

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК

ЭКСТРЕМАЛЬНЫЕ ПРИРОДНЫЕ ЯВЛЕНИЯ И КАТАСТРОФЫ

Том II

**ГЕОЛОГИЯ УРАНА,
ГЕОЭКОЛОГИЯ, ГЛЯЦИОЛОГИЯ**

Москва
2011

УДК 504.0
ББК 26.2
Г35

Экстремальные природные явления и катастрофы : в 2 т. / Отв. ред. А.О. Глико;
ИФЗ РАН. – М. : ИФЗ РАН, 2010; 2011.

ISBN 978-5-91682-012-6

Г35 Т. 2 : **Геология урана, геэкология, гляциология** / Отв. ред. В.М. Котляков, ИГ РАН;
отв. сост. А.Л. Собисевич, ИФЗ РАН; – М. : ИФЗ РАН, 2011.

ISBN 978-5-91682-014-0

Во втором томе коллективной монографии изложены результаты теоретических и экспериментальных исследований, связанных с изучением актуальных проблем современной геологии урановых месторождений, геэкологии и гляциологии, имеющих целью обеспечение безопасности населения и важных промышленных объектов на территории Российской Федерации. Анализируются основные промышленно-генетические типы урановых месторождений; рассмотрены новые прогрессивные технологии добычи радиоактивных материалов; изучено поведение актинидов в условиях долгосрочного хранения и захоронения отработанного ядерного топлива. Полученные научные результаты отражают современные проблемы безопасности атомной энергетики.

Приведены новые научные данные, связанные с изучением эволюции Антарктического и арктических ледниковых покровов, от состояния которых зависит уровень Мирового океана. Достаточно внимания уделено геэкологическим проблемам Северного Кавказа. Анализируются уникальные данные, полученные при проведении глубокого кернового бурения ледника на Западном плато вулканической постройки Эльбруса.

Изучены наиболее опасные геэкологические процессы на территории РФ, которые могут привести к гибели людей, ранениям и потере здоровья, а также к значительным материальным ущербам; разработан специальный ГИС-проект, который является готовым к использованию продуктом со всеми элементами, присущими автоматизированной информационной системе специального назначения, содержащей развернутые базы данных.

Полученные новые научные результаты и разработанные технологии уже востребованы на практике.

Для специалистов в области наук о Земле, строительства и чрезвычайных ситуаций.

УДК 504.0
ББК 26.2

The Volume II of the collective monograph presents the results of both theoretical and experimental studies of actual problems of modern geology of uranium deposits, geoecology and glaciology in order to mitigate issues on public safety and potentially hazardous industrial facilities and consequent risks on the territory of Russian Federation. Primary types of industrial uranium ore deposits are analysed, new progressive technologies of prospecting of radioactive materials are considered, the behaviour of actinides in long-time storages and nuclear waste burial sites are studied. The results obtained represent modern safety problems of nuclear power engineering.

New scientific data related to evolution of glaciers in Arctic and Antarctica governing the global level of world ocean are presented. Specific attention is paid to geoecological problems in Northern Caucasus. Genuine data gathered in the course of deep core drilling on the Western plateau of the Elbrus volcano.

Most significant hazardous geoecological processes on the territory of Russian Federation, threatening populated areas in terms of human health and injury, substantial property damage are studied. The specialized geographical information system (GIS) is the database driven product with high level of automation and it has been developed in frames of the actual research initiative.

The new fundamental scientific results obtained and the new technologies developed are of particular interest for practical applications.

The book will satisfy the needs of specialists in Earth sciences, industrial construction applications and hazard assessment.

ISBN 978-5-91682-014-0
ISBN 978-5-91682-012-6

© Российская академия наук, 2011
© Коллектив авторов, 2011

ОЧАГ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ – СОБЫТИЯ И ПРЕДВЕСТНИКИ УДАРА

Учреждение Российской академии наук Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН

ВВЕДЕНИЕ

Очаг землетрясения включает в себя все зоны подготовки удара – это эпицентр удара (на свободной поверхности), гипоцентр (зона излучения сейсмических волн на глубине) и та часть вмещающих горных массивов, которая вовлечена в подготовку землетрясения. Цель данной работы – проследить за механикой развития деформационных событий в очаге, положив в основу *принцип вытеснения избыточных масс*.

В наше время эффект дилатансии – приращение объема геоматериала при его сдвиге – осознан и принят в механике горных пород. Возникающие объемные деформации (за счет раскрывшихся трещин и пор) приводят к вытеснению «лишнего» объема во вмещающую среду. Заметим, что ранее именно учет [8, 11] дилатансии позволил количественно согласовать размеры полости подземного ядерного взрыва с излучением упругих волн.

Действительно, сейсмические взрывные волны отвечают [1, 11, 37] упругой динамике расширяющейся полости заложения заряда. Однако эффективный радиус полости намного больше ее реального размера, а произвол в его выборе приводил к неопределенности в оценках магнитуды события [17, 20]. Дело в том, что горные породы в ближней окрестности заряда разрушаются, возникшие трещины при сдвиге расширяются, а контур эффективного упругого воздействия увеличивается, «вытесня» избыточный объем вглубь массива. Этот объем и отвечает эффективной сейсмической энергии, которая все же составляет проценты от полной энергии взрыва. Напомним, что большая часть энергии взрыва идет на преодоление сил трения при смещении разрушенных масс в упругую внешнюю среду.

Решение проблемы механики очага землетрясения может быть достигнуто методами математической

упругопластичности [8, 10, 37], которая фактически включит в себя все развитие очага, о котором идет здесь речь. Однако эта задача крайне сложна, и чтобы предварительно разобраться в общей картине явления, а также классифицировать предвестники – физические сигналы об эволюции очага, прибегнем к традиционной схематизации и покажем, каким образом принцип «вытеснения» связывает этапы подготовки и предвестники землетрясения.

1

Рассмотрим действие активной тектоники, приводящее к квазистатическому деформированию земной коры. На рис. 1 виден соответственный рост давления в гидравлическом датчике, помещенном внутрь трещины массива. Нарушение хода постепенного сжатия с 20 мая 1974 может быть связано как с приходом тектонической волны (медленной – за счет поворота блоков или колебаний литосферы в целом на астено-сферных потоках), так и с эндогенными причинами, в частности с подготовкой горного удара (землетрясения) где-то в окрестности наблюдений.

Как видно, небольшой удар действительно был. Максимальные землетрясения имеют магнитуду M несколько больше 9, при подготовке в 30 лет (рис. 2). Даже за такие годы вязкость горных массивов не успевает проявиться. Поэтому правильно пользоваться моделью упругопластичности, в которой время входит только как скорость внешнего нагружения массивов. Надо только добавлять время на перетоки подземных вод.

Как следует из рис. 1, перед ударом в наблюдаемом массиве происходило относительное растяжение (давление в датчике явно упало). И только перед самим ударом давление превысило уровень, опреде-

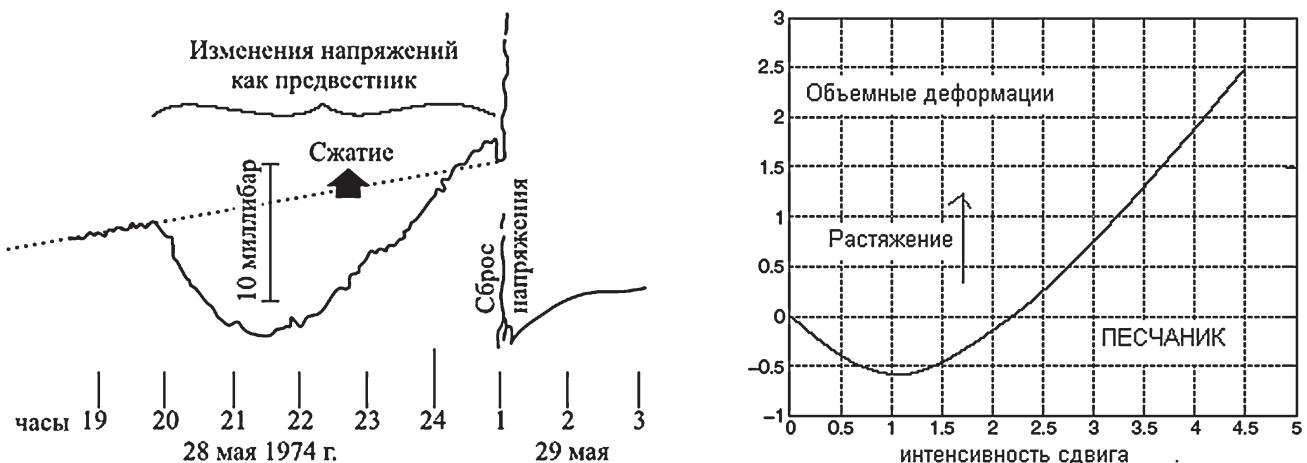


Рис. 1. Натурное наблюдение в Скалистых горах (представлено Terra Tek) и дилатансия сдвига

ляемый внешним тектоническим нагружением (так называемый переход). Заметим, кривая растяжения повторяет известную из испытаний образцов горных пород дилатационную петлю, но имеет другой знак (за исключением интервала перехода).

