

**ЧУЙСКОЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЕ (M = 7.5, АЛТАЙ, 27.09.2003)**  
**(ударно-волновая модель; сильные движения; результаты наблюдений**  
**атмосферного электричества, геомагнитного поля и инфразвука**  
**в период афтершоковой активности)**

**В. В. Кузнецов<sup>1,2</sup>, С. Ю. Хомутов<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>*ИГФ СО РАН (г.Новосибирск),*

<sup>2</sup>*ИКИР ДВО РАН (с.Паратунка, Камчатская обл.),*

<sup>3</sup>*Алтае-Саянский филиал ГС СО РАН (г.Новосибирск)*

На примере Чуйского события обсуждаются ключевые моменты ударно-волновой модели землетрясения. Акцентируется внимание на физике возникновения ударной волны в акустически активной когерентной среде и механизмах макросейсмоки (сильных движений в эпицентре землетрясения). Приводятся данные по разрушениям грунта, произошедших в эпицентре сильного Алтайского (Чуйского) землетрясения 2003 г.: M = 7.5, юг Горного Алтая, территория Кош-Агачского района, 27 сентября в 11 час. 33 мин. по Гринвичу. Сообщается о результатах измерений вертикальной компоненты атмосферного электрического поля, полного модуля геомагнитного поля и инфразвука в период афтершоковой активности Чуйского землетрясения. Наблюдения проводились в период с 5 по 9 ноября 2003 г. на сейсмостанции "Акташ" АСФ ГС СО РАН, расположенной практически в эпицентральной зоне этого землетрясения. За пять дней наблюдений штатной сейсмической аппаратурой было зарегистрировано 15 толчков с энергетически классом K = 7.4 – 9.9 и с гипоцентрными расстояниями от 11 до 49 км от сейсмостанции. Были зарегистрированы инфразвуковые и электрические сигналы, сопутствующие афтершокам. Соответствующие сигналы в напряженности магнитного поля на уровне 0.5 нТл не были обнаружены.

В рамках ударно-волновой модели объясняется экспериментально обнаруженное несовпадение времен прихода первых вступлений волн в акустике и сейсмике. Ударно-волновая модель дает возможность объяснить физику сильных движений в эпицентре землетрясения, таких как отколы, образование разрывов, подъемов и опусканий почвы, грифонов и т.п., и произвести численные оценки параметров.

The results on measurements of atmospheric electric field vertical component, geomagnetic field intensity and infrasound during aftershocks activity after Chuiysky earthquake (M = 7.5) which occurred at the southern zone of the Altay mountains, in Kosh-Agach department at 11:33 U.T. on September 27, 2003 are discussed. The research has been made from 5 to 9 November, 2003 at the seismic station "Aktash" (ASD GS SB RAS), situated just inside the earthquake epicenter. 15 shocks with the energetic class K = 7.4 - 9.9 and with hypocentral distances between 11 and 49 km from the station were recorded by permanent seismic equipment. The infrasonic and electric signals accompanying the earthquakes were detected. The corresponding magnetic signals with amplitude up to 0.5 nT were not shown. Photos of strong movements-destructions of epicenter exit surface are cited.

The present results are interpreted in context of the earthquake shock-wave theory, being developed by one of two authors (K.V.). The synopsis of the earthquake shock-wave theory is presented, and this is the model to account as for the revealed mismatch of the acoustic and seismic waves times of the first entering and as for physics of the earthquake epicenter strong motions, such as breaks off, soil breakups, heavings and sinkings, griffon origin and e.c. with parameters numerical valuation being feasible.

### **Введение**

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 СО РАН 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 большим количеством афтершоков, два из них наиболее сильные: первый ( $M = 6.4$ ) произошел 27.09.03 в 18 час. 52 мин. по Гринвичу и второй ( $M = 7.0$ ), 1.10.03, в 1ч. 03 мин.28 сек. по Гринвичу. Главный удар второго афтершока произошел в направлении на пос. Акташ (место расположения сейсмостанции), где отмечались повреждения зданий 7-ми, 8-ми бальной интенсивности.

Определены магнитуды и координаты основного толчка и двух афтершоков, а так же глубины гипоцентров. По данным Международной Сейсмологической сети USGS и National Earthquake Information Center параметры Алтайских землетрясений: 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. По данным Геофизической службы СО РАН, при использовании сети сейсмостанций Алтае-Саянской опытно-методической сейсмологической экспедиции (АСОМСЭ), 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. Два главных афтершока Чуйского землетрясения внесли свой «вклад» в сильные движения грунта, однако, судя по характеру афтершоков и особенностям разрушений (со слов очевидцев), направления главных ударов этих землетрясений отличались от направления главного толчка. Последствия сильных движений Чуйского землетрясения (разломы, разрывы поверхности, оползни, грифоны и пр.) изучены и описаны [Геодаков и др., 2003].

Авторы настоящей работы ставили перед собой задачу изучить характер изменения геофизических параметров в афтершоковом режиме и интерпретировать, в рамках ударно-волновой модели землетрясения, результаты наблюдений и особенности сильных движений (макросеймики).

### **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 [Dicke, 1934] и реализованному впоследствии 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

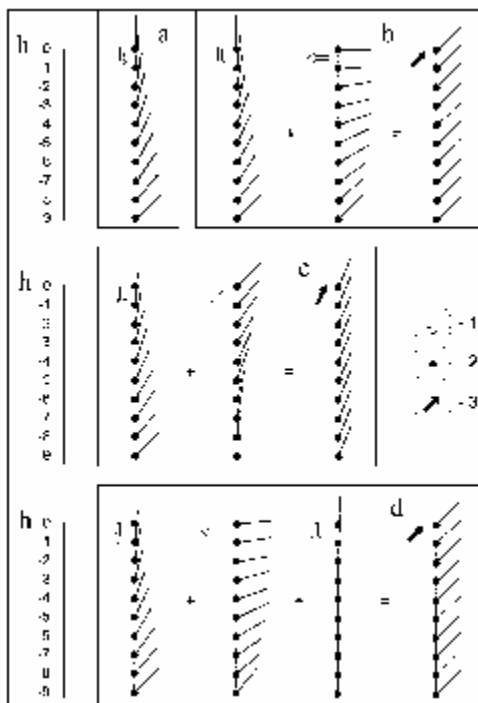
(гипоцентра землетрясения) к поверхности земли, волна рассеивается (расщепляется) на неоднородностях среды, вызывая при этом излучение объемных сейсмических волн. Кроме этого, ударная волна сжатия, распространяясь по очагу, залечивает (захлопывает) существовавшие в геологическом теле трещины и микроразрывы, 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 флюоресценции (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 [Шабалин, 2003].

### **Возникновение когерентной структуры**

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, раскрывающихся под углами, относительно вектора напряжений, определяемыми законом Кулона-Мора (см. рис. 1-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. 1-б).

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. 1-с). В этом случае угол выхода ударной волны оказывается больше чем 45 ° и приближается к углу 90°. На рис. 1-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.



**Рис. 1.** Направления образования трещин при изменении нагрузки на геологическую среду. а - вертикальная, литостатическая; б - литостатическая + боковая; с - литостатическая + “под углом”; d - то же, что “b” + дополнительная, внешняя. Дальний порядок и пространственная когерентность возникают в случаях: “b, с” и “d”. 1 - направление действия нагрузки; 2 - положение трещины и ее направление; 3 - направление пространственной когерентности.

Таким образом, угол когерентности – это угол относительно поверхности Земли, определяющий направление раскрытия трещин и распространения волн, которые участвуют в раскрытии этих трещин. Трещины, раскрываясь, генерируют звуковые импульсы, которые, в свою очередь, взаимодействуя с микротрещинами, вызывают их раскрытие под теми же углами когерентности. Структуру взаимодействующих трещин путем обмена между ними

акустического излучения назовем акустически активной средой.

Будем рассматривать акустически активную среду как среду мутную, в которой распространяется акустическое излучение, вызванное самой средой. Аналогичная ситуация в излучении электромагнитных волн называется в физике, как взаимное облучение. Принято считать, что взаимное облучение среды светом имеет когерентную и некогерентную части. Вероятно, такой подход применим и к акустике. В этом случае когерентная часть акустического взаимного облучения может быть отнесена к кооперативным эффектам, которые приводят к качественному изменению характера облучения. В рассматриваемой нами ситуации, к возникновению лавинного процесса и образованию ударной волны. Некогерентная часть взаимного акустического облучения характеризуется многократным рассеянием и проявляется как акустический фон. Очевидно, что доли когерентного и некогерентного излучения могут изменяться в процессе эволюции акустически активной системы. Очевидно так же, что смена преимущества режима некогерентного излучения на преимущественно когерентный должна характеризоваться уменьшением величины излучения структуры, принимаемого за фоновое. Такой подход находит объяснение известному в сейсмологии эффекту «молчания» среды перед сильным землетрясением. Становится понятным и то, что чем большие объемы напряженной геологической среды примут участие в когерентном процессе, иначе, чем мощнее будет землетрясение, тем длительнее процесс молчания.

### Образование ударной волны

Может ли возникнуть ударная волна (УВ) в твердой оболочке Земли, если акустический (сейсмический) фон стационарен и нет внешних взрывных возмущений? Возможность возникновения УВ в литосфере Земли обосновывалась [Кузнецов, 1992; Кузнецов, 2001] рядом положений. Как отмечалось выше, при нагрузке в твердом упругом и прочном геологическом теле возникают трещины, которые, раскрываясь, генерируют звуковые импульсы. Эти импульсы распространяются по среде и, достигая готовой к раскрытию микротрещины, стимулируют ее раскрытие. При этом происходит генерация следующего импульса, и процесс повторяется [Кузнецов, 2001; Си. Либовиц, 1975]. Если в среде микротрещин много, то первый импульс одновременно “запускает” раскрытие других трещин и возникает лавина 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 [Dicke, 1954], 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, при условиях возникновения разрыва характеристик, например плотности среды, 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 [Заславский, Сагдеев, 1988]. При этом вместо привычного в физике землетрясения разрыва смещений будет происходить перемещение разрыва характеристик среды на фронте ударной волны (возникает, в терминах Аки и Ричардса, разрывный источник). Рассеяние УВ на акустических неоднородностях очага землетрясения вызывает генерацию объемных волн, и, таким образом, в ударно-волновой модели реализуется объемный (в терминах Аки и Ричардса) источник.

Ансамбль излучающих звук трещин рассматривался в [Кузнецов, 2001] 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» (фононов) с энергией:  $e = hw = (s^2/E) l^3$ , ( $e$  – энергия «кванта»,  $h$  – аналог постоянной Планка,  $l$  – длина трещины,  $w \sim 1/t_o$  – “частота” излучаемой волны акустической эмиссии,  $t_o = l/u$  – время раскрытия трещины,  $u$  – скорость ее раскрытия,  $s$  – напряжение в системе,  $E$  – модуль Юнга). На верхнем энергетическом уровне акустически активной системы находятся микротрещины, размером  $l_o \approx 1$  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 [Smith, Evans, 1984]. Энергия образования микротрещины  $e_o = (s^2/E)l_o^3$  значительно меньше энергии раскрывшейся трещины, поэтому ее можно не учитывать при оценке величины звукового «кванта», образующегося при раскрытии трещины. Если  $s = 3 \cdot 10^7$  Н/м<sup>2</sup>,  $E = 10^{10}$  Н/м<sup>2</sup>, то  $e = 10^{-7}$  Дж (для трещины 100 мкм). Скорость раскрытия трещины  $u \approx 10^5$  см/с, длительность акустического импульса  $t_o \approx 10^{-7}$  с, а частота излучения -  $w \approx 10^7$  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  $\sim 1$  см. Это расстояние является характерным для нашей модели, оно определяет минимально возможную ширину фронта УВ ( $\delta$ ).

