энергии, израсходованной на образование грифона. Воспользуемся формулой Пуазейля для оценки объемного расхода жидкости  $V$  (см<sup>3</sup>/с), изливающейся через круглое отверстие радиусом  $R$ , длиной «трубы»  $l$ , вязкостью «жидкости»  $\eta$  и под давлением  $\Delta p$ :

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

Подставляя  $R = 10^2$  см,  $\eta = 10^5 - 10^6$  Пз,  $l = 10^2$  см,  $\Delta p = 10^8$  дин/см<sup>2</sup>, получаем:  $V = 10^8$  см<sup>3</sup>/с. Учитывая, что время «работы» грифона порядка нескольких минут, масса (объем  $\Delta V$ ) выброшенного материала может достигать:  $m \geq 1000$  т, что согласуется с приведенной выше оценкой. Линейная скорость переноса массы  $m$  порядка  $v = 10^4$  см/с, что позволяет сделать грубую оценку кинетической энергии работающего грифона:  $E = 10^{17}$  эрг. Величину  $E$  можно оценить и по формуле:  $E = \Delta p \Delta V$ . Подставляя:  $\Delta p = 10^8$  бар,  $\Delta V = 10^9$  см<sup>3</sup>, получаем ту же величину  $E$ . Даже если допустить, что во время Чуйского землетрясения «работало» 100 таких грифонов, их суммарная энергия ( $E = 10^{19}$  эрг) оказывается значительно меньше (в сто раз), чем энергия, которая пошла на образование сейсморазрывов.

### Пути и перспективы дальнейших исследований очага Чуйского землетрясения

В то время, когда готовилась эта статья (декабрь 2003) в Калифорнии произошло землетрясение, погибли люди, разрушены дома. И это в том районе, где сосредоточена самая совершенная аппаратура, где ведется постоянный мониторинг всех возможных геофизических параметров, огромное количество геофизиков получают немалые деньги на прогноз землетрясения. А его нет, да и не может быть. Идея о возможности представить очаг землетрясения как источник генерации ударной волны, а механизм её возникновения, - как сверхизлучение звука когерентно раскрывающимися трещинами [Кузнецов, 2001], возникла в 1988 г. после Спитакского землетрясения. Впервые она была опубликована в 1990 в препринте, где была высказана мысль, которая затем повторялась практически во всех моих статьях и книгах, касающихся физики этого явления: «Землетрясение, уже начавшись, само не знает, каким получится». Этой фразой можно определить отношение к прогнозу землетрясения. Получается так, что можно сделать обоснованный прогноз места и времени предстоящего землетрясения, однако прогнозировать силу землетрясения, - не возможно принципиально.

Какая же альтернатива? И есть ли она? Очень многие серьезные ученые и инженеры полагают, что в настоящее время у человечества существуют всего два пути: один, это хорошо строить и быть готовым к тому, что такое событие может произойти в любое время, и второй, - заниматься физикой явления. Причем оба пути должны развиваться одновременно, быть тесно связаны, а не противопоставляться друг другу.

Чуйское землетрясение представляет огромные возможности для реализации второго пути - изучения физики этого явления. Кое-что уже сделано, однако, это очень малая толика из того, что следовало бы сделать и сейчас, и в будущем. Группой сотрудников Алтае-Саянской Опытной-Методической Сейсмологической Экспедиции (АСОМСЭ) Геофизической службы СО РАН определены глубины гипоцентров, координаты афтершоков, механизмы землетрясений и пр. Объединенной группой сотрудников ИФЗ (проф. Е.А.Рогожин) и Алтайского государственного университета (С.Г.Платонова) проведено предварительное изучение морфологии эпицентра этого землетрясения. Группой сотрудников Горного института УрО РАН, г. Пермь (Р.А.Дягилев) проведены наблюдения микросейсмичности на сейсмостанции Акташ в период афтершоковой активности в начале

ноября 2003 г. Там же, и в эти же сроки, автором этой статьи совместно с сотрудником АСОМСЭ (С.Ю.Хомутовым) проведены наблюдения за вариациями геомагнитного поля, инфразвуком и изменениями атмосферного электрического поля. В настоящее время результаты наблюдений обрабатываются, можно надеяться, что полученные данные позволят приблизиться к пониманию физики землетрясения, а так же подтвердить, или опровергнуть ударно-волновую модель, суть которой частично изложена в этой статье.

Что следовало бы сделать в будущем:

- Продолжить наблюдения за микросейсмичностью, инфразвуком, атмосферным электрическим полем. Наблюдения за вариациями геомагнитного поля должны быть продолжены в плане выяснения возможности влияния сильных магнитных бурь на «запуск» землетрясений. Однако с точки зрения т.н. сейсмомагнитного эффекта они, по всей видимости, бесперспективны, т.к. магнитометр на эффекте Оверхаузера, обладающий нулевой чувствительностью к колебаниям почвы, не зафиксировал ни одного сигнала в магнитном поле, связанного с сильными толчками. Наблюдения велись в эпицентре землетрясения - на сейсмостанции Акташ.
- Наладить GPS-измерения за подвижностью грунта по обеим сторонам разлома Кускуннур.
- На ближайших к эпицентру землетрясения сейсмостанциях организовать регистрацию низкочастотного электромагнитного излучения. Аналогичные наблюдения вести в геофизической обсерватории Новосибирска. Это даст возможность отделить сигналы из зоны очага от излучения от внешних источников.
- Провести электромагнитное зондирование в районе разлома Кускуннур вдоль и поперек него. Это может быть как МТЗ (при выборе диапазона пульсаций, обеспечивающих проникновение зондирующего сигнала до глубин 20 км), так и с помощью внешнего источника тока.
- Провести зондирование очага с помощью сейсмодвибратора по трассам вдоль и поперек разлома Кускуннур. При выполнении п.п. 4 и 5 следует искать аномалии, связанные с очагом землетрясения.
- Изучить афтершоки, выяснить объем очага, определить, анализируя закон Омори, являются ли источниками афтершоков главный удар или в этом принимают участие и два других сильных землетрясения.
- Выяснить, действительно ли очаг Чуйского землетрясения, это долгоживущее образование, в котором немалую роль играет разлом Кускуннур. Для этого необходимо провести сравнение современных разрывов с палеонарушениями.