Самое простое объяснение – в соседних массивах происходили взаимно компенсирующие относительные сжатия и растяжения (за счет закрытия/раскрытия пор и трещин). Интенсивное сжатие может выйти за рамки упругости по Кулону, достигнув состояния компакции [10, 23]. Вне зоны компакции возникнет

компенсирующая зона иного разрушения, приводящего к дилатационному расширению объема.

Итак, в рассматриваемом массиве зоны сжатия и растяжения возникают практически одновременно. Как и при взрыве, избыточный объем зоны растяжения вытесняется (иначе говоря, контур зоны разрушения перемещается) во внешний упругий массив. Напомним, что если хотя бы одна из компонент напряжений растягивающая, предел прочности по Кулону снижается [42] и в соответствующей зоне процесс разрушения наступит раньше.

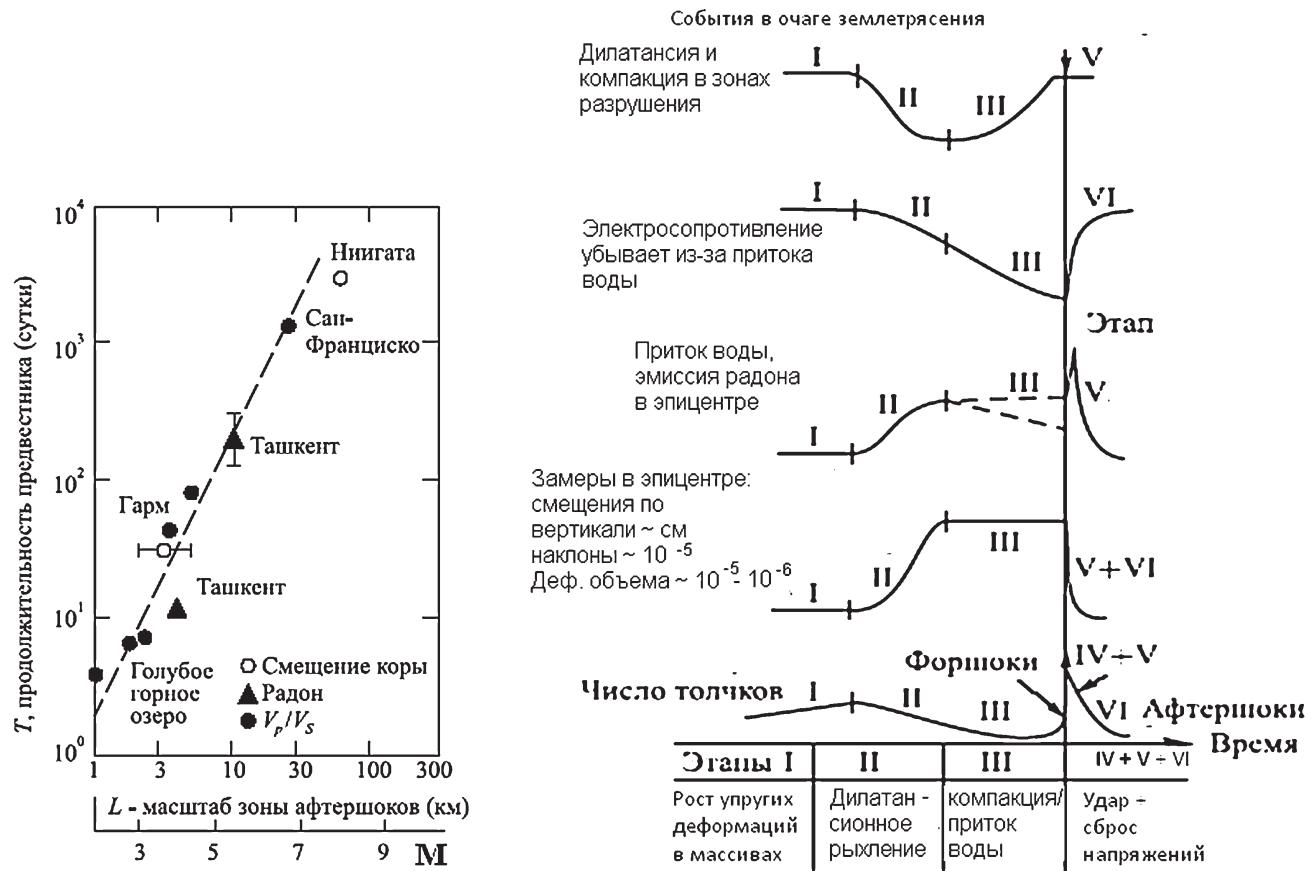


Рис. 2. Стандартная сводка предвестников землетрясений со шкалами времени и расстояний [10]

Кроме того, в ходе упругопластического деформирования происходит важнейшее явление локализации деформации в узкую полосу – поверхность скольжения. Локализация может быть ускорена поступлением воды в вакуумированное поровое пространство, снижением поверхностной энергии Гриффитса свежих трещин и их быстрым прорастанием. Именно этим завершается внутреннее развитие зон разрушения в очаге землетрясения. Эти зоны «мгновенно» лишаются своего объема, а из зон упругого сжатия происходит динамическая отдача упругой энергии (по Рейду [39]), т. е. происходит собственно удар.

2

Наиболее простой моделью очага землетрясения служит подвижка вдоль разлома в горном массиве. Заметим, что разлом имеет толщину $2h$ и отнюдь не остается тонким разрезом – в силу эффекта дилатансии он расширяется поперек относительно сдвигающихся бортов (1 и 2 вдоль оси x). А именно, смещение u вдоль оси разлома сопровождается ортогональным смещением v границ разрушения (бортов разлома) – рис. 3. Материал разрушаемых бортов превращается в заполнитель разлома.

$$\operatorname{tg} \psi \frac{\partial u}{\partial y} = \frac{\partial v}{\partial y}, \quad (2.1)$$

где ψ – угол дилатансии (обычно 15–36°). Часто используется скорость (коэффициент) дилатансии $\Lambda = \operatorname{tg} \psi$ [10]. Приращение ширины разлома пропорционально его подвижке: $\Delta v = \Lambda \Delta u$. Из рис. 4 видно, что рост угла трения α и скорости дилатансии Λ согласованы. Разрушенный материал внутри разлома перестраивается, стремясь уменьшить сопротивление сдвигу и выходит на режим скольжения.

Расширение разлома уплотняет внешний массив, создавая в нем избыточную упругую энергию, см. [10, 11], которая, в конце концов, выделится в форме сейсмических волн. Поэтому оценка вытесненного объема дает *искомую* сейсмическую энергию. Про-

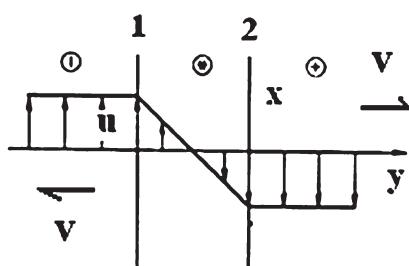


Рис. 3. Компоненты поля скоростей смещения кинематически связаны между собой

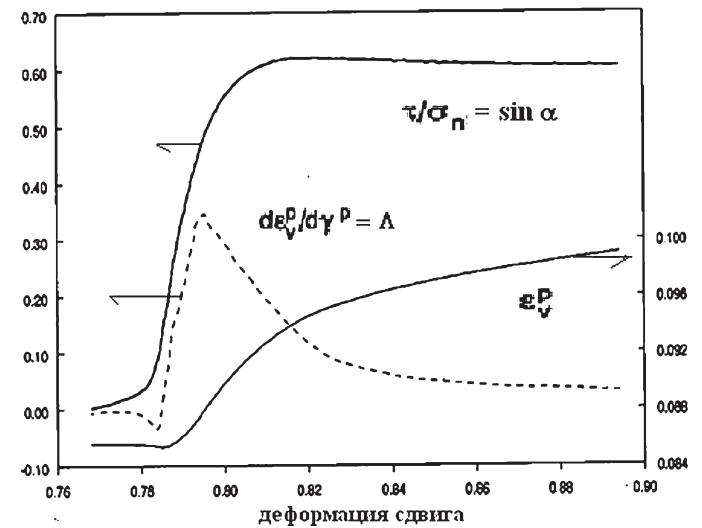


Рис. 4. Выход на скольжение при дилатационном деформировании массива

стейшая энергетическая схема процесса, как и при взрыве, сводится к равенству

$$E_t = E_{\text{failure}} + E_R. \quad (2.2)$$

Как и обычно, первый член (failure – разрушение) состоит из малых затрат $2\gamma S$ (γ – поверхностная энергия Гриффитса) на образование трещин и громадных – на преодоление сил трения и сцепления (по Кулону) при смещении пластики деформируемой горной массы. Для оценки второго слагаемого был введен [10] коэффициент η сейсмического излучения (первые проценты)

$$E_R = \eta E_t. \quad (2.3)$$

Излучение сейсмической энергии может быть вычислено по вариантам формулы Б.В. Кострова (1975). Канамори упростил формулу Кострова

$$E_R = \frac{1}{2}(\tau_1 + \tau_2)DA - A \int_D \tau dD, \quad (2.4)$$

введя начальное и конечное сдвиговые усилия τ на поверхности вытеснения (разлома). В нашем случае теперь фигурирует диада из полного вектора (скорости) смещения и нормали n_j к контуру вытеснения D , а усилия на контуре включают в себя и нормальную σ_n , и касательную $\tau = \sigma_n \sin \alpha$ компоненты. Здесь α относится уже к самой контактной поверхности между разрушенной зоной и упругим массивом. Если контакт достаточно гладок, усилие сводится к давлению, как и в случае взрыва [11].