Для того чтобы сейсмическая волна, образующаяся при раскрытии трещины, могла без потерь пройти расстояние от гипоцентра до поверхности Земли ( $\sim 10$  км), частота сейсмических колебаний должна быть  $w \approx 1 - 10$  Гц, а размер трещины  $l \sim 1$  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

происходит в лазере, где квант излучения свободно и многократно проходит через оптический резонатор. Ударная волна, в отличие от сейсмической, распространяется по акустически активной среде практически без потерь.

Экспериментальные данные по наблюдению акустической эмиссии в напряженном образце горной породы показывают [Журков и др. 1980], 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;  $j = f - g$  – разность между факторами, определяющими разветвление и обрыва цепей, причем, если  $j > 0$ ,  $dN/dt \sim N$ , – происходит лавинообразное нарастание количества трещин  $N$  ( $t \sim N^1$ ). Близкое по характеру явление известно в оптике, в частности, в физике лазеров как сверхизлучение. Дикке предсказал, что система, состоящая из двух уровней, может спонтанно перейти в основное состояние за время, обратно пропорциональное числу возбужденных излучателей  $N$ :  $t \sim N^{-1}$ . Мощность системы  $P \sim I/t \sim N h\nu_0/t \sim N^2$ . 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:  $P \sim N^2$ .

Таким образом, получен важный результат, показывающий связь между временем лавинообразного нарастания трещин и силой землетрясения. Из модели следует, что чем сильнее землетрясение, тем быстрее происходит образование ударной волны. Можно предположить, что процесс лавинного образования трещин, это ничто иное, как источник звука, предшествующего возникновению главного удара (образования ударной волны). Возможно, что именно этот процесс является источником «подземного гула» – явления, сопутствующего и предшествующего землетрясению. Если эта посылка верна, спектр звукового сигнала, предшествующего землетрясению должен возрасти со временем. Это связано с тем, что перед возникновением ударной волны все большее и большее количество трещин принимает участие в процессе.

Принципиальным моментом механизма взаимодействия трещин между собой является то, насколько эффективно рассеиваются сейсмические волны на трещине и микротрещине. Приведем несколько очевидных соображений, касающихся особенностей рассеяния волны на микротрещине [Аки, Ричардс, 1983], которые будем использовать в дальнейшем.

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

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

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

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

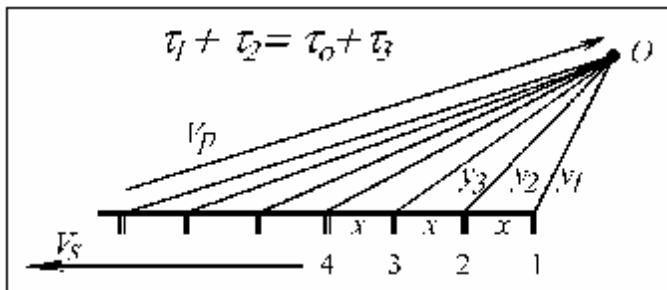
– Рассеяние становится пренебрежимо малым, когда размер неоднородности оказывается много меньше длины волны.

Иллюстрируем сказанное рисунком 2. 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:  $t_1 + t_2 = t_0 + t_3$ , где  $t_1 = y_1/V_P$  – время распространения Р-волны от раскрывшейся трещины 1;  $t_2 = x_1/V_S$  – время распространения S-волны от трещины 1 до микротрещины 2;  $t_0$  – время раскрытия трещины;  $t_3 = y_2/V_P$  – время распространения Р-волны от трещины 2. Р-волны пересекаются в одной точке. Полагая:  $y_2 - y_1 = Dy$ , при выполнении условия:  $Dy/V_P = -t_0 + x/V_S$ . Оценим величину  $x$ , для чего примем:  $Dy = x$ ,  $V_P = 5$  км/с,  $V_S = 3$  км/с,  $t_0 = 10^{-7}$  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 миллиметра, вполне возможно. Предположим, что характерный поперечный размер активной среды  $X = xN$  ( $x \sim 1/N$ ), тогда характерное время:  $t \sim 1/N$ . 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 (O) – вершине волны (рис. 2). 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:  $e = (p_2 - p_1)/p$ , где  $e$  – малый параметр. Разлагая в ряд формулы, характеризующие ударную волну (законы сохранения и адиабату Гюгонио), по параметру  $e$  и отбрасывая члены с  $e^3$ , легко показать, что  $p_1 \gg p_2$ ,  $r_1 \gg r_2$  и т.д. Оценим величину  $e(r)$  для случая возникновения трещин в напряженной среде. Предположим, что в кубическом сантиметре среды плотностью  $r_1$  образовалось  $n$  трещин, каждая длиной  $l = 100$  мкм и «шириной» 10 мкм. Расстояние между трещинами  $\approx 2l$ . Объем одной трещины  $DV \approx 10^{-8}$  см<sup>3</sup>. Увеличение объема за счет одновременного возникновения  $n$  трещин  $DVn \approx 10^{-3}$  см<sup>3</sup>. Масса вещества среды, в которой образовалось  $n$  трещин, не изменилась, а объем, занимаемый этой массой, уменьшился на  $10^{-3}$ . Отсюда:  $(r_1 - r_2)/r_1 \approx 10^{-3}$ , ( $e \approx 10^{-3}$ ).



**Рис. 2.** Когерентное сложение Р-волн (в точке O) от раскрывающихся трещин. Трещины (1, 2, 3, 4) - широкие вертикальные полосы, тонкие полоски – микротрещины.

На рис. 2 изображена ситуация, при которой происходит пересечение волн от раскрывающихся трещин. Одновременный приход волн в одну общую точку (O) может привести к возникновению новой высокочастотной волны. Эта волна не может распространяться на расстояние, большее 1 см. Как отмечалось выше, расстояние в 1 см определяет минимальную ширину фронта УВ (δ). 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 [Заславский, Сагдеев, 1988]. В случае такого сложения высокая частота (10 МГц) определяет ширину фронта УВ. Однако в этом случае условие:  $t \sim 1/N$  может не выполняться, и сложение видеоимпульсов уже нельзя рассматривать как сверхизлучение.

Аддитивное сложение звуковых импульсов в ударной волне определяет ее энергию:

$$I = N \cdot (S^2/E) l^3,$$

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 [Smith, Evans, 1984].

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:  $I = 10^{24}$  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  $\text{см}^3$  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 [Касахара, 1985], 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 [Касахара, 1985] 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 [Зельдович, Райзер, 1966]. 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 [Dicke, 1954] 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:  $t \gg t_n$ , УВ генерируется в виде отдельных коротких импульсов. Обратим внимание на то, что в практической сейсмологии встречается полный набор этих вариантов. Величину  $t_n$  можно оценить, привлекая кинетическую теорию прочности (Регель, Слуккер, 1973), как долговечность образца при его разрушении  $t$ :



$$t_n = t = t^* \cdot \exp[(U_n - gs)/kT],$$

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

### Явления при выходе 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  $c_o$ , 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  $c_o$ . При отражении возникает быстро затухающая волна разгрузки (разрежения, растяжения), движение которой сопровождается перемещением вещества со скоростью  $u_o$ . 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 [Геодаков и др., 2003] и Нортриджском землетрясениях [Shen et al., 1996].

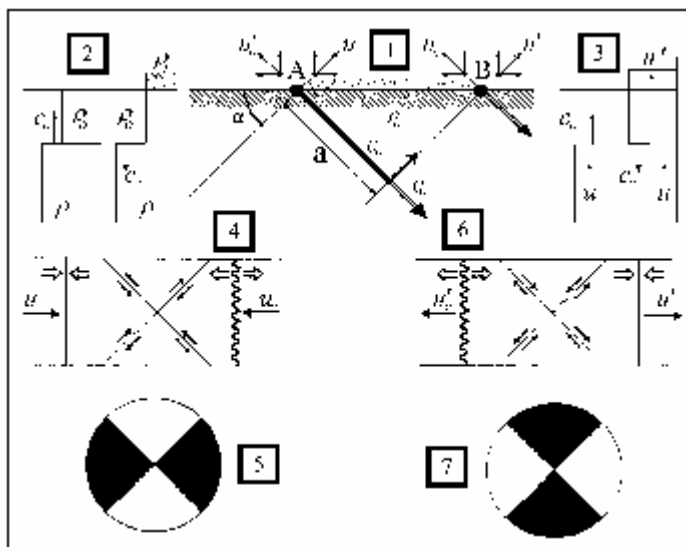


Рис. 3. Выход ударной волны (шириной  $a$ ) на поверхность Земли под углом  $\alpha$  к линии горизонта. Пояснения в тексте.

На участке АВ может возникнуть система сил, направленных друг навстречу другу соответственно тому, как направлены горизонтальные компоненты массовых скоростей:  $u - u_o$  (рис. 3-4), либо  $u' - u_o'$  (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  $\rho_o$ ) находится выше начального уровня. Аналогичная картина представлена на рис. 3-3, где изображены скорости в нормально падающей ударной волне со скоростью  $c_o$  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.

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 [Гвоздев, Кузнецов, 1967]. 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 заглублении 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.

### Общие закономерности при выходе ударной волны на поверхность

Основные соотношения для ударных волн (УВ) [Забабахин, 1997; Зельдович, Райзер, 1966; Станюкович, 1971]:

Закон сохранения массы:

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

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

Закон сохранения импульса:

$$- \sigma_n = p_n - p_o = \rho_o u_n D,$$

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

Уравнение сохранения энергии имеет классический вид:

$$E_n - E_o = \frac{1}{2} (p_n - p_o) (v_o - v_n),$$

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

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

$$D = [\rho / \rho_o (p - p_o) / (\rho - \rho_o)]^{1/2},$$

$$u = [1/\rho \rho_o (p - p_o) (\rho - \rho_o)]^{1/2}.$$

Эти уравнения справедливы для сухого грунта. Если грунт водонасыщенный, то  $D$  и  $u$ , после подстановки уравнения состояния водонасыщенного грунта в виде [Ляхов, Покровский, 1962]:

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

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 компонент; будут определяться следующим образом:

$$D^2 = (p - p_o)/\rho_o \{ 1 - \alpha_1 (p/p_o)^{-1/k_1} - \alpha_2 [k_2(p - p_o)/\rho_2 c_2^2 + 1]^{-1/k_2} - \alpha_3 [k_3(p - p_o)/\rho_3 c_3^2 + 1]^{-1/k_3} \}^{-1};$$

$$u^2 = (p - p_o)/\rho_o \{ 1 - \alpha_1 (p/p_o)^{-1/k_1} - \alpha_2 [k_2(p - p_o)/\rho_2 c_2^2 + 1]^{-1/k_2} - \alpha_3 [k_3(p - p_o)/\rho_3 c_3^2 + 1]^{-1/k_3} \}.$$

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 «размыв» фронта (толщиной  $l$ ). Принято считать, что этот эффект связан с переходом среды в квазижидкое состояние, характеризующееся наличием у среды динамической вязкости [Николаевский, 1981]. Например, в прессованном порошке соли NaCl, при прохождении ударной волны ( $u = 10^3$  м/с,  $l = 10^{-3}$  м,  $\tau = 10^{-6}$  с) размыв 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  $\nu$  достигала 1 м/с. Знание этих параметров позволяет оценить величину вязкости «жидкой» среды:  $\eta = \sigma a/\nu \approx 10^5 - 10^6$  Пз. Полученные оценки вязкости показывает, что вещество грунта в момент землетрясения в его эпицентре находится в «квазижидком» 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:

$$\begin{aligned} dv/dt &= F - 1/\rho \operatorname{grad} p, \\ dv/dt &= F - 1/\rho \operatorname{grad} p + \chi dv, \end{aligned}$$

$$v = \int_S u dS,$$

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 Кейлис-Бороком и развит Матуямой [Касахара, 1985, 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. Скорость распространения ударной волны  $D$  в твердом теле [Зельдович, Райзер, 1966] зависит от интенсивности волны, 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 представлениям 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 [Зельдович, Райзер, 1966; Ляхов, Покровский, 1962]. При камуфлетном (подземном) взрыве наблюдается так называемое геометрическое подобие (скейлинг) по корню кубическому из энергии взрыва  $E$  (Ляхов, Покровский, 1962). 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 [Ляхов, Покровский, 1962]:

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

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.