*Благодарности.* Благодарю сотрудников Геофизической службы СО РАН (АСОМСЭ) С.Ю.Хомутова - за предоставление возможности изучения последствий землетрясения и афтершоковой активности в близи его эпицентра и А.Г.Филину – за многочисленные консультации и обсуждения представленного в этой работе фактического материала. Благодарю сотрудника Горно-Алтайского Университета А.Ю.Гвоздарева - участника экспедиции, за предоставленную им информацию об особенностях сильных движений Чуйского землетрясения.

Я благодарен коллегам физикам и сейсмологам: Гордееву Ю.И. (Петропавловск-Камчатский), Богомолу Л.М. (Бишкек) и С.Г.Платоновой (Барнаул), прочитавшим мою работу и сделавшим замечания, устранение которых, несомненно, привело к её улучшению.

## Литература

1. *Геодаков А.Р., Овсяченко А.Н., Платонова С.Г и др..* Материалы предварительного изучения сильного землетрясения 2003 г. на Горном Алтае // Электронный научно-информационный журнал «Вестник отделения наук о Земле РАН» № 1 (21) 2003, М.: ОИФЗ РАН, 2003.



URL: [http://www.scgis.ru/ruaaian/cp1251/h\\_dgggms/1-2003/screp-8.pdf](http://www.scgis.ru/ruaaian/cp1251/h_dgggms/1-2003/screp-8.pdf)

2. Жалковский Н.Д. Алтай и Саяны. С. 499-500. В кн. «Новый каталог сильных землетрясений на территории СССР». М.: Наука. 1977.

3. Лутиков А.И., Донцова Г.Ю., Юнга С.Л. Сейсмологические аспекты землетрясения на Горном Алтае 27.09.2003,  $M_s = 7.3$  (результаты предварительного анализа) // Электронный научно-информационный журнал «Вестник отделения наук о Земле РАН» № 1 (21) 2003.

URL: [http://www.scgis.ru/ruaaian/cp1251/h\\_dgggms/1-2003/screp-6.pdf](http://www.scgis.ru/ruaaian/cp1251/h_dgggms/1-2003/screp-6.pdf)

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

5. Шебалин Н.В. Количественная макросейсмика (фрагменты незавершенной монографии) // Вычислительная сейсмология. М.: Геос. Т. 34. 2003.

6. Кузнецов В.В. Физика земных катастрофических явлений. Новосибирск. Наука. 1992;

7. Кузнецов В.В. Ударно-волновая модель очага землетрясения // Науки о Земле. М.: Вузовская книга. 2001. С. 47-62.

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

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

10. Jouniaux L., Masuda K., Lei X, et al. Comparison of the microfracture localization in granite between fracturation and slip of a preexisting macroscopic healed joint by acoustic emission measurements // J. Geophys. Res. 2001. V. 106. NO. B5. P. 8687-8698.

11. Lei X., Nishizawa O., Kusunose K., Satoh T. Fractal structure of the hypocenter distributions and focal mechanism solutions of acoustic emission in two granites of different grain sizes // Phys. Earth. 1992. V. 40, P. 617-634.

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

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

14. Забабахин Е.И. Некоторые вопросы газодинамики взрыва. Снежинск: РФЯЦ–ВНИИТФ. 1997. 115 с.

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

16. Станюкович К.П. Неустановившиеся движения сплошной среды. М.: Наука. 1971. 854 с.

17. Ляхов Г.М., Покровский Г.И. Взрывные волны в грунтах. М.: ГНТИ. 1962 г. 103 с.

18. Николаевский В.Н. Динамическая прочность и скорость разрушения // Сб. Механика. Удар, взрыв и разрушение. 26. М.: Мир. 1981. С. 166-203.

19. Anderson J.G., Yu G. Predictability of strong motion from the Northridge, California Earthquake // Bulletin Seismological Society of America 1996. V. 86. N.1, Part B. P. 100 – 104

20. Shen Z.-K., Ge B.X., Jackson D.D., et al., Northridge Earthquake rupture models based on the Global Positioning System measurements // Bulletin Seismological Society of America 1996. V. 86. N.1, Part B. P. 37-48.

21. Лаврентьев М.А., Шабат Б.В. Проблемы гидродинамики и их математические модели. М.: Наука. 1973.

22. Касахара К. Механика землетрясений. М.: Мир. 1985. 264 с.

23. Wald D.J., Heaton T.H., Hudnut K.W. The slip history of the Northridge, California, earthquake determined from strong-motion, teleseismic, GPS, and leveling data // Bulletin Seismological Society of America. 1996. V.86. P. S49-S70.

**КУЗНЕЦОВ** Владимир Валерьевич – окончил Новосибирский технический университет, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник ИГФ СО РАН и ИКИР ДВО РАН. Проводит исследования в области физики Земли (модель горячей Земли, физика землетрясения, климат, природа геомагнетизма).

Россия, 684034 Камчатская обл. с. Паратурка. Ул. Мирная, 7, ИКИР.

Тел.: (41531) 33193

E-mail: [yvk@ikir.kamchatka.ru](mailto:yvk@ikir.kamchatka.ru)