Объем расширения разлома имеет вид

$$V = S \operatorname{tg} \Delta u. \quad (2.5)$$

Вытесненный объем оценим как $V_{\text{inj}} \phi = 2hD\phi = 2hD\epsilon_v$, где ϕ – пористость, $\epsilon_v \approx \phi$ – объемная необратимая деформация (возникшая относительная трещинная пустотность).

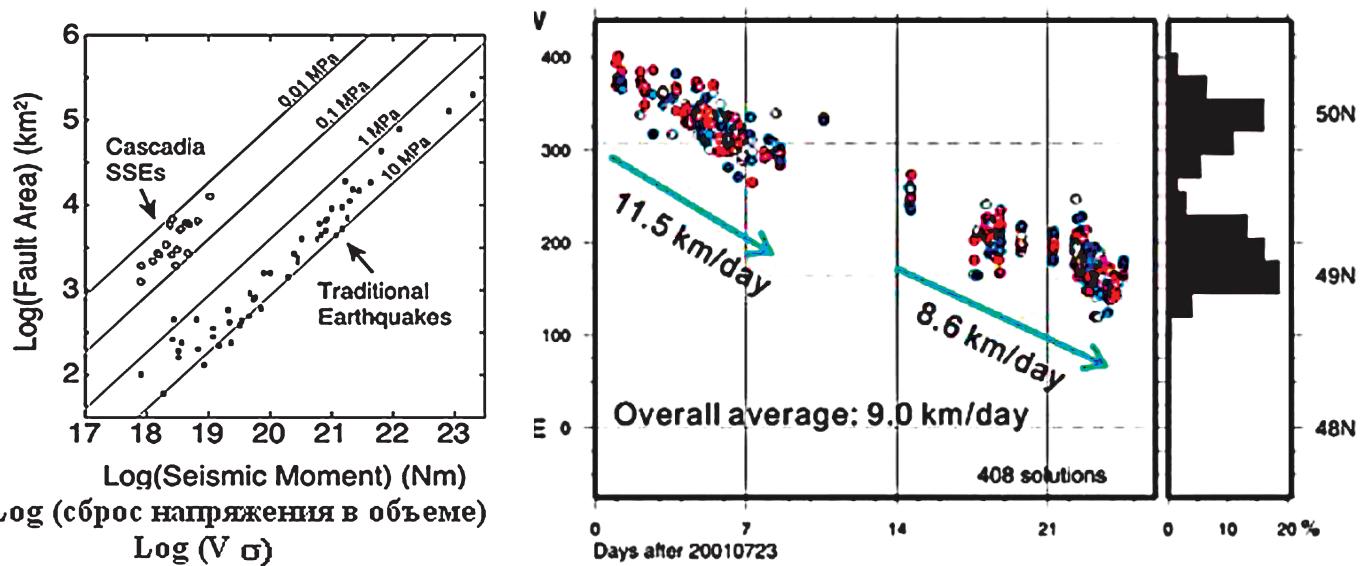


Рис. 5. Связь площади разлома и момента землетрясения. Справа – волна толчков Каскадии [31]

Излучение волн происходит из-за локализации деформирования в материнской полосе сдвига с утратой ее толщины, благодаря упругой отдаче (*rebound*) из вытесненного объема. В вытесненном объеме (который равен нарастающему – за счет возникшей пористости – объему материнской полосы) в момент землетрясения происходит сброс напряжений $\Delta\sigma$. Произведенная работа $V_{\text{inj}}\Delta\sigma$ совпадает по размерности с так называемым **моментом очага**:

$$M_0 = fV\Delta\sigma = f2hD\Delta\sigma. \quad (2.6)$$

В настоящее время в теории используется «момент очага» M_0 , определяемый как произведение силы $D\Delta\sigma$ на плечо $2h$. Конечно, в гипоцентре нет ни силы, ни плеча. Термин «момент» мотивирован только размерностью (ニュ顿 на метр). Из формулы (2.6) видно, что известная связь площади разлома D , сброса напряжения $\Delta\sigma$ и сейсмического «момента» M_0 имеет вторую трактовку (рис. 5). Сопоставление шкал подобных рисунков позволяет найти зависимость эффективного «натяжения» разлома $h\Delta\sigma$ от магнитуды.

Интерпретации момента M_0 через разгружающийся объем хотя и были известны ранее, но выбор объема не был мотивирован [13, 17].

3

Вытеснение геомасс упруго сжимает внешний массив, а на существующих разломах и границах вполне может генерировать новые зоны дилатационного разрушения. Наибольшее значение для предвестников главного удара имеет разрушение у свободной поверхности массива, т. е. в эпицентре землетрясения. Здесь сжатие сменяется растяжением, что отвечает

динамическому при взрыве (рис. 6), но в данном случае квазистатическому «отколу».

На рис. 7 приведен расчет, показавший появление пластичности в эпицентре и в квазистатическом случае. Розовым выделена внутренняя зона, ограниченная условием Кулона ($K = 0$), внутри которой раскрываются трещины и поры, т. е. проявляются дилатационные предвестники землетрясения (рис. 1, 2). Правильно было бы заменить здесь уравнения упругости на систему уравнений пластичности.

В частности, меняется отношение скоростей V_p/V_s сейсмических P - и S -волн (рис. 2). Как мы теперь знаем, возникновение пустых пор меняет тип деформирования в наблюдаемой продольной волне – вместо P -волны 1-го рода появляется более медленная P -волна деформирования матрицы (2-го рода, если пользоваться терминами Френкеля – Био). Если вода вновь заполнит поры (рис. 2), сейсмически будет опять наблюдаться волна как бы «по запечатанным порам» (волна 1-го рода)*.

В упругопластических расчетах (рис. 8–9), любезно предоставленных И.А. Гарагашом, использовалась программа FLAC. При этом эллипс моделирует гипоцентр, т. е. дилатирующий разлом (10×20 км). В эпицентральной зоне достигается предел Кулона–Мора по напряжениям**, причем раскрываются как трещины растяжения (на свободной поверхности), так и трещины сдвига.

* Кстати, внезапное уменьшение скорости P -волн отмечено [19, 41] и в водонасыщенных осадочных толщах на границах с залежами природного газа (как AVO – аномальный сброс скорости). Объясняются они (как и «изменения» коэффициента Пуассона), конечно фактической сменой P – волн при спаде насыщенности даже на 5 %.

** Были приняты следующие расчетные значения: модуль объемного сжатия $K = 2,68 \cdot 10^5$ кг/см²; модуль сдвига $G = 7 \cdot 10^4$ кг/см²; модуль Юнга $E = 1,932 \cdot 10^5$ кг/см²; коэффициент Пуассона $\nu = 0,38$; сцепление $c = 1 \cdot 10^2$ кг/см²; прочность на отрыв $\sigma_t = 50$ кг/см².

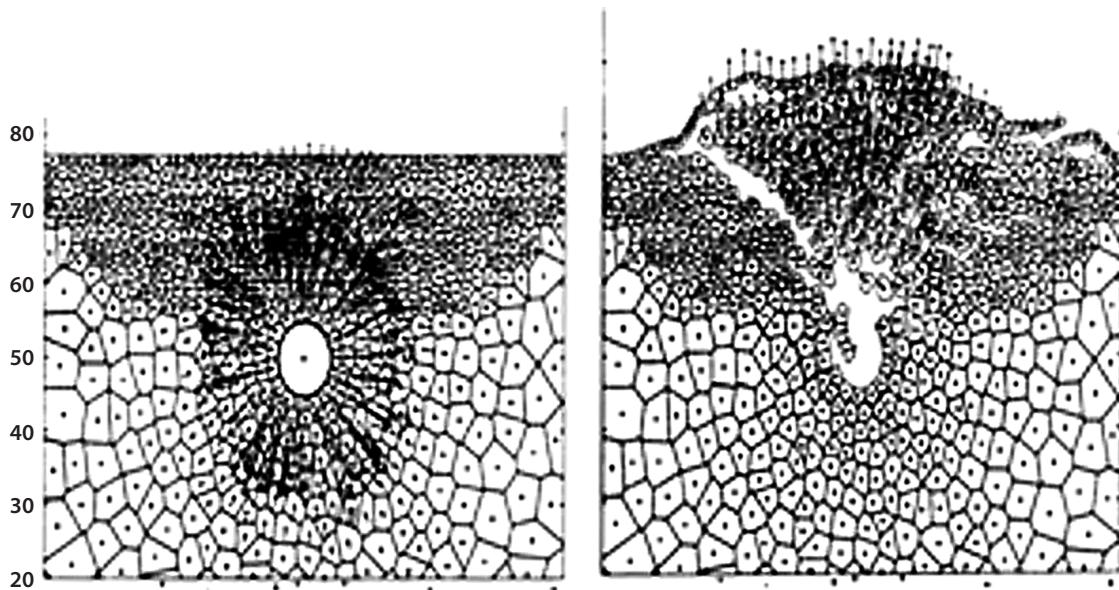


Рис. 6. Числовой расчет взрыва с отколом и образованием трещинных пустот [46]

При одинаковом коэффициенте дилатансии внутри и вне разлома по заданной ширине разлома и объемной деформации внутри него можно вычислить максимальные значения интенсивности деформации сдвига и смещения бортов разлома (рис. 9). Относительное смещение разлома обращалось в нуль на его краях.