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 $\rho = 1.6 - 1.7 \text{ г/см}^3$	15	2.8
Неводонасыщенный песок с $\rho = 1.5 - 1.6 \text{ г/см}^3$	7.5	3.0
Неводонасыщенный песок с $\rho = 1.4 - 1.5 \text{ г/см}^3$	2.5	3.5

Для того чтобы перейти от веса взрывчатого вещества к энергии и применить формулу ( $p = p_0(C^{1/3}/R)$ ) 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  $C^{1/3} \approx 10^3 \text{ кг}^{-1/3}$ . 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 [Anderson, Yu, 1996].

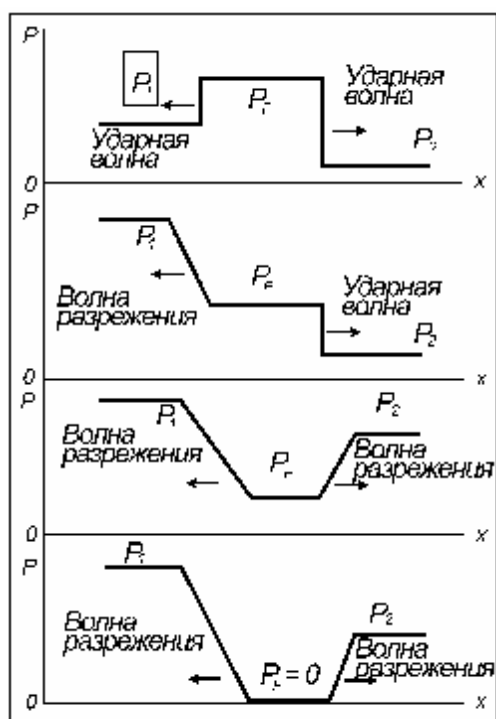
Давление на фронте ударной волны (волны сжатия) на расстоянии 650 км от очага, в Новосибирске, если принять самые высокие значения коэффициента  $K$  из Таблицы 1, оказывается порядка 1 бара. Очевидно, что эта оценка, по-видимому, наиболее высокая из всех возможных. Если, к примеру, параметр  $K$  будет 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 Новосибирской сейсмостанции, составляет примерно 50 микрон. Зная величину смещения, можно попытаться оценить деформацию  $\epsilon$ , производимую проходящей волной:  $\epsilon \approx (1 - 5)10^{-3}$  из следующих ниже соображений. Согласно [Ляхов, Покровский, 1962] величина напряжения  $\sigma$  водонасыщенного грунта, соответствующая  $\epsilon = 0.1$ , составляет примерно 500 бар и эта величина возрастает линейно с ростом  $\epsilon$ :  $\sigma \sim \epsilon$ . Эта закономерность дает основание оценить  $\sigma = p \approx 5$  бар при  $\epsilon \approx 10^{-3}$ . Зависимость ( $\sigma \sim \epsilon$ ) для вакуумированного песка приведена в [Николаевский, 1981], откуда следует аналогичная пропорция ( $\sigma \sim \epsilon$ ). Скорость звука в песке  $\approx 400$  м/с. 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 [Ляхов, Покровский, 1962], волна такой амплитуды ударной быть не должна. Однако, если производная  $d^2\sigma/d\epsilon^2 > 0$ , волну можно считать ударной вне зависимости от величины  $\sigma$  [Ляхов, Покровский, 1962, стр. 52]. Там же показано, что если условие  $d^2\sigma/d\epsilon^2 > 0$  не выполняется, - волну можно считать плоской волной сжатия, которая распространяется в упруго-пластической среде.

## Взаимодействие ударных волн с преградой. Отколы и разрушения

*Взаимодействие волн.* Рассмотрим механизмы взаимодействия волн, возникающих при выходе ударной волны на «свободную» поверхность твердого тела. Наиболее полно этот вопрос рассмотрен в книге [Забабихин, 1997], 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. При выходе ударной волны на поверхность твердого тела образуется волна разрежения,двигающаяся в сторону, обратную движению УВ.



**Рис. 4.** Возможные типы распада разрыва [Забабихин, 1997]. 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.

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 [Забабихин, 1997] 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.

*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 села 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 [Забабакхин, 1997]. 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.

### **Сильные движения грунта Чуйского землетрясения**

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 ( $M = 7.7$ ;  $50.0^{\circ}$  N,  $90.0^{\circ}$  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 запада на восток»; в Томске - «землетрясения не происходило» [Жалковский, 1977] следует, что оба этих землетрясения в отдаленных пунктах проявлялись примерно одинаково. Согласно данным, приведенным в [Лутиков Донцова, Юнга, 2003] 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.

Участники экспедиции в эпицентральной зоне Чуйского землетрясения от Горно-Алтайского университета (время работы - первые числа октября) обнаружили трещины уже в с. Курай, а также по дороге на Актуру. В Курае трещина шириной до 10 см и длиной порядка 100 м образовалась в районе болота на окраине села. По дороге на Актуру (на рис. 1 река Актура) 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. 5). 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. 5) и разлома Кускуннур.

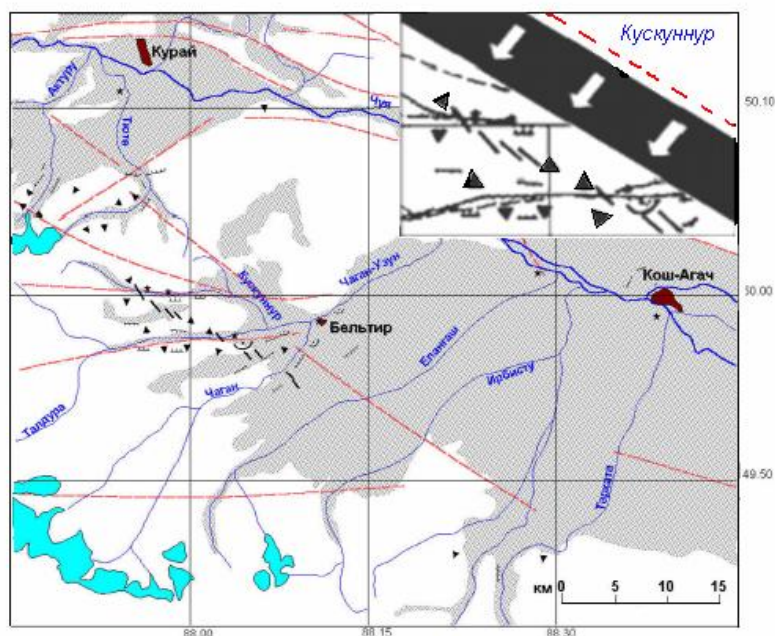


Рис. 5. Карта распространения сейсмодислокаций [Годаков и др., 2003]:

1 – сейсмоструктурные 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 рисунка – 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.

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 [Геодаков и др., 2003]. В дальнейшем, в этом разделе будем в основном цитировать эту работу, иногда привлекая неопубликованные данные очевидцев. Нарушения рельефа, по оценке авторов [Геодаков и др., 2003], образуют овал длиной 70 км и шириной около 15 км. Этот овал вытянут вдоль простирания разрыва (СЗ-ЮВ) и хорошо коррелирует с ориентировкой длиной 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.

Обсудим итоги предварительных исследований сильных движений Чуйского землетрясения. Будем следовать авторам [Геодаков и др., 2003], которые выделяют четыре вида нарушений: 1) сейсмоструктурные разрывы, 2) обвалы и оползни, 3) вспучивание и проседание почвы и 4) образование грифонов, излияние воды и грязи на поверхность.

#### *Сейсмоструктурные 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 погребении Северо-Чуйского хребта (рис. 6). 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.

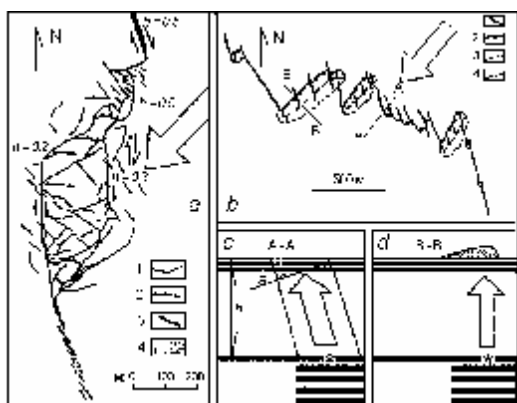
Сейсмоструктурные разрывы представляют собой эшелонированную систему трещин сжатия и расширения, укладываемую в линию СЗ простирания. Такая структура сейсмоструктурного разрыва, по мнению авторов [Геодаков и др., 2003], характеризует подвижку в очаге как сдвиг в горизонтальной плоскости. Строение зоны 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. 6-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 напозданием 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 сейсмоструктурные 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 6-б). Сейсморвы в этой районе принимают колоссальные масштабы, характеризуются 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, сдвигаящие 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. 6.** Слева: (а) структура сейсморазрыва на водоразделе рек Чаган и Елангаш: 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 [Геодаков и др., 2003]. 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 сопровождались массовыми обвалами и осыпными явлениями. Часто обвалы наблюдались на склонах, с углом наклона, менее угла естественного откоса (25°). 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 [Геодаков и др., 2003] описывают грифоны, в которых наблюдается выброс глины на поверхность в виде слоя толщиной не менее одного метра и занимаемой площадью около 50 м<sup>2</sup>. Объем песчанно-глинистой грязевой массы такого грифона, без учета ушедшей воды, значительно больше, он превышает 1000 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 очевидцев, в долине Чагана, высота 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.

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.

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° 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. 5).

**Результаты наблюдений атмосферного электричества, геомагнитного поля и инфразвука в период афтершоковой активности Чуйского землетрясения (АЛТАЙ, 27.09.2003)**

В ноябре 2003 г. Геофизической обсерваторией "Ключи" АСФ ГС СО РАН на Алтае были выполнены непрерывные измерения инфразвука, вертикальной составляющей атмосферного электрического поля и полной напряженности магнитного поля Земли. Целью этих непродолжительных экспериментов, проводимых в активной сейсмической зоне, было тестирование аппаратуры и получение предварительной информации о возмущениях в геофизических полях при землетрясениях. Кроме того, по результатам измерений предполагалось сделать некоторые оценки в отношении проектируемого на Алтае комплексного геофизического полигона (место, состав измерительных средств, условия эксплуатации и т.п.).

Измерения проводились с 5 по 9 ноября 2000 г. на сейсмостанции "Акташ" АСФ. За пять суток наблюдений штатной сейсмической аппаратурой было зарегистрировано 15 толчков с энергетически классом  $K = 7.4 - 9.9$  на гипоцентральных расстояниях  $L \approx 11 - 49$  км. Параметры этих событий представлены в таблице (по данным оперативной обработки непосредственно на сейсмостанции).

Таблица 2

Характеристики афтершоков, зарегистрированных на сейсмостанции "Акташ" с 5 по 9 ноября 2003 г.

№ п/п	Дата	Время, УТ	Расстояние L, км	класс K	dt, с	δt, с
1	05.11.03	15:17:58	40	8.8	5.5	1.2
2	05.11.03	18:29:13	18	8.4	2.4	0
3	05.11.03	18:35:48	49	9.9	7.0	0
4	07.11.03	00:30:51	11	7.4	1.7	0.8
5	07.11.03	04:37:13	20	8.3	2.5	1.1
6	07.11.03	06:27:30	23	8.6	3.0	1.5
7	08.11.03	05:15:00	18	8.6	2.3	0.7
8	08.11.03	06:26:48	11	7.9	1.5	1.5
9	08.11.03	06:29:35	11	7.4	1.5	1.0
10	08.11.03	08:52:09	12	8.6	1.5	0.6
11	08.11.03	08:53:28	32	8.9	-	-
12	08.11.03	09:28:03	16	7.5	2.0	1.3
13	08.11.03	11:36:52	36	9.4	4.5	1.1
14	08.11.03	12:36:40	21	8.4	2.5	0.5
15	09.11.03	03:04:26	11	7.8	1.5	1.8

Примечания:

а) расстояние вычислено по разности ( $\Delta t$ ) вступления Р- и S-волн на сейсмостанции "Акташ" ( $L = 8.2 \Delta t$ ); б)  $dt$  – разность вступлений между слабой (Р) и сильной (S) волнами на записи акустического сигнала от землетрясения; в)  $\delta t$  – разность между первым вступлением акустического сигнала и временем первого вступления Р-волны землетрясения (колонка 3 в таблице); г) №№ 1, 3, 10 и 13 события включены в оперативный Каталог землетрясений АСФ ГС СО РАН.

### *Аппаратура*

Для акустических измерений в инфразвуковом диапазоне (диапазон частот примерно от 2 до 15 Гц) использовался комплект аппаратуры, включающий два пьезокерамических датчика ПДС-7 и электретный микрофон МКЭ-3 с дифференциальными усилителями собственной разработки. Ожидалось, что использование акустических датчиков различного типа позволит повысить надежность выводов о достоверности зарегистрированных сигналов. Специальная калибровка аппаратуры не выполнялась; чувствительность акустических каналов в инфразвуковом диапазоне оценивается примерно на уровне единиц мПа. Вариации вертикальной составляющей атмосферного электрического поля измерялись с помощью датчика струнного типа с порогом чувствительности порядка 1 В/м, предназначенного для проведения регулярных обсерваторских наблюдений больших изменений электрического поля.

Регистрация выполнялась на персональном компьютере с помощью 16-разрядного АЦП, плата которого устанавливается непосредственно в ISA-слот РС. Периодичность измерений составляла 21 мс. Опрос датчиков выполнялся поочередно в каждом измерении с задержкой между каналами 3 мс. Регистрация велась сериями, продолжительность каждой серии 58 мин. Основная аппаратная проблема заключалась в обеспечении надежной синхронизации по времени, поскольку в составе комплекса отсутствовал соответствующий блок (GPS-приемник или высокоточный генератор) и для временных отметок использовался системный таймер компьютера (специальный драйвер позволял снимать его показания с точностью не хуже 0.1 мс). Поэтому перед каждым циклом (обычно 4-9 серий по 58 мин.) системное время устанавливалось вручную (погрешность не более 0.5 с) и контролировалось в конце серии. Уход таймера РС составляет около 0.59 с/час; при обработке учитывалась соответствующая временная поправка. Суммарная погрешность временной синхронизации оценивается в  $\pm 1$  с. Отметим, что измерительный комплекс разрабатывался и использовался нами при проведении исследований особенностей генерации сейсмических и акустических волн в ближней зоне работающего мощного сеймовибратора и вызываемых при его работе возмущений в геомагнитном поле и в атмосферном электрическом поле Земли [Кузнецов и др. 1999].

Измерения модуля геомагнитного поля выполнялись с помощью абсолютного протонного магнитометра POS-1, основанного на эффекте Оверхаузера (разработка УПИ-УГТУ, г. Екатеринбург, <http://www.dpt.ustu.ru/LabQMag/aboutus.htm>). Магнитометр имеет абсолютную точность не хуже  $\pm 0.3$  нТл и чувствительность около 0.05 нТл при цикле измерений 3 с. Управление режимами работы и регистрация результатов измерений осуществляется с помощью персонального компьютера через последовательный порт RS232 [Сапунов и др. 2003]. Для инициализации измерений в POS-1 используется внутренний высокоточный генератор, однако для установки внутреннего времени при запуске программы регистрации используется системный таймер компьютера, который устанавливался вручную. Точность временной синхронизации измерений оценивается в  $\pm 1$  с. Аналогичный магнитометр в этот период работал в режиме непрерывного мониторинга на Геофизической обсерватории "Ключи" АСФ ГС СО РАН (г. Новосибирск, расстояние от сейсмостанции "Акташ" более 600 км).

### *Условия измерений*

Аппаратура была развернута на территории сейсмостанции "Акташ" 5 ноября 2003 г. Далее по тексту будем использовать обозначения: датчики ПДС-7 – "А" и "Р", микрофон

МКЭ-3 – "Г", электрометр – "Е". Усилители, блоки питания, компьютеры были установлены непосредственно в здании сейсмостанции. Инфразвуковые датчики и электрометр из-за небольшой длины сигнальных кабелей располагались в палисаднике, рядом со зданием. Микрофон "Г" был закреплен на стене здания, датчики "А", "Р" – закреплены на ограде, огораживающей палисадник (у земли). Электрометр "Е" был установлен на деревянной подставке высотой около 0.5 м. 8 ноября датчик "А" был перенесен примерно на 30 м к юго-западу. Магнитометр до 7 ноября был установлен на деревянном подставке высотой 0.5 м в теплице (примерно в 10 м от здания), а затем был перенесен в старый деревянный дом к северу от здания сейсмостанции (примерно в пятидесяти метрах от первоначального места).

Можно отметить следующие особенности условий расположения аппаратуры, которые могли быть существенными для измерений и интерпретации результатов:

- к юго-востоку от сейсмостанции, на расстоянии примерно 50 м проходит асфальтовая дорога с интенсивностью движения днем 1-2 автомобиля в час. Движение автомобилей уверенно регистрировалось магнитометром. Влияние на акустические измерения заметно не проявилось;

- непосредственно перед сейсмостанцией проходит проселочная дорога, движение по которой эпизодическое, но эффект в магнитном поле значительный (амплитуда импульсной вариации достигает 5-10 нТл);

- на расстоянии примерно 200-300 м к северо-западу находится ЛЭП. Ожидалось, что ее влияние на магнитные измерения будет существенным. Однако уровень помех (шум) в данных POS-1 оказался незначительным (ниже шума на обсерватории "Ключи" в Новосибирске);

- источником шума для инфразвуковых измерений являются лес, окружающий сейсмостанцию (расстояние около 20 м на северо-западе и более 50 м на юго-востоке) и река на северо-западе (сильное течение). Следствием близости акустических датчиков к зданию было большое количество помех из-за открытия (закрытия) дверей, перемещения людей и служебного автомобиля (работа двигателя, его движение, хлопанье дверей), в основном в дневное время;

- значительным источником магнитных помех был служебный автомобиль УАЗ-469, который стоял во дворе сейсмостанции. Перемещения автомобиля были прекрасно видны на записях магнитометра POS-1;

- общее расположение станции (в ущелье), вероятно, могло способствовать появлению многократного эхо в акустическом сигнале.

Температура в период работы на станции колебалась от  $-8^{\circ}\text{C}$  (днем) до  $-22^{\circ}\text{C}$  (ночью).

### *Результаты инфразвуковых измерений*

Четырнадцать землетрясений из пятнадцати, зарегистрированных на сейсмостанции штатной аппаратурой (см. таблицу), были также уверенно зафиксированы в записях всех трех акустических датчиков (одно событие из 15 попало на временной интервал между сериями). На рис. 7 в качестве примера представлены результаты акустической записи для землетрясения 7 ноября в 00:30UT (№4 в таблице). Отметим практически полное отсутствие техногенных помех, поскольку измерения выполнены рано утром в выходной день. Сигнал большой амплитуды, видимый на записи (рис. 7-а) примерно через 2 мин. после землетрясения, связан с активностью дежурного сейсмолога на станции при оперативной обработке события. Кривые на рис. 7-б подобны, основные особенности сигнала проявляются одинаково и синхронно по времени. Небольшое различие связано, вероятно, с расположением датчиков и несколько различающимися их амплитудно-частотными характеристиками. Отметим также некоторые особенности, характерные для всех акустических записей (подробнее будут рассмотрены ниже):

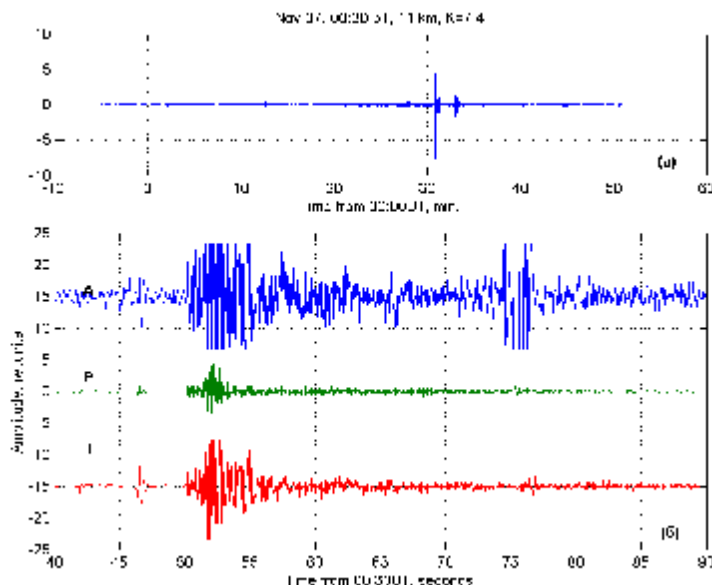
– структура акустического сигнала идентична структуре сейсмического сигнала. Сначала регистрируется сигнал с небольшой амплитудой (аналог сейсмической Р-волны), затем, через несколько секунд, – более мощный сигнал (аналог S-волны);

– время начала акустического сигнала незначительно (около 1 с) опережает время землетрясения (приход Р-волны, зарегистрированный на сейсмостанции "Акташ");

– продолжительность акустического сигнала составляет около 20-30 с.;

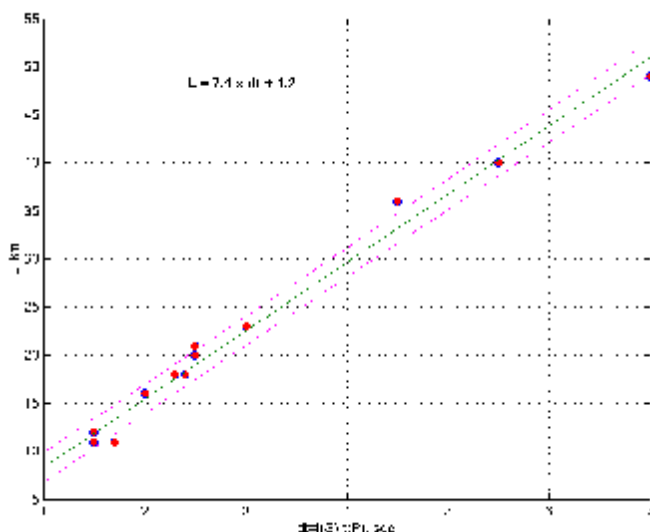
– во многих случаях перед сигналом (за несколько секунд), связанным с землетрясением, виден короткий сигнал инфразвука.