А.А. Гусев [27] отмечал, что критерием разуплотнения пород земной коры и верхней мантии служит поведение коды S -волн. Он опубликовал рис. 10, где изображены очаг землетрясения в виде зоны А – дилатационного разуплотнения и В – сжатия. Здесь N – предельная глубина дилатансии*.

О сильном поглощении S -волн в верхней части коры и мантии при подготовке больших землетрясений Тянь-Шаня и Памира говорит и Ю.Ф. Копничев [6], отмечая одновременно слабое поглощение и высокие V_s в средней коре. Действительно, в масштабе региональной тектоники целые этажи коры могут работать как гигантские дилатирующие полосы, обеспечивая процессы *демачменента*. Здесь могут реализоваться уплотнение (компакция) или разуплотнение, приводящие к деформированию разных знаков в примыкающих зонах. Замечены как подъем ювенильных вод к границам земной коры снизу, сквозь зону

разуплотненной мантии, так и очаги землетрясений по контуру дилатационного уплотнения. Изменения снизу особо заметны при грандиозных тектонических событиях – на контактах нижней коры и более жесткой верхней мантии. По-видимому, важным фактором служат и повышенные температуры, например проявляется размягчение влажных гранитов.

Самое важное, за счет «квазистатического откола» именно в эпицентральной зоне удается наблюдать множество физических предвестников (рис. 2) подготовки основного удара. Например, за счет уменьшения расстояний объясним как сам выход, так и изменения радона-222 – радиоактивного газа (период полураспада 3,8 суток) на свободной поверхности. На этапе дилатансии его концентрация возрастает, а затем, перед самым ударом, спадает (рис. 11) из-за последовательного растрескивания и сжатия. Приток грунтовых вод нивелирует эти события (рис. 12).

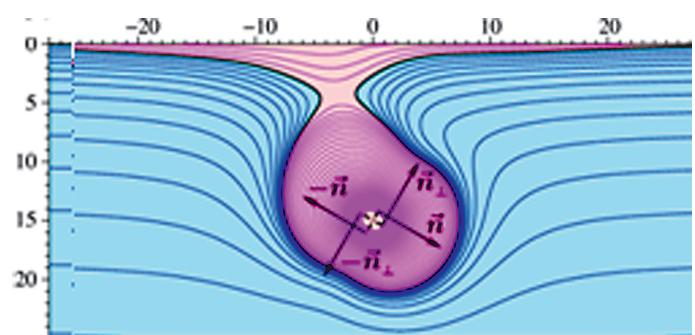


Рис. 7. $K = \text{const}$ – линии для источника типа двойного момента [А.С. Алексеев и др., 2008]

* Не исключено, что N отвечает сейсмической границе Н.И. Павленковой в верхней мантии, тогда как граница Мохоровичича – предельной глубине [9] гидравлической связности земной коры за счет ее дилатансии. Отсутствие воды в верхах мантии в геологическом масштабе времени приводит к фазовой замене пород на более жесткие мантийные. Напомним, работа [9] единственная правильно предсказала физическую природу границы Конрада (как смену трещиноватости коры), выявленную знаменитой Кольской скважиной [5].

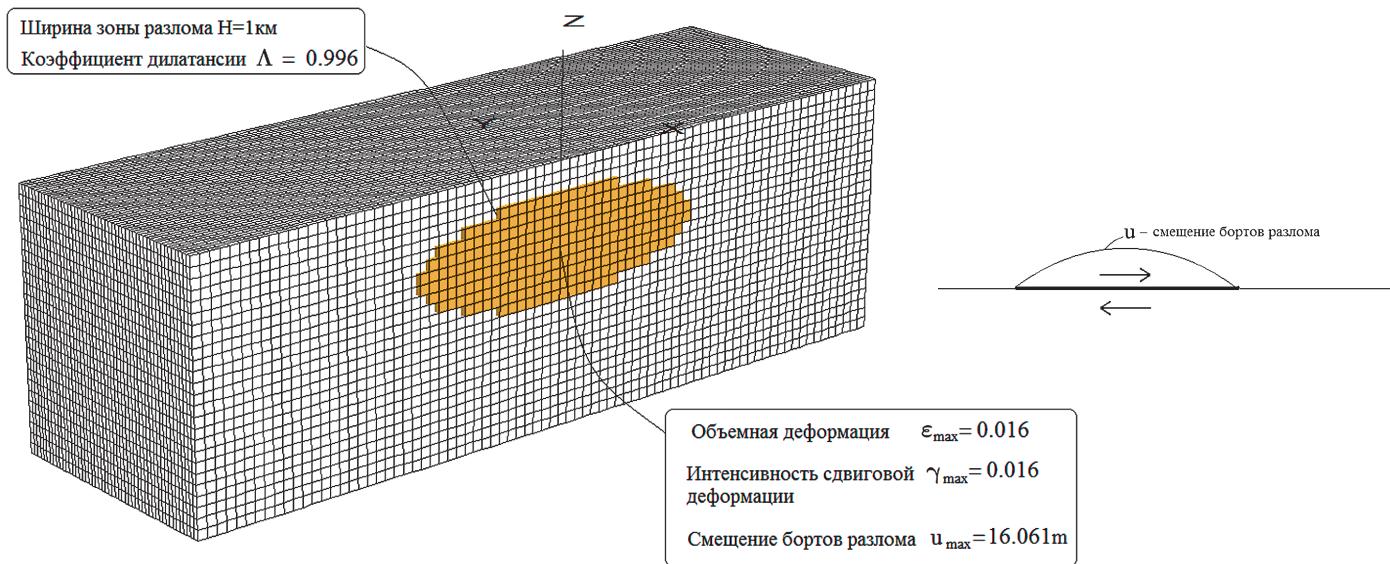


Рис. 8. Пояснения к расчету И.А. Гарагаша

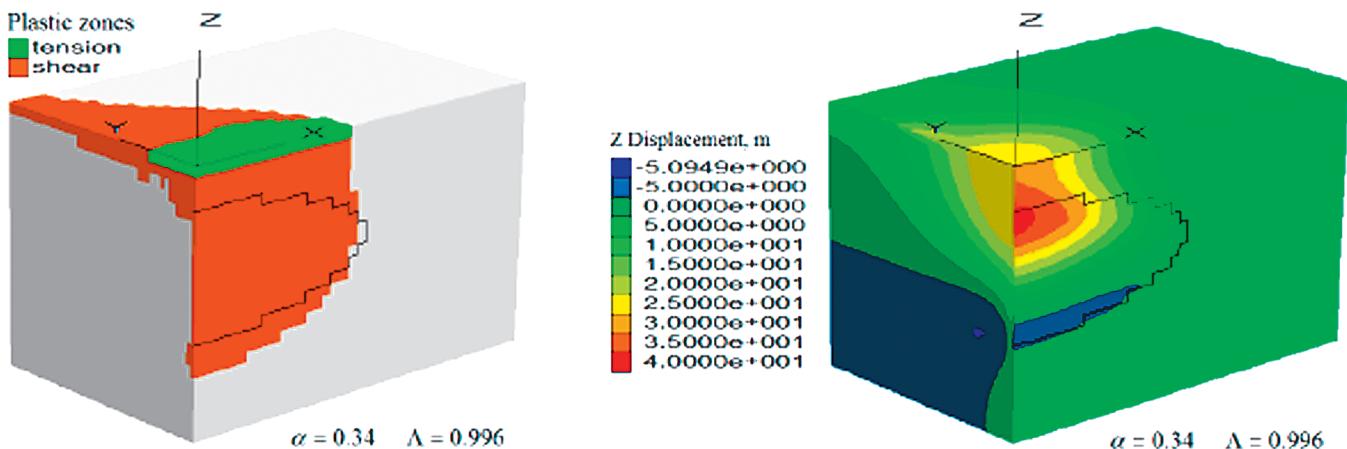


Рис. 9. Зоны вокруг очага землетрясения по И.А. Гарагашу

4

Рассмотрим, как развиваются события в окрестных массивах коры. Как уже отмечалось, вытеснение объема при подготовке основного удара возбуждает дилатационные зоны на ближних разломах, которые либо приходят в косейсмическое движение, либо подготавливают *афтершоки*.

Вытесненный объем основного землетрясения порождает разбросанные дочерние зоны уплотнения за счет общей энергии подготовки смещений на соседствующих разломах.

На рис. 13 показано, как при землетрясении в мегаструктуре разломов Сан-Андреас помимо главного удара (эпицентр дан густо черным) произошли левосторонние и правосторонние плавные подвижки (11–15 м) вдоль иных разломов. Ранее было известны зоны концентрации напряжений как у вершины генерирующего разлома [2], так и впереди него [44].