Анализ временной задержки  $dt$  между началом более слабого (первого) акустического сигнала и началом более сильного (второго) сигнала показал, что она пропорциональна гипоцентральному расстоянию  $L$ , определенному на сейсмостанции по разности вступления Р- и S-волн (см. таблицу). Зависимость  $L(dt)$  представлена на рис. 8, где также показана ее линейная аппроксимация  $L(\text{км}) = 7.1dt(\text{с}) + 1.2$ . К сожалению, данных для надежного определения величины наклона прямой  $L(dt)$  недостаточно (преимущественно были зарегистрированы близкие толчки). Так, возможная погрешность в определении величины  $dt$  для землетрясения №3 ( $L=49$  км) в 1 с может изменить значение  $dL/dt$  до 8 км/с.



**Рис. 7.** Пример записи инфразвукового сигнала во время землетрясения 7 ноября в 00:30:51UT (расстояние 11 км,  $K=7.4$ ). (а) – вид полной записи 58-минутной серии для датчика "Р", (б) – фрагмент записи для трех акустических датчиков (кривые "А" и "I" для наглядности смещены по ординате). По оси ординат – амплитуда сигналов в вольтах.

В последнем столбце таблицы приведены разности  $dt$  между началом акустического сигнала и приходом сейсмического сигнала (по данным оперативной обработки сейсмостанции "Акташ"). Среднее значение  $dt$  составляет 0.9 с, стандартное отклонение  $\pm 0.5$ . С учетом ранее сделанной априори оценки погрешности синхронизации системного таймера  $\pm 1$  с получаем ошибку для среднего  $dt$  около  $\pm 0.3$  с, что позволяет говорить о неслучайном характере наблюдаемой временной рассогласованности акустического и сейсмического сигнала. Однако не исключена возможность и того, что существует неучтенная систематическая погрешность синхронизации. В принципе, используя внешний локальный источник, генерирующий как сейсмический, так и акустический сигналы, можно выполнить более точную привязку нашего комплекса к шкале времени. Такая попытка была сделана по данным сейсмической аппаратуры Горного института УрО РАН (Пермь), также установленной в это время на станции "Акташ". В акустике и в сейсмических записях было выделено несколько сигналов, которые достаточно надежно сопоставлялись между собой по времени. Это позволило сделать вывод о большой вероятности существования систематической погрешности таймера порядка 1 с.



**Рис. 8.** Зависимость расстояния до землетрясения  $L$  от разности вступления слабого и сильного акустического сигнала  $dt$ . Маркерами показаны экспериментальные данные, сплошная линия – линейная аппроксимация  $L(dt)$ . Верхней и нижней линиями показан доверительный интервал  $\pm\sigma$ .

В половине случаев (№№ 1,4,5,7,10,11,12 по таблице) перед акустическим сигналом, отождествляемым с землетрясением, наблюдаются слабые короткие сигналы. Разброс интервалов времени между этими импульсами и основным событием достаточно большой и составляет от 2 до 10 с. Корреляции с какими-либо другими характеристиками землетрясений не обнаружено. Данное обстоятельство и невысокая вероятность появления этих аномалий позволяют предположить, что они являются случайными помехами. К сожалению, практически все землетрясения происходили в такое время суток, когда техногенное влияние на датчики, расположенные вблизи здания сейсмостанции, было высоким и, соответственно, была большая вероятность проявления помех. Исключение составляет землетрясение утром 7 ноября (00:30UT) с импульсом, предшествующим основному сигналу примерно на 3.5 с.

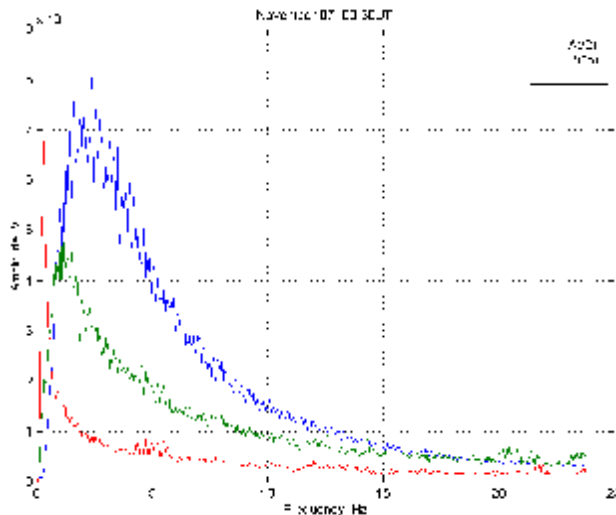
Большой интерес представляет динамический спектр зарегистрированных акустических сигналов, генерируемых при землетрясении. На рис. 9 показаны сглаженные амплитудные спектры, вычисленные по 25-минутным фрагментам инфразвуковой записи, сделанной 7 ноября в шесть часов утра по местному времени. Выбранные фрагменты практически не содержат помех, поэтому кривые показанных спектров представляют собой АЧХ акустических каналов, дополненные спектром фонового шума на сейсмостанции. В логарифмическом масштабе в диапазоне от 3 до 20 Гц спектры практически линейны.

Полученные спектральные характеристики использовались для того, чтобы выровнять спектры акустических сигналов, зарегистрированных во время землетрясений. На рис. 10 (датчики "А", "Р" и "Г", соответственно) представлен пример такого динамического спектра для события 03:04UT 9 ноября, вычисленного по фрагментам записи в скользящем окне шириной 1.3 с. Время отсчитывается от момента землетрясения в секундах. Спектры на рис. 9 являются типичными для всех событий, когда инфразвук был достаточно сильным. Отметим следующие особенности (некоторые из них более отчетливо проявляются для других толчков):

- амплитуда спектральных составляющих на высоких частотах в целом больше, чем на низких (подчеркнем, что спектры были выровнены с учетом АЧХ акустических каналов; без этого, конечно, низкочастотные компоненты преобладают по амплитуде);

- высокочастотные составляющие акустического сигнала проявляются в спектре более длительное время. Вероятная причина этого – их большая амплитуда в целом;

– в спектрах просматривается полосовая структура с широкополосной помехой на частотах примерно 6, 12-13 и 17-18 Гц. Эти помехи присутствуют и в фоновом сигнале, однако, достаточно заметно проявляются во время землетрясений, при больших амплитудах сигнала.

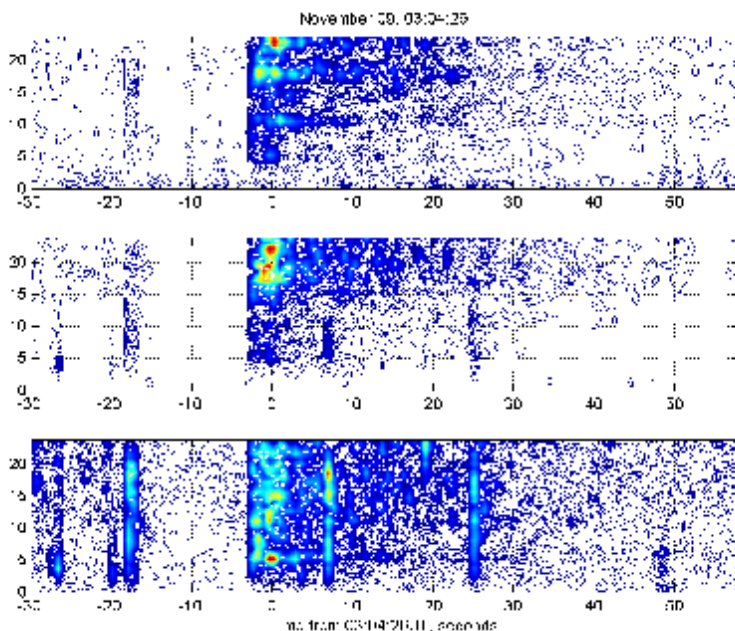


**Рис. 9.** Сглаженные амплитудные спектры, полученные по 25-минутной записи инфразвука в 6 часов утра 7 ноября, содержащей только фоновый шум. Для наглядности спектр "А" смещен по вертикали на 0.1, спектр "I" - на 0.2.

Из-за больших техногенных помех не представляется возможным выделить надежно аномалии в инфразвуке, предшествующие землетрясению, или акустические сигналы, которые могли быть сгенерированы процессами, происходящими в эпицентральной области, и распространяющиеся от источника до приемника по атмосферному каналу. Такая задача может быть поставлена, если использовать специальные методы обработки и при наличии некоторой модели генерации инфразвука очагом землетрясения, которая бы ограничивала временные рамки для поиска аномальных акустических сигналов в записи.

Во время наблюдений на сейсмостанции "Акташ" в рассматриваемый период в некоторых случаях основному удару предшествовал слышимый многими наблюдателями подземный гул, который, вероятно, имеет ту же причину, что и регистрируемый нами инфразвуковой сигнал. Ранее, в период более близкий к Чуйскому землетрясению, когда сейсмическая активность была значительно выше, подземные гулы наблюдались операторами значительно чаще. Отмечались, со слов очевидцев, и такие случаи, когда после хорошо различимого гула, – удара не следовало. Длительность гула перед ударом

составляла примерно 1-3 секунды, что согласуется с данными [Шебалин, 2003].



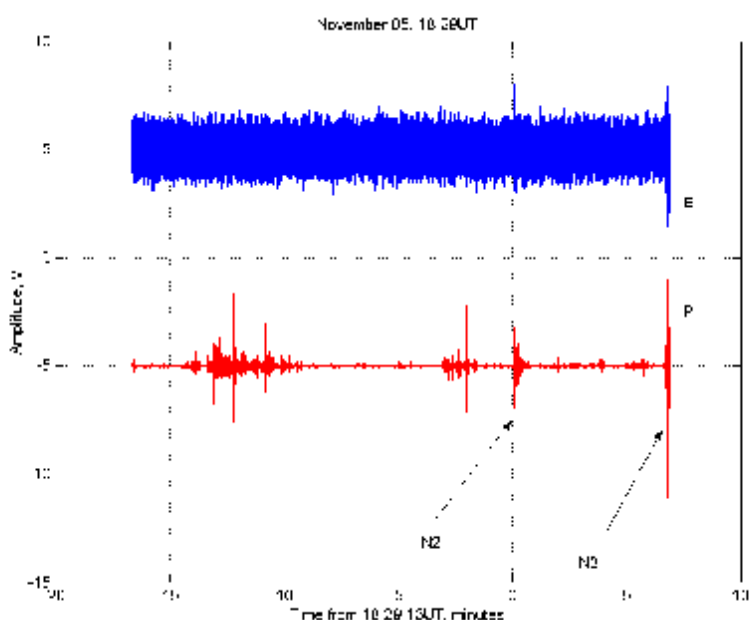
**Рис. 10.** Динамические спектры акустического сигнала во время землетрясения 9 ноября 03:04:26UT (сверху вниз – датчики "А", "Р" и "I"). Время представлено в секундах, "0" соответствует моменту вступления сейсмической Р-волны по данным штатного сейсмометра. По оси



ординат частота в Гц. Каждая временная оценка амплитудного спектра сделана по фрагменту акустической записи в скользящем временном окне шириной 1.3 с (использовалась стандартная функция Spectgram из пакета MatLab). Нелинейность АЧХ и фонового шума (при отсутствии помех) учтена нормировкой.