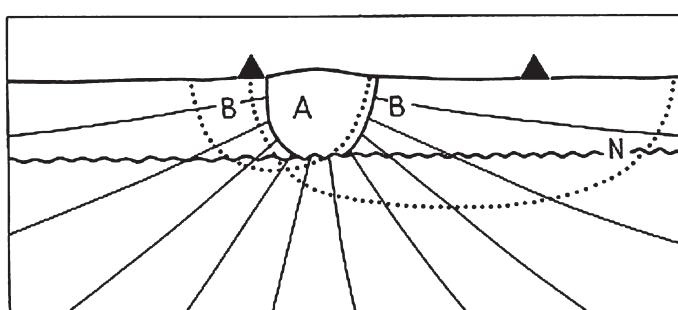


Рис. 10. Пунктиром изображены диагностирующие сейсмические лучи

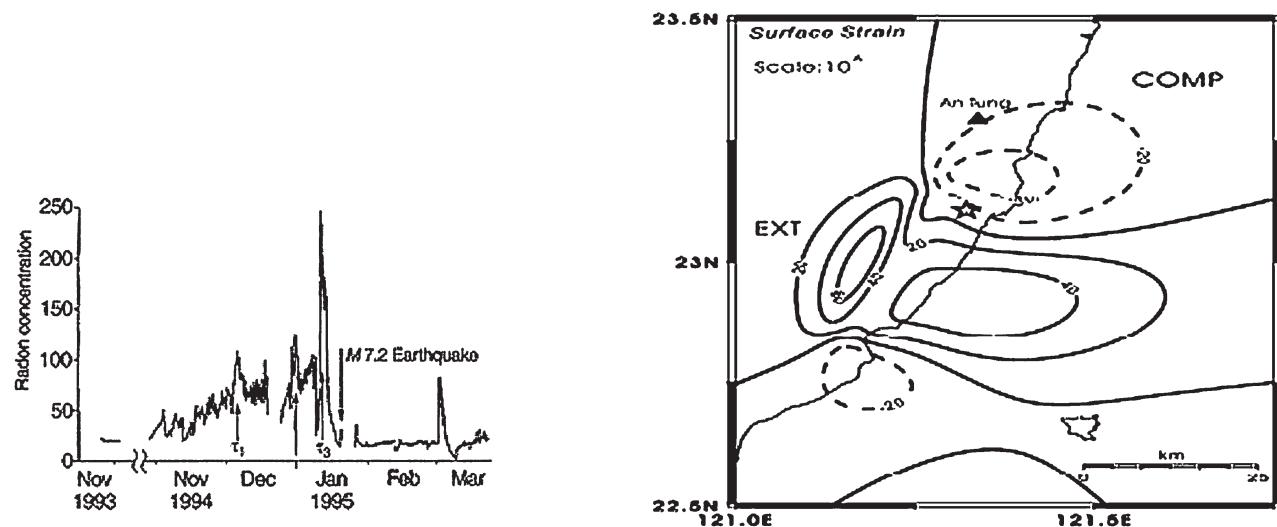


Рис. 11. Слева – радоновый предвестник удара в Кобе (Япония) [33]. Справа – скважина (треугольник) измерения радона при землетрясении 2003 г. (эпицентр на контакте зон дилатансии – Ext и Comp – компакции)

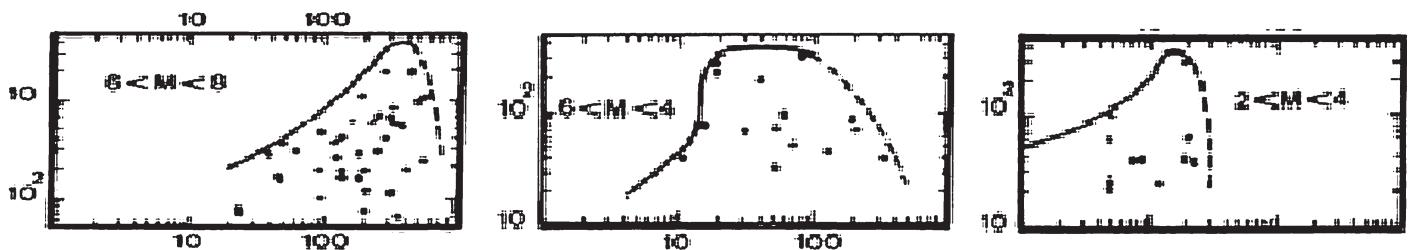


Рис. 12. Взаимодействие с бассейном грунтовых вод приводит к неоднородности относительной амплитуды выходов радона по пространству эпицентра землетрясения (шкала, км) [10]

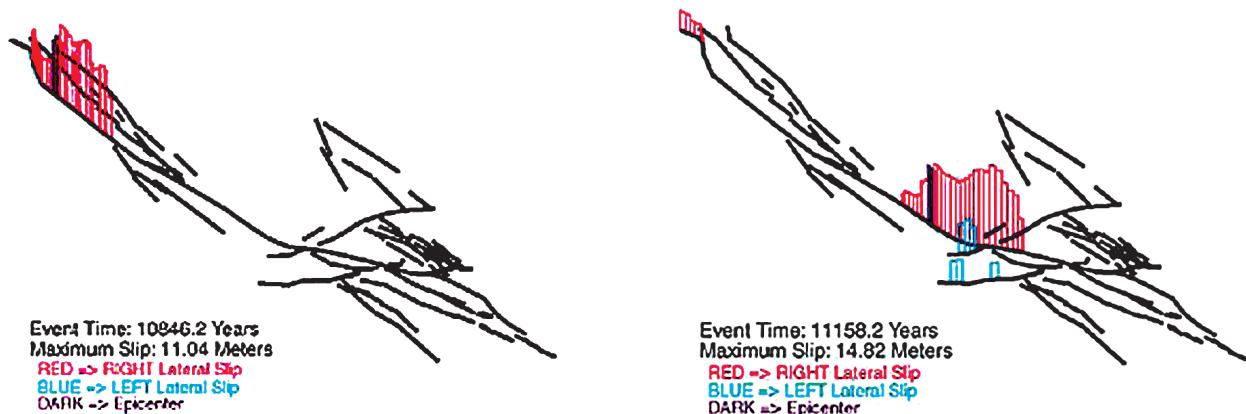


Рис. 13. Пример сильных землетрясений у северной части разлома Сан-Андреас (гипоцентры выделены черной меткой) и сопутствующих подвижек на субпараллельных ветвях разлома

Ю.П. Стефанов [15] недавно опубликовал прекрасный численный пример генерации дилатационных зон разных знаков и активных разломов, выполненный в рамках упругопластической дилатансонной теории. Его расчет подтверждает ход мысли нашего изложения.

На рис. 14 окрашены расчетные косейсмические изменения в уровнях грунтовых вод разного знака,

что было подтверждено данными [30] по скважинам (черные точки – подъем уровня, белые – убывание). Поскольку в зонах сжатия деформации разного знака, после удара разгрузка сопровождается и разными изменениями уровня грунтовой воды [35]. Заметим, что если все четыре квадранта (рис 14) разгружаются одновременно, то очаг такого рода тектоническо-

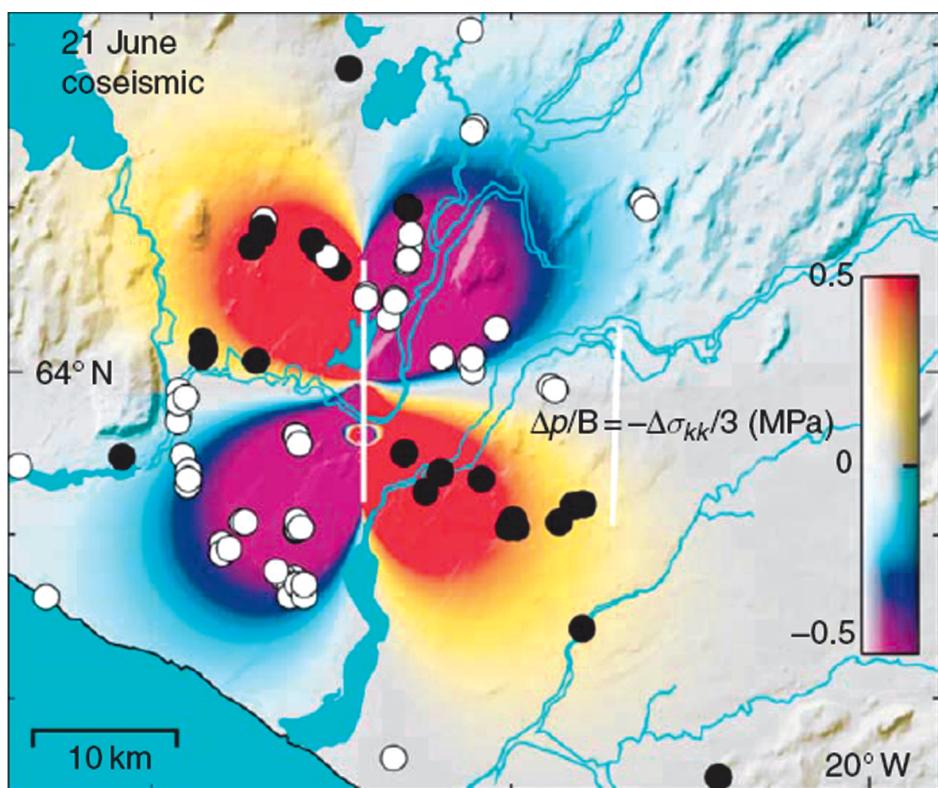


Рис. 14. Квадранты у вершины разлома (Исландия) и сбросы уровней в скважинах после удара