### *Результаты измерений атмосферного электрического поля*

Измерения атмосферного электрического поля представляют собой достаточно сложную задачу даже для обсерваторских условий. При наших измерениях на сейсмостанции "Акташ" в ноябре условия были далеки от нормальных. Из-за ограниченной длины кабеля датчик "Е" был установлен очень близко к зданию станции. Кроме того, недалеко от датчика находились высокие деревья, что также могло оказывать влияние на измерения (для нормальной работы электрометр рекомендуется устанавливать на открытой ровной местности). Низкая температура воздуха (в особенности ночью) и большой ее суточный перепад приводили к периодическим отказам датчика - за весь период измерений достоверная запись вариации электрического поля получена только для двух землетрясений 5 ноября (№2 и №3 в таблице).



**Рис. 11.** Записи вариаций атмосферного электрического поля (E) и инфразвука (P) во время двух землетрясений 5 ноября (N2 и N3). Время по оси абсцисс отсчитывается в минутах от момента первого землетрясения (N2). Амплитуда сигналов дана в вольтах; к сигналу (E) применен множитель  $10^3$ ; кривые для наглядности смещены.

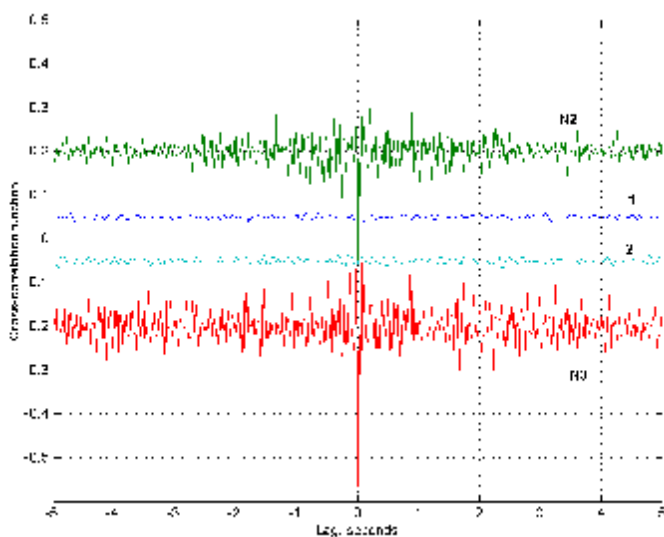
На рис. 11 представлен 25-минутный фрагмент записи акустического датчика "P" и электрометра "E", на котором землетрясения обозначены как "N2" и "N3". Кривая E получена из исходных данных фильтрацией низкочастотных составляющих (частоты ниже 5 Гц). Как видно на рис. 11, оба землетрясения достаточно уверенно проявляются как в записи электрического поля, так и в инфразвуке.

Основная проблема при идентификации сигналов, генерируемых при землетрясении в различных геофизических полях, состоит в доказательстве того, что датчики не регистрируют собственные механические колебания при толчке, т.е. не работают как сейсмографы. В случае на рис. 11 таким доказательством в определенной степени может быть отсутствие сигналов в E во время достаточно сильных сигналов в акустике, например, видимые за 10-13 мин. до землетрясения, хотя сильный инфразвуковой сигнал не обязательно должен сопровождаться значительными механическими колебаниями почвы, а значит и электрометра. Но, с другой стороны, датчик "E" не реагировал на заведомо сильные вибрации, возникающие при передвижении по территории станции автомобиля. Еще одним фактором является существенное различие спектров акустических сигналов от землетрясения и спектров помех (скорее всего связанных с перемещениями сотрудников по территории станции). В спектрах акустических сигналов от землетрясения, большая часть энергии лежит в высокочастотной области, в то время

как в спектрах помех, – в низкочастотной. При большей чувствительности электрометра на высоких частотах это может приводить к селективности воздействия. Однако спектры сигнала  $E$ , вычисленные для временных интервалов, охватывающих период землетрясения и вне его, представляют собой спектр "белого" шума и различаются только амплитудой во всей полосе частот (больше 5 Гц). Отметим также, что электрометр подобного типа использовался нами при изучении вариаций атмосферного электрического поля, возникающих во время работы мощных виброисточников, и не показал заметной зависимости от механического воздействия на него в ближней зоне сеймовибраторов [2].

Изложенное выше позволяет предположить, что наблюдаемые во время землетрясений сигналы в электрическом поле (рис. 11) представляют собой действительные вариации электрического поля. На рис. 12 показаны взаимные корреляционные функции (ВКФ) между акустическим и электрическим сигналами. ВКФ вычислены по фрагментам записей, полученных во время землетрясений (№ 2 и № 3), и фрагментам фоновых записей – без сильной помехи и с сильной помехой в акустике. ВКФ для наглядности смещены по вертикали. Как видно из рис. 12, фоновые сигналы не коррелируют, тогда как ВКФ( $P, E$ ) во время землетрясений достигает  $-0.2...-0.4$  при нулевом сдвиге. Более детальный анализ позволяет выделить сдвиг примерно на  $1/3$  интервала дискретизации, который связан с задержкой между последовательно опрашиваемыми каналами АЦП и равный 6 мс для датчиков "P" и "E".

Синхронные по времени вариации электрического поля  $E$  и инфразвука  $P$  позволяют предположить, что сигнал  $E$  во время землетрясения может быть генерирован при колебании во время толчка электрических зарядов в районе сейсмостанции (при этом ожидается, что колебания будут синфазны на значительной площади).



**Рис. 12.** Взаимные корреляционные функции между инфразвуковым ( $P$ ) и электрическим ( $E$ ) сигналами. "N2", "N3" - ВКФ вычислены по фрагментам записей во время землетрясений 5 ноября (см. №2 и №3 в таблице), "1" и "2" - ВКФ вычислены по записи фона и записи, содержащей сильную помеху в акустике. По оси абсцисс - запаздывание в секундах. Кривые для наглядности смещены по вертикали.

#### *Результаты магнитных измерений*

Магнитные измерения были выполнены магнитометром POS-1 с помощью штатной программы, поставляемой с прибором и работающей в среде DOS. Использовался персональный компьютер типа PC386SX. Измерения выполнялись с временной дискретностью  $\tau = 3$  с. Выбранное значение  $\tau$  отличается от принятого на Геофизической обсерватории "Ключи" (Новосибирск)  $\tau = 5$  с, поскольку обеспечивает лучшее временное разрешение измерений без потери точности. Отметим, что магнитометр POS-1 не реагирует на собственные механические колебания, что является его несомненным достоинством при исследовании процессов, сопровождающих землетрясения. Результаты, полученные 5 и 6 ноября, очень плохие из-за сильных помех и практически непригодны для анализа. После переноса датчика POS-1 на новое место 7 ноября с 04:05UT качество

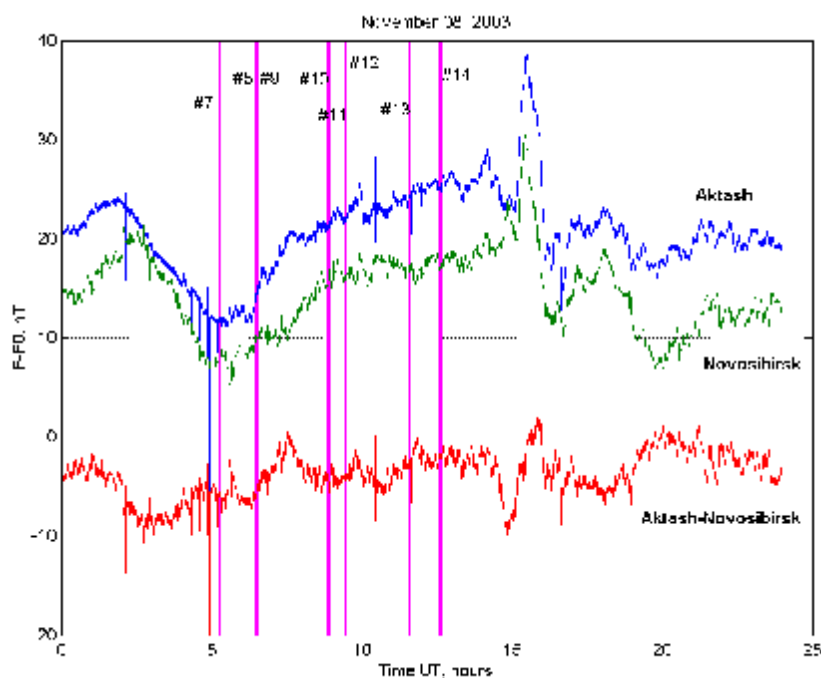
измерений заметно улучшилось – исчезли импульсные помехи и высокочастотные шумы, влияющие на оценку частоты прецессии.

На рис. 13 представлены результаты магнитных измерений в Акташе и Новосибирске за 8 ноября, а также разность  $F(\text{akt})-F(\text{nsk})$ . Стандартные 1-минутные данные  $F(\text{nsk})$  были интерполированы на моменты измерений  $F$  на станции "Акташ". Можно отметить следующие особенности:

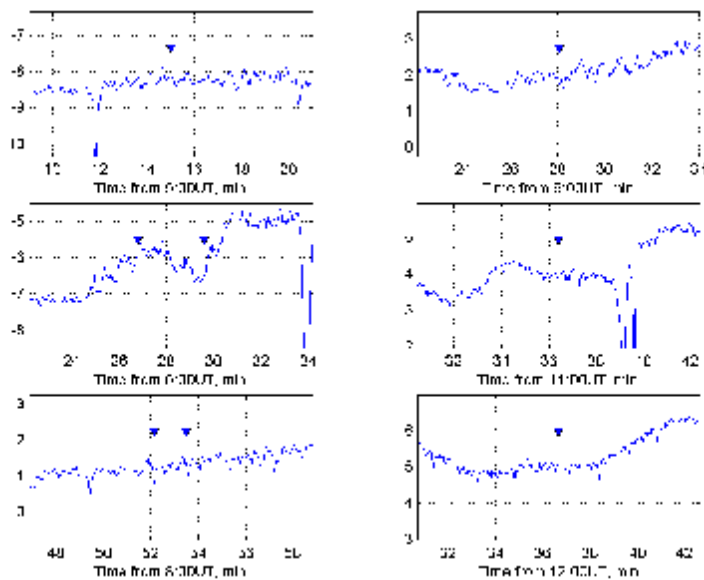
– корреляция вариаций  $F(\text{akt})$  и  $F(\text{nsk})$  невысокая практически во всем диапазоне частот (реальный смысл, конечно, имеют компоненты с периодами более 1 мин.). Оценки функции когерентности показали, что она достигает 0.5 только на частотах менее  $1/20 \text{ мин.}^{-1}$ . Это хорошо заметно по разностной кривой, в которой присутствуют и медленные и быстрые изменения поля, характер поведения которых указывает на то, что они возникают из-за временной несинхронности процессов. В то же время в целом морфология вариаций, связанных с геомагнитными возмущениями, подобна для обоих пунктов измерений;

– в кривой  $F(\text{akt})$  видны импульсные помехи, которые в большинстве случаев сопоставляются с движением автомобилей (как по шоссе, так и по территории сейсмостанции). Амплитуда магнитных сигналов от автомобилей, проезжающих по шоссе, составляет первые единицы нТл;

– фоновый шум в магнитном поле в Акташе в целом заметно ниже, чем на обсерватории "Ключи" (10 км от Академгородка, Новосибирск).