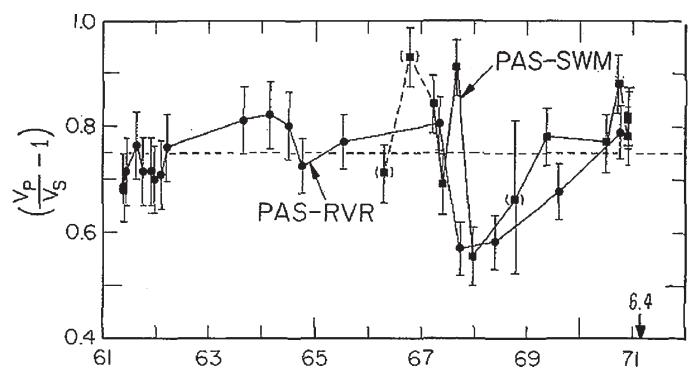
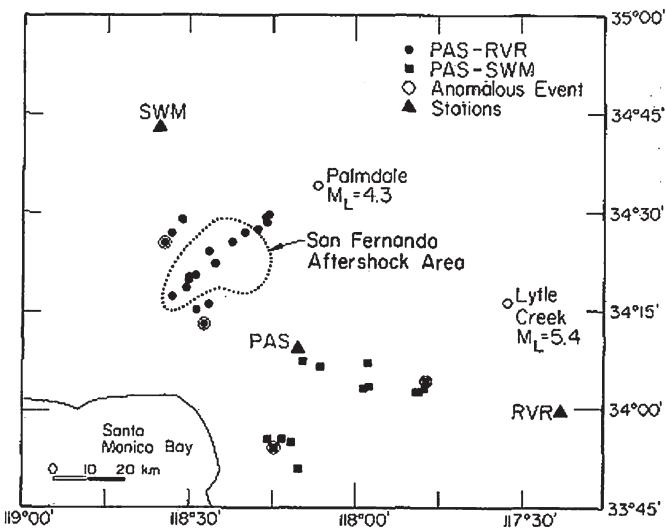


Рис. 15. Измерения скоростей звука для разных пар станций землетрясения Сан-Фернандо

го события действительно может быть представлен двойной парой сил.

Андерсен и Уиткомб [18] еще в 1975 г сопоставляли с Гармом данные землетрясения Сан-Фернандо (1971, эпицентральная зона до 80 км) и увидели, что в 1967–1968 годах изменения разных знаков V_p/V_s сменяли друг друга по пространству. Переменность знаков V_p/V_s связана с сеткой разломов, определяющей всю серию объемов взаимного вытеснения. При большом интервале измерения среднее значение V_p/V_s будет казаться неизменным, что, кстати,

привело к отказу академика М.А. Садовского от дилатационной теории очага.

Общая зона афтершоков все же меньше области подготовки основного события (рис. 15). Как передается разгрузка по цепочке вторичным зонам накопления (сохранения) упругого сжатия?

В литературе упоминается триггерная роль сейсмических волн для афтершоков, но само перераспределение тектонических напряжений, по нашим представлениям, более медленно и связано с ротационными волнами. Это обстоятельство определяет

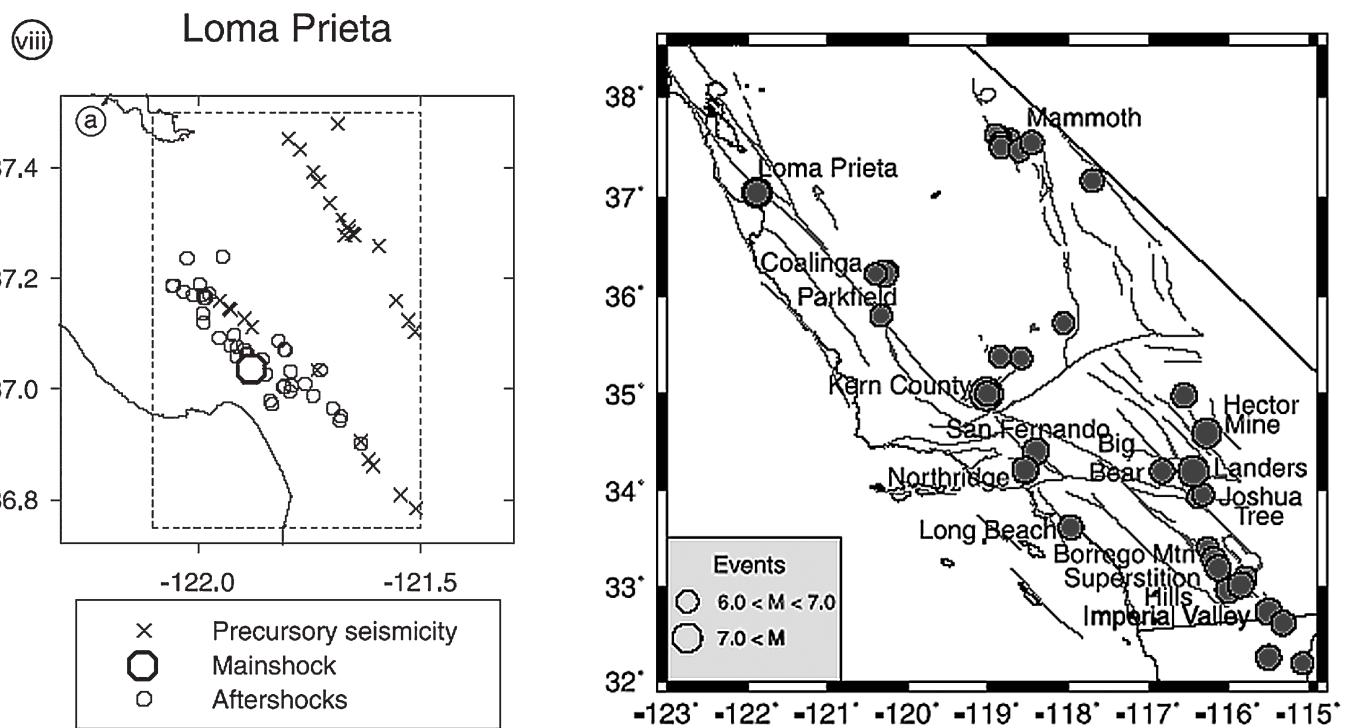


Рис. 16 . Только один из двух разломов землетрясения Лома-Приета [28, 29] проявил себя и главным ударом, и афтершоковой активностью. Справа – сильные землетрясения Южной Калифорнии

запаздывание афтершоков. Расстояния между этими зонами относительно невелики, и триггерные эффекты волн поворота блоков [3, 10] вполне комбинируются с дилатационным внутренним развитием очагов афтершоков*.

5

Что определяет сам момент землетрясения? Дело в том, что развитие дилатационных зон завершается локализацией деформирования в узкую полосу сдвига. Поиск ориентации такой полосы был реализован во множестве работ. Для нас самое главное, что эта полоса лишена объема, дилатационное множественное трещиноватость исчезает и начинается разгрузка вытесненного упругого объема – упругая отдача внешней сжатой области.

На рис. 17 изображено FC – так называемое ядро разлома (fault core), и фактическая полоса скольжения (principal slip zone) согласно [43] одному из раскопанных разломов. Подвижка в данном случае составляла 8 м. Изначальный разлом действительно

выродился в тонкую полосу скольжения, что приводит к отдаче упругой энергии.

Процесс упругой отдачи характеризуется перехлестом (рис. 1), когда наступает момент сжатия (компакции) ранее разрушенной массы внутри разлома. Согласно расчетам [23], внутри дилатационной зоны происходит образование множества полос скольжения. В условиях «поджатия», с внедрением шероховатости одного борта активного разлома в другой, относительное движение бортов (и в каждой трещине разрушенного ранее массива) происходит в режиме прерывистого скольжения. В поле напряжений это – точка касания штрих-пунктира (10 МПа) к прямой Мора–Кулона при 40 МПа (разрушению сдвигом). Именно здесь реализуется разрушение контактирующих частиц, сопровождающее АЭ (акустической эмиссией) и ЭМИ с магнитными импульсами (рис. 18). Хотя индивидуально эти ЭМИ слабы, но суммарно, при реально большом теле разлома, общий сигнал может быть значителен.

Больше всего импульсов ЭМИ и АЭ в вершинах пильы стик-слипа (ликвидации шероховатости). Этот сценарий соответствует случаю «сухого» разлома. На последнем этапе подготовки землетрясений очаг чаще всего заполняется водой [10, 38]. Вода снижает и поверхностную гриффитсовскую энергию, и трение по Кулону и, как упоминалось, приближает момент главного удара. Действительно, задержки удара в несколько дней отвечают времени на фильтрационный

* Конкретные данные о скорости распространения слабых толчков (скрипа, трепора – от 1 до 5 Гц) вдоль разлома «смыкания» океанической и континентальных плит приведены на рис. 5 для района Каскадии (Ванкувер, Канада). Так идет волна меньших тектонических событий среза шероховатости контактного разлома [31].

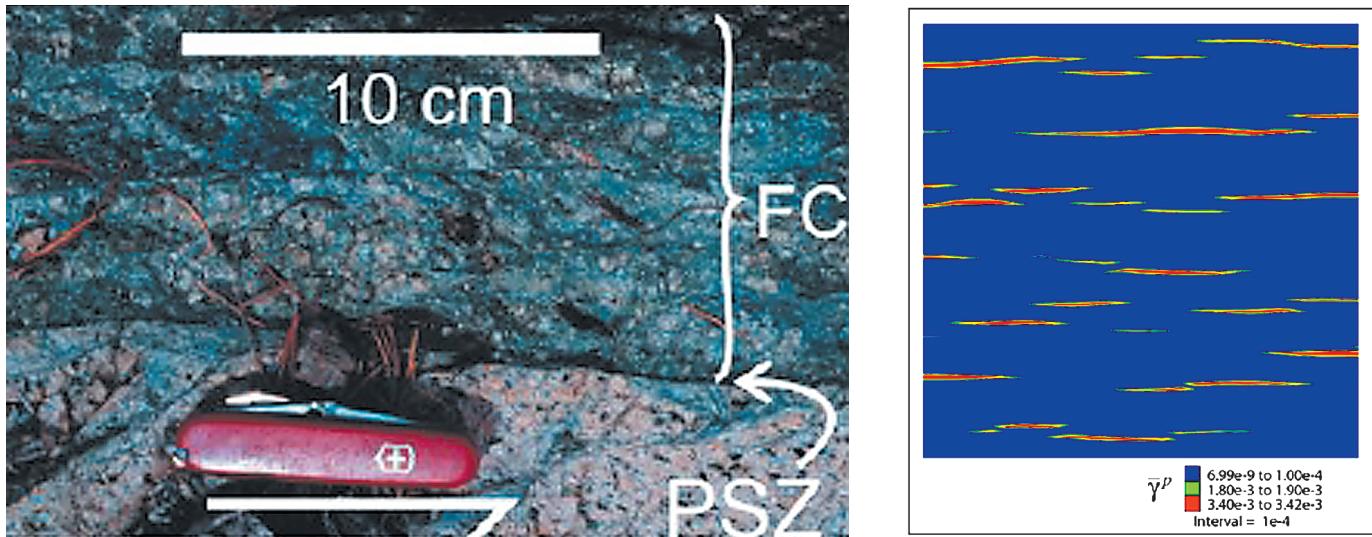


Рис. 17. Разлом в Кингз Каньоне, Сьерра-Неваде [43] и структура полос сдвига [23]

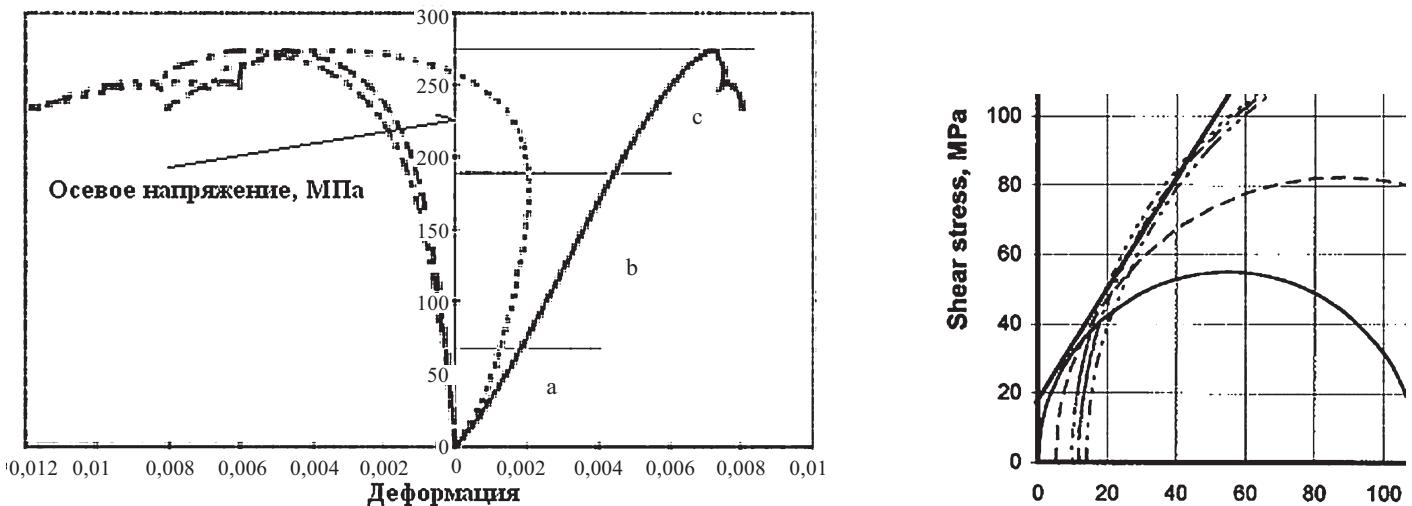


Рис. 18. В граните ЭМИ происходит на этапе закрытия пор и трещин (а, в, с) в точке касания предельной прямой и круга Мора для давления в 10 МПа

приток флюидов в вакуумированное пространство свежих трещин.

Был опубликован расчет [36] магнитного сигнала от излучателя эллиптической формы, заполненного соленой природной водой. Его авторы считали, что сам разлом может играть роль громадной подземной антенны, то тогда проблема об излучении магнитного поля ULF (ультразвуковых частот) решена за счет пульсаций теллурических токов. Автор работы [26] счел, что они недостаточны и предложил дополнительную пульсацию проводимости.

Требуемые размеры (90 км длины при осях эллипса в 18 и 4,5 км) настолько грандиозны, что казались немотивированными. Теперь видно, что именно дилатансия вдоль разлома в 100 км создает нужную антенну

в гипоцентре очага (рис. 20). Впрочем, и зона эпицентра разрушения может претендовать на эту роль.

Согласно Мерцнеру и Клемпереру [36], в законе электропроводности $\sigma = \sigma_f \phi^n$ для горного массива степенной показатель должен быть $n=1$ (как в трещинах, а не в изолированных порах, где $n=2$). При электропроводности соленой воды (brines) $\sigma_f = 75$ См/м, электропроводность массива достигнет требуемого значения $\sigma = 5$ См/м.

Итак, нужна та самая анизотропная трещиноватость в массиве, которая характерна для локализации в условиях сжатия [23] дилатансионно возникшей геоструктуры. Динамика событий внутри этой зоны сложна и в их комбинации может обеспечить наблюдаемые амплитуды магнитного сигнала.

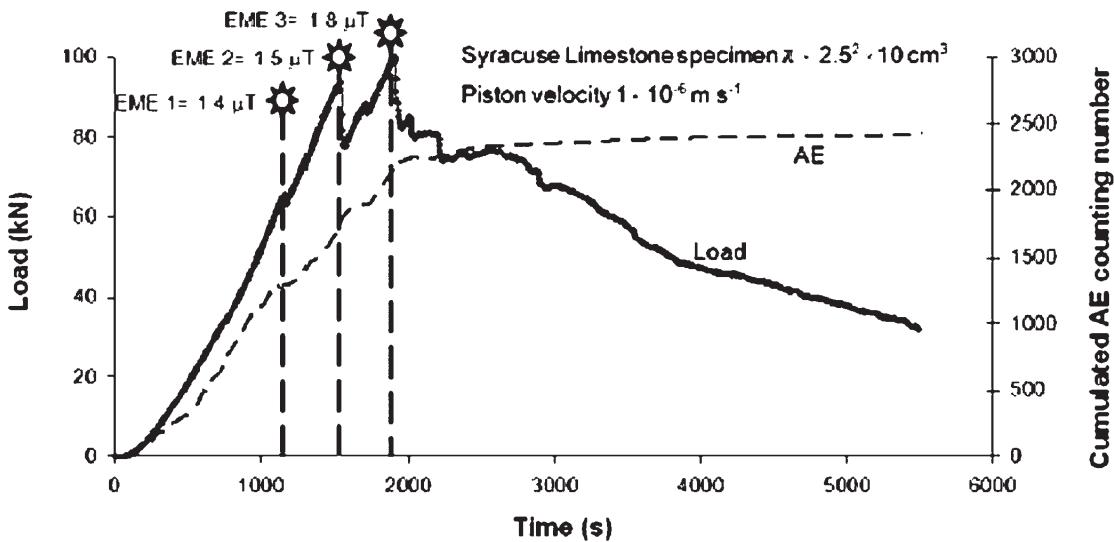


Рис. 19. Разрушение известняка (из Сиракуз [22]) в режиме прерывистого скольжения с сигналом ЭМИ и с возбуждением магнитного поля в 1,4–18 μT (прерывистая линия – акустическая эмиссия)