**Рис. 13.** Результаты магнитных измерений на Алтае и в Новосибирске 8 ноября 2003 г. Постоянная часть  $F_0$  для обоих пунктов вычтена – 58480 нТл для Акташа и 59390 нТл для Новосибирска. К разности  $F(\text{akt})-F(\text{nsk})$  прибавлено 900 нТл. По оси абсцисс время UT. Вертикальными линиями показаны моменты землетрясений, цифрами – их номера согласно таблице.



**Рис. 14.** Вариации полной напряженности магнитного поля  $F$  в периоды землетрясений 8 ноября 2003 г. Маркерами отмечены моменты землетрясений. Время UT по оси абсцисс (в минутах) отсчитывается от начала соответствующего часа. Вариации по оси ординат даны в нТл.

К сожалению, результаты (см. рис. 13) показывают, что обсерватория "Ключи" в Новосибирске не может быть базовым (опорным) пунктом для магнитных измерений на Алтае – остаточные разности модуля  $F$  достигают 10 нТл даже при относительно спокойном поле. Поэтому для дальнейшего анализа использовались только данные, полученные в Акташе. Более того, поскольку контроль  $F$  в Акташе по данным опорной станции вне эпицентральной зоны отсутствует, то получить надежные выводы в отношении медленных вариаций поля на стадии подготовки землетрясения или скачкообразных изменений уровня после толчка не представляется возможным. Проявление особенностей сейсмичности в магнитном поле можно искать в вариациях  $F$  с характерными временами от 1 мин. и меньше (в нашем случае – до 3 с).

На рис. 14 показаны фрагменты записи вариаций магнитного поля 8 ноября (см. кривую "Акташ" на рис. 13) шириной по  $\pm 6$  мин. относительно моментов землетрясений (последние отмечены треугольными маркерами). Большие отрицательные аномалии  $F$ , наблюдающиеся в 5, 6 и 11 час, являются следствием движения автомашин (хотя эти движения и не были зафиксированы в полевом журнале, отмеченные магнитные аномалии подобны тем, которые были надежно отождествлены как проявление эффекта перемещения транспорта). Как видно на рис. 14, аномалии с характерными временами до 1 мин. и амплитудами более 0.5 нТл отсутствуют.

#### *Обсуждение результатов измерений*

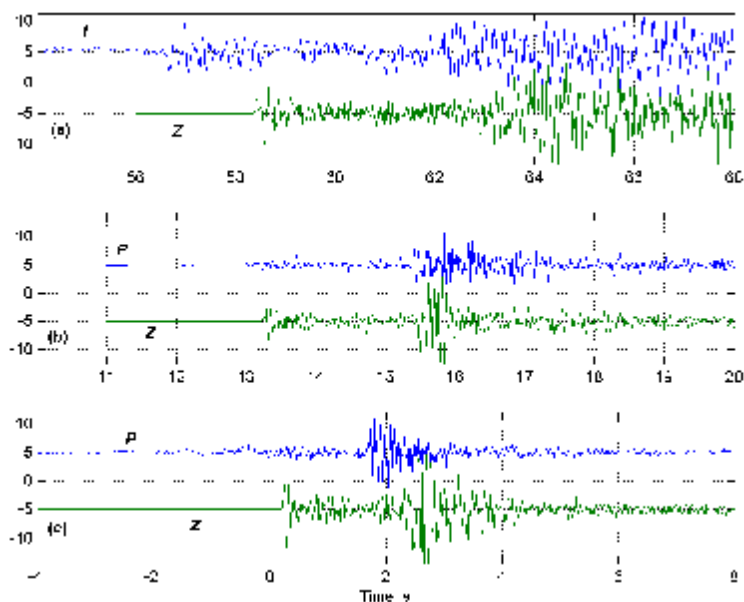
##### *Инфразвук*

Как видно из таблицы, акустический сигнал примерно на 1-2 секунды (иногда – меньше) опережает сигнал сейсмический. К сожалению, отсутствие надежной временной синхронизации при измерениях и результаты оценок систематической погрешности таймера косвенным путем, не позволяя с высокой степенью надежности подтвердить реальность полученной величины задержки  $\delta t$ . Предположим, что это не ошибка измерений. Наблюдаемое нами несовпадение времен прихода волн интерпретируем в рамках ударно-волновой модели землетрясения. В этом случае, незначительное опережение сигнала инфразвука относительно сейсмического сигнала может быть сопряжено с процессом лавинного образования трещин, возникающего в области гипоцентра землетрясения. При этом образуется не огромная трещина, как это обычно принято считать, а возникает ударная волна, которая распространяется к поверхности Земли со скоростью, отличающейся (немного больше) по величине от скорости  $S$ -волн. Отметим, что в наших наблюдениях не отмечалось связи времени опережения с

эпицентральной зоной. Время опережения во всех случаях составляло одну – две секунды. Вероятнее всего, что эта небольшая, но характерная для зарегистрированных нами афтершоков задержка связана с физикой возникновения собственно самого удара землетрясения. Иногда, как отмечалось нами выше, инфразвук в виде подземного гула регистрировался наблюдателями, находящимися в эпицентральной зоне, но удара за этим не следовало вообще. Это может означать, что по каким-то причинам ударная волна либо вообще не образовалась, хотя процесс лавинного образования трещин имел место, либо ударная волна разрушалась при распространении вверх и на поверхность земли вообще не выходила.

Интерпретация результатов наблюдений инфразвука, сопровождающего афтершоки, в контексте ударно-волновой модели землетрясения может быть подкреплена ещё одним фактом, который мы отмечали по ходу описания наблюдений. Речь шла о том, что линейная аппроксимация зависимости  $L = k dt$  по акустическим данным дает величину коэффициента  $k = 7.1$  км/с (см. рис. 8). В то же время для оценки величины  $L$  Чуйского землетрясения в АСФ ГС СО РАН используется соотношение  $L = 8.2 dt$  (величина  $L$  оценивается по формуле  $L = [V_P V_S / (V_P - V_S)] dt$ ). Несовпадение коэффициентов при  $dt$  можно отнести за счет неточностей измерений. Однако несовпадение времен прихода первых вступлений в сейсмике и инфразвуке можно найти объяснение в контексте ударно-волновой модели землетрясения. Согласно этой модели источником инфразвука может быть процесс лавинного образования трещин. В стандартной модели землетрясения, как отмечалось, принято считать, что процесс лавинного образования трещин приводит к образованию большой трещины, которая "выходит на поверхность" и вызывает разрушения. В ударно-волновой модели процесс лавинного образования трещин приводит к возникновению ударной волны, которая, распространяется к дневной поверхности и, выходя на поверхность - отражается. При отражении ударной волны, в среде возникают волны разгрузки (растяжения). Взаимодействие этих волн между собой и с грунтом, собственно, и приводит к возникновению сильных движений: разрывов, разуплотнений грунта и отколов скальных пород, т.е. к "трясению земли". Разность в коэффициентах при  $dt$ , возможно, не случайна, и в этом случае она несет информацию о процессах, происходящих в районе гипоцентра землетрясения и приводящих к образованию ударной волны. Если допустить, что приемник звука процесс лавинного образования трещин фиксирует, а сейсмоприемник настроен так, что звука "не замечает", и регистрирует только сигналы, вызываемые ударной волной, то наша интерпретация полученного результата может оказаться вполне адекватной рассматриваемому физическому процессу.

На рис. 15 представлены акустические и сейсмические сигналы для землетрясений №1,2,7 согласно таблице (сейсмические записи – это сейсмограммы, полученные на станции "Акташ" штатной аппаратурой). Рисунок показывает, что временной интервал между первым и вторым вступлениями на звуке всегда больше аналогичного интервала в сейсмике. Можно видеть, что запись сигналов от землетрясения в инфразвуке всегда значительно больше зашумлена, чем сейсмограмма. Обратим внимание на то, что в сигнале принятым микрофоном не наблюдается резкого, крутого переднего фронта, как это обычно видно на сейсмограммах. Эти факты свидетельствуют в пользу того, что "портрет" землетрясения в инфразвуке заметно отличается от привычной сейсмограммы. Возможно, эти наблюдения действительно говорят в пользу ударно-волновой модели землетрясения. Стоит ещё раз подчеркнуть наличие резких фронтов на сейсмограмме и их отсутствие в записях звука.



**Рис. 15.** Инфразвуковые сигналы (датчики I и P) и сейсмограммы (вертикальный канал Z, с/с "Акташ") землетрясений 5 ноября (a,b) и 8 ноября (c). Верхние кривые – акустика, нижние – сейсмические записи. Для наглядности кривые смещены по вертикали.

Получение более четкой картины регистрации инфразвукового сигнала, привязка ее к сейсмограмме и получение более представительных данных по регистрации обнаруженного здесь эффекта опережения звука главного толчка землетрясения примерно на 1 - 2 с, возможно, позволит в дальнейшем учесть это явление при построении модели землетрясения.

#### *Атмосферное электричество*

Обратим внимание на то, что зарегистрированные нами изменения атмосферного электрического поля коррелируют с «полезным» сигналом инфразвука (рис. 12), и "не замечают" инфразвуковой помехи другой природы (см. рис. 11). Полезный сигнал отличается от помехи не по амплитуде и частоте, а только тем, что в первом случае колебания воздуха, вызываемые колебаниями почвы, строго вертикальны. Подобное явление наблюдалось нами ранее, при изучении инфразвука вблизи работающего мощного сейсмодвибратора [Кузнецов и др. 1999]. Физика атмосферного электричества, так же как физика землетрясения, далеко не ясна. Обнаруженная нами корреляция инфразвука и атмосферного электричества, возможно, помогут приблизиться к пониманию природы этих явлений. Предварительно можно сказать, что если инфразвук предвещает главный удар землетрясения, то, возможно, он может производиться сейсмогенерирующей средой и в более ранние периоды, а не только непосредственно в момент удара. Возможно, и в этом случае будет наблюдаться корреляция звука с атмосферным электричеством. Если это так, то у сейсмологов может оказаться достоверный с точки зрения физики землетрясения признак, на использовании которого можно попытаться делать прогноз землетрясения. Пока же можно отметить, что каким бы не был реально источник атмосферного электричества (например, грозы), в любом случае, величина атмосферного электричества определяется током и проводимостью среды. Если принять ток константой, то проводимость, определяемая концентрацией разделенных электрических стратифицированных зарядов, может меняться, если эти заряды начинают синхронно колебаться под воздействием механических колебаний, представляющих собой инфразвук.

#### *Магнитное поле*

Johnston (1997) предлагает использовать термины "сейсмомангнитные" и "сейсмoeлектрические" эффекты для магнитных и электрических полей, генерируемых землетрясением, термины "тектономагнитные" и "тектоноэлектрические" эффекты для

явлений в полях, предшествующие землетрясениям (или возникающими в некоторые другие моменты). Поскольку у нас отсутствовал базисный магнитометр вне эпицентральной области (данные магнитометра POS-1 в Новосибирске из-за значительности расстояния не могут быть использованы в качестве опорных, что хорошо видно на рис. 13), то предметом анализа в нашем случае может быть только сейсмомагнитный эффект.

В основе сейсмомагнитных методов прогноза положено явление изменения величины магнитной восприимчивости изверженных горных пород, богатых магнетитом, таких как базальты, андезиты, диабазы и пр. При изменении механических напряжений в образцах этих горных пород, действительно было обнаружено явление, исследованное и описанное С.П. Капицей почти 50 лет тому назад [Капица, 1955]. В результате этих исследований автор [Капица, 1955] обнаружил незначительное (максимальный эффект порядка 2%) понижение магнитной восприимчивости базальтов при одностороннем сжатии образцов (на прессе) при изменении давления от 0 до 1 кбар. Далее он приходит к выводу, что "горные породы не являются подходящими объектами для физических исследований магнитоупругих эффектов, и поэтому вряд ли целесообразно более детально анализировать результаты опытов". Несмотря на столь неоптимистическое заявление, исследование и даже попытки использования эффектов изменения геомагнитного поля, якобы связанных с вариацией тектонических напряжений, получили широкое развитие в мире. В обзоре [Johnston, 1997] приводятся модельные оценки пьезомагнитного эффекта: для пород с намагниченностью порядка 1 А/м и чувствительностью к напряжению около  $10^{-3}$  МПа<sup>-1</sup> ожидаемая аномалия магнитного поля составляет несколько нТл. Возможно, такие эффекты действительно проявляются в геологической среде, состоящей в значительной степени из базальтов, но в Горном Алтае, в районе расположения сейсмостанции "Акташ", базальтов нет, – значит, нет, и не могут наблюдаться сейсмомагнитные эффекты, что было подтверждено нашими наблюдениями: Магнитометр, обладающий реальной чувствительностью порядка 0.05 нТл, не реагировал на афтершоковые толчки, находясь практически в эпицентре землетрясения.

Наш предыдущий опыт измерений магнитного поля вблизи работающего сейсмодвижителя [Кузнецов и др. 1999] показал, что мы практически всегда наблюдали изменение геомагнитного поля синхронно с сигналом от сейсмоприемника. И это несмотря на все наши попытки изолировать магнитометры других типов (по сравнению с прибором, используемым в настоящей работе) от воздействия сейсмических колебаний. Иначе, во всех наших экспериментах на сейсмодвижителе магнитометр "работал" как сейсмоприемник. В данном случае магнитометр принципиально не реагировал на механические колебания. Следовательно, можно считать, что прямая связь между тектоническими напряжениями, вызываемыми афтершоковыми землетрясениями и геомагнитным полем не подтверждена. Это, возможно, в будущем "снимет с повестки" сейсмомагнитные методы прогноза землетрясений, по крайней мере, на Алтае.

Подведем итоги, выделим наиболее интересные экспериментальные результаты, отметим оригинальность некоторых "нестандартных" попыток их объяснений. Однако, прежде всего, отметим, что в настоящей работе использовался измерительный комплекс, разработанный для решения другой задачи: регистрации возмущений геологической среды в ближней зоне работающего мощного сейсмодвижителя. Именно решением этой задачи был определен диапазон частот приемников и измерительной аппаратуры и ее чувствительность, что далеко не всегда удовлетворяло требованиям наблюдений афтершоковой активности. Отметим основные результаты:

1. Экспериментально обнаружено, что инфразвуковой сигнал предшествует сейсмическому сигналу. Причем в инфразвуковом сигнале достаточно четко выделяется структура, аналогичная структуре сейсмического сигнала: сначала приходит более слабый сигнал (аналог Р-волны), а следом за ней более сильный (аналог S-волны). Практически во всех случаях задержка сигнала S-волны относительно Р-волны в сейсмике меньше, чем в

инфразвуке. Вполне возможно, что нами зарегистрирован сигнал, который в слышимом диапазоне регистрируется как подземный гул. Этот сигнал, так же как подземный гул, опережает сейсмический сигнал примерно на 1-2 секунды, и эта задержка не зависит от величины эпицентрального расстояния. К сожалению, точность временной синхронизации наших измерений не позволяет считать полученные результаты достаточно надежными.

2. Обнаружена корреляция между сигналами инфразвука и атмосферного электрического поля в момент землетрясения. Помехи, наблюдаемые в инфразвуке и атмосферном электричестве, – не коррелируют.

3. Четко зафиксировано отсутствие сигналов в геомагнитном поле на уровне 0.5 нТл в момент землетрясения, что ставит под сомнение попытки делать прогноз землетрясения по вариациям в геомагнитном поле. Это утверждение, очевидно, требует для его уточнения проведения специальных исследований.

Полученные результаты позволяют сделать вывод о целесообразности продолжения наблюдений за инфразвуком, магнитным полем и атмосферным электрическим полем в период афтершоковой активности землетрясения. Целесообразно, по-видимому, иметь набор таких инструментов как дополнение к обычной аппаратуре сейсмостанций. Это позволит в дальнейшем подтвердить (или опровергнуть) изложенные выше результаты, а также позволит более реалистично относиться к интерпретации результатов наблюдений в контексте ударно-волновой модели землетрясения. При этом было бы желательно произвести некоторую модернизацию используемой аппаратуры, например, повысить частоту приемника инфразвука для того, чтобы выяснить, на сколько этот сигнал связан с подземным гулом. Следовало бы провести специальные исследования для того, чтобы уточнить факт повышения частоты звука перед толчком. Необходимо набрать большую статистику случаев связи вариаций атмосферного электрического поля с инфразвуком. Крайне важно выяснить, существует ли связь между геомагнитным полем и землетрясениями в других сейсмически активных регионах, в районах, в которых имеются изверженные породы, такие как базальты. Заметим, что исследования связи сейсмичности с вариациями геомагнитного поля ведутся повсеместно, в различных сейсмически опасных регионах Земли, однако, очевидно, что, используя полученный нами опыт, следует применять магнитометры, не зависящие от сейсмических воздействий на них, аналогичные тому, который использовался в настоящей работе.

### Литература

- Количественная сейсмология / *Аки К., Ричардс П.* Т. 1-2. – М.: Мир, 1983. 880 с.
- *Геодаков А.Р., Овсяченко А.Н., Платонова С.Г., Рогожин Е.А.* Материалы предварительного изучения сильного землетрясения 2003 г. на Горном Алтае // Электронный научно-информационный журнал «Вестник отделения наук о Земле РАН» 2003. № 1 (21) [http://www.scgis.ru/ruaiaian/cp1251/h\\_dgggms/1-2003/screp-8.pdf](http://www.scgis.ru/ruaiaian/cp1251/h_dgggms/1-2003/screp-8.pdf)
- *Гвоздев А.А., Кузнецов В.В.* Откольные явления в грунтах, наблюдаемые при сейсморазведке // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1967. № 5. С. 21-27.
- *Жалковский Н.Д.* Алтай и Саяны // Новый каталог сильных землетрясений на территории СССР. – М.: Наука, 1977. С. 499-500.
- *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.
- Некоторые вопросы газодинамики взрыва / *Забабахин Е.И.* – Снежинск: РФЯЦ–ВНИИТФ, 1997.
- Введение в нелинейную физику / *Заславский Г.М., Сагдеев Р.З.* – М.: Наука, 1988. 368 с.
- Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений / *Зельдович Я.Б., Райзер Ю.П.* – М.: Наука, 1966.
- *Каница С.П.* Магнитные свойства изверженных горных пород при механических напряжениях // Изв. АН СССР, сер. геофиз. 1955. № 6. С. 489-504.
- Механика землетрясений / *Касахара К.* – М.: Мир, 1985. 264 с.



- Физика земных катастрофических явлений / Кузнецов В.В. –Новосибирск: Наука, 1992. Кузнецов В.В. Ударно-волновая модель очага землетрясения // Науки о Земле. –М.: Вузовская книга, 2001. С. 47-62.
- Физика горячей Земли / Кузнецов В.В. -[www.uiggm.nsc.ru/~kuz/site.htm](http://www.uiggm.nsc.ru/~kuz/site.htm)
- Кузнецов В.В., Плоткин В.В., Хомутов С.Ю. и др. Исследование геофизических возмущений при вибросейсмическом зондировании // Геол. и геофиз. 1999. Т. 40, № 3. С. 442-456.
- Кузнецов В.В. Модель самоорганизации ансамбля излучающих звук трещин // ПМТФ. 2001. Т. 42, № 4. С. 184-189.
- Проблемы гидродинамики и их математические модели / Лаврентьев М.А., Шабат Б.В. – М.: Наука, 1973.
- 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» 2003. № 1 (21) - [http://www.scgis.ru/ruaaiian/cp1251/h\\_dgggms/1-2003/screp-6.pdf](http://www.scgis.ru/ruaaiian/cp1251/h_dgggms/1-2003/screp-6.pdf)
- Взрывные волны в грунтах / Ляхов Г.М., Покровский Г.И. –М.: ГНТИ. 1962. 103 с.
- Николаевский В.Н. Динамическая прочность и скорость разрушения // Сб. Механика. Удар, взрыв и разрушение. 26. –М.: Мир. 1981. С. 166-203.
- Регель В.Р., Слуцкер А.И. Кинетическая теория прочности // Физика сегодня и завтра. – Л.: Наука, 1973. С. 90-175.
- Абсолютный Оверхаузеровский магнитометр POS-1 и опыт его применения на магнитных обсерваториях. Метрологические основы магнитных наблюдений Сибири и Дальнего Востока / Сапунов В.А., Денисов А.Ю., Савельев Д.В. и др. Сб. докладов. Петропавловск-Камчатский: ИКИР ДВО РАН, 2003. С.20-29.
- Неустановившиеся движения сплошной среды / Станюкович К. П. –М.: Наука. 1971. 854 с.
- Количественная макросейсмика (фрагменты незавершенной монографии). Вычислительная сейсмология / Шебалин Н.В. –М.: Геос, 2003. Т. 34.
- Anderson J.G., Yu G. Predictability of strong motion from the Northridge, California Earthquake. //Bulletin Seismological Society of America 1996. V. 86, №1. Part B. P. 100-104.
- Dicke R.H. Coherence in spontaneous radiation processes // Phys. Rev. 1954. V. 93. P. 99-110.
- 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.
- Johnston M.J.S. Review of electric and magnetic fields accompanying seismic and volcanic activity // Surv. Geophysics. 1997. V.19. P. 441-475.
- 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, № B5. P. 8687-8698.
- 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.
- Shen Z.-K. et al. Northridge Earthquake rupture models based on the Global Positioning System measurements //Bulletin Seismological Society of America 1996. V. 86, №1. Part B. P. 39-48.
- Smith D.L., Evans B. Diffusional crack healing in quartz //J. Geophys. Res. 1984. V. 89, № B6. P. 4125-4135.
- 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 // BSSA. 1996. V. 86. P. S49-S70.