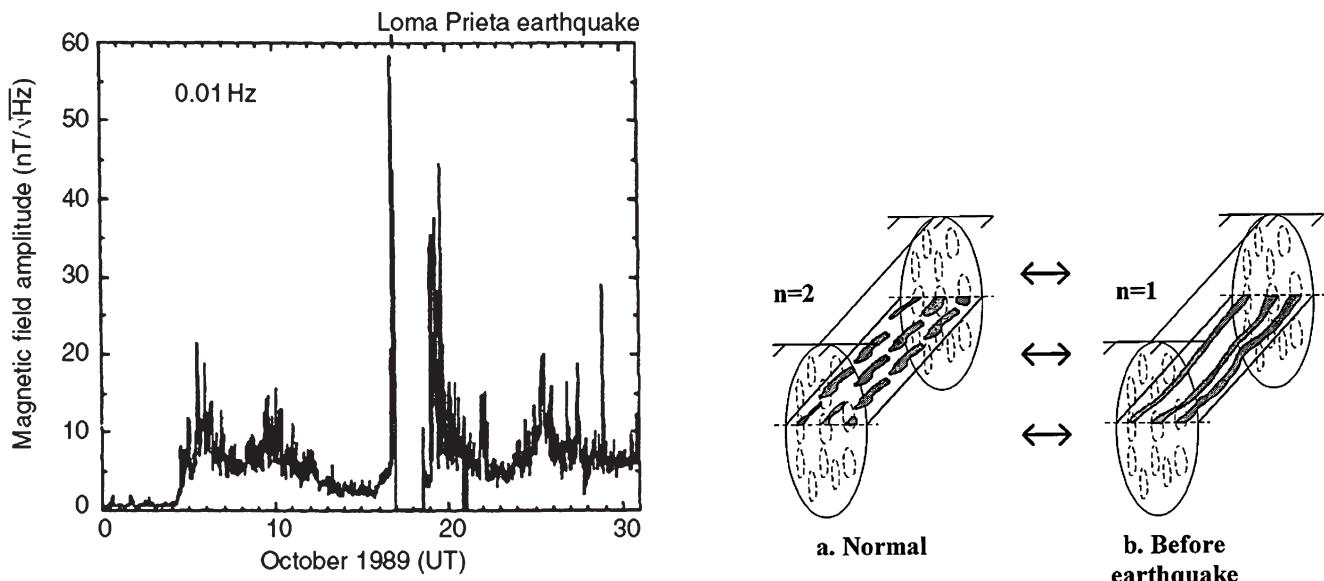


Рис. 20. Магнитный сигнал в Ломо-Приета и схематичное представление излучающего разлома

6

Обратимся к краткосрочным магнитным предвестникам, опубликованным А.Л. Собисевичем [12]. Он сопоставлял сигналы, излучаемые за несколько часов до главного удара и измеряемые в планетарном масштабе Земли за счет взаимодействия с ионосферой [13]. Первое – это землетрясение 12.09.2007 в районе Южной Суматры (рис. 21). За 3 часа до удара наблюдались магнитные возмущения ультразвуковых частот (УНЧ – ULF) с «волновыми формами приближаются к квазигармоническим структурам».

Второе – событие в Турции 03.08.2010, магнитный сигнал которого был зафиксирован по крайней мере в трех пунктах наблюдений, включая и лабораторию

в авроральной зоне (Архангельская область, Карпогоры). И хотя зафиксированная магнитуда составила всего 5,6, магнитное УНЧ возмущение начало проявляться в записанных волновых формах вариаций магнитного поля Земли за два с половиной часа до первого удара (рис. 22).

В этой связи сопоставим данные о прерывистом скольжении (стик-слипе) в условиях водонасыщения контактной зоны разреза в образце горной породы и в отсутствии воды (рис. 23). Непосредственно видно, что, в соответствии с мнением Л.Е. Собисевича, расхождения типа магнитных сигналов вполне объясняется заводнением эпицентрализного выхода разлома при морских землетрясениях, в том числе цунамигенных.

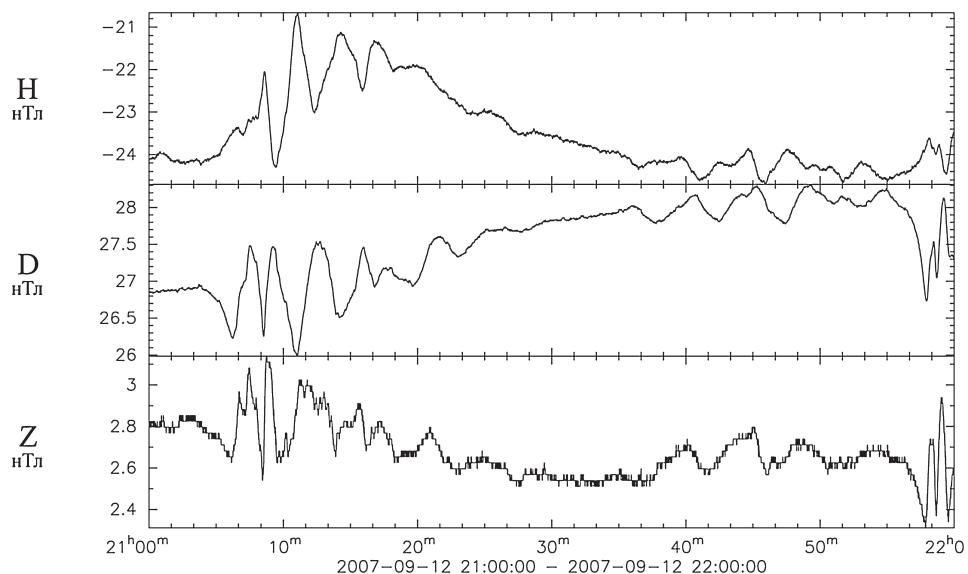


Рис. 21. Магнитный сигнал Южной Суматры – с 21:30, за три часа до удара

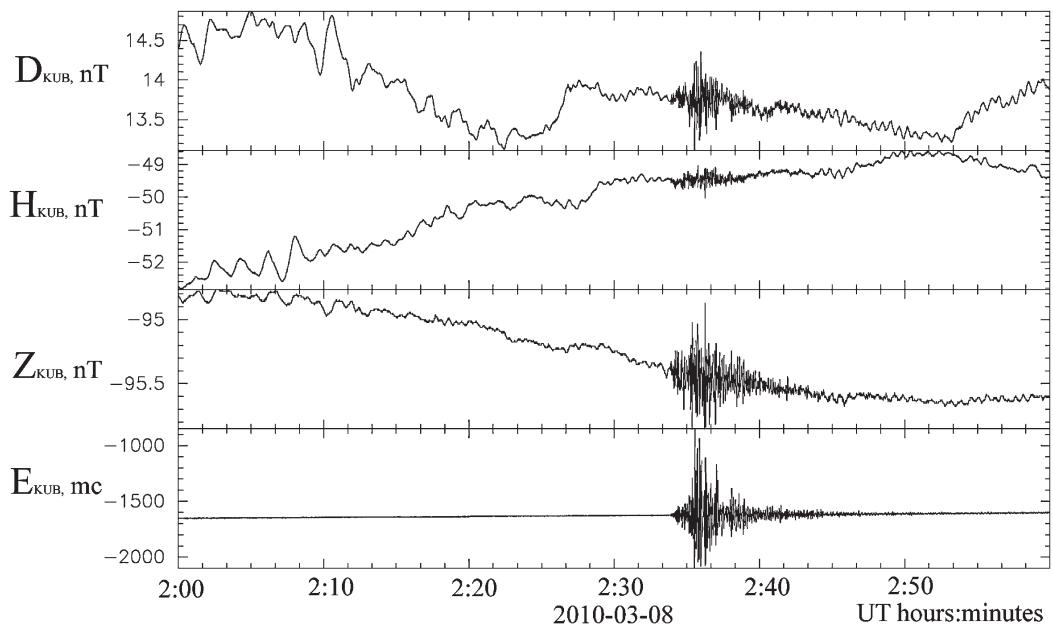


Рис. 22. Магнитный сигнал сейсмического события в Турции более изрезан, чем на рис. 21

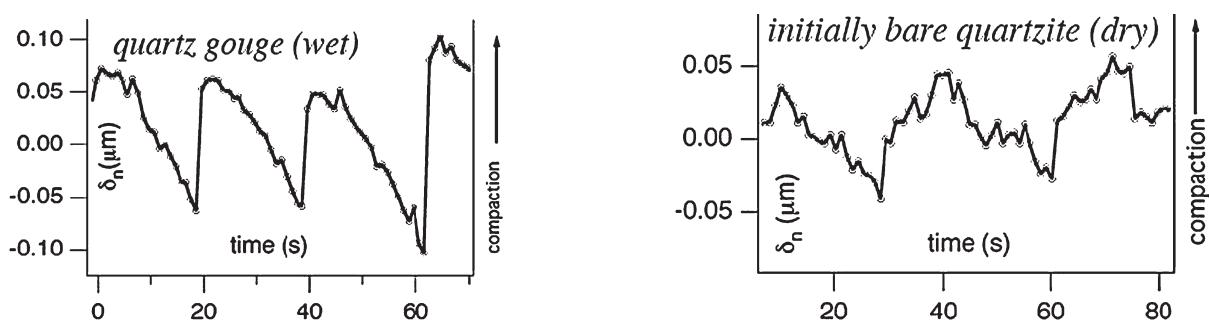


Рис. 23. Присутствие воды внутри тела разлома снимает высокочастотные подвижки (иллюстрации из доклада Н. Билера и Д. Локнера в Портленде, октябрь 2010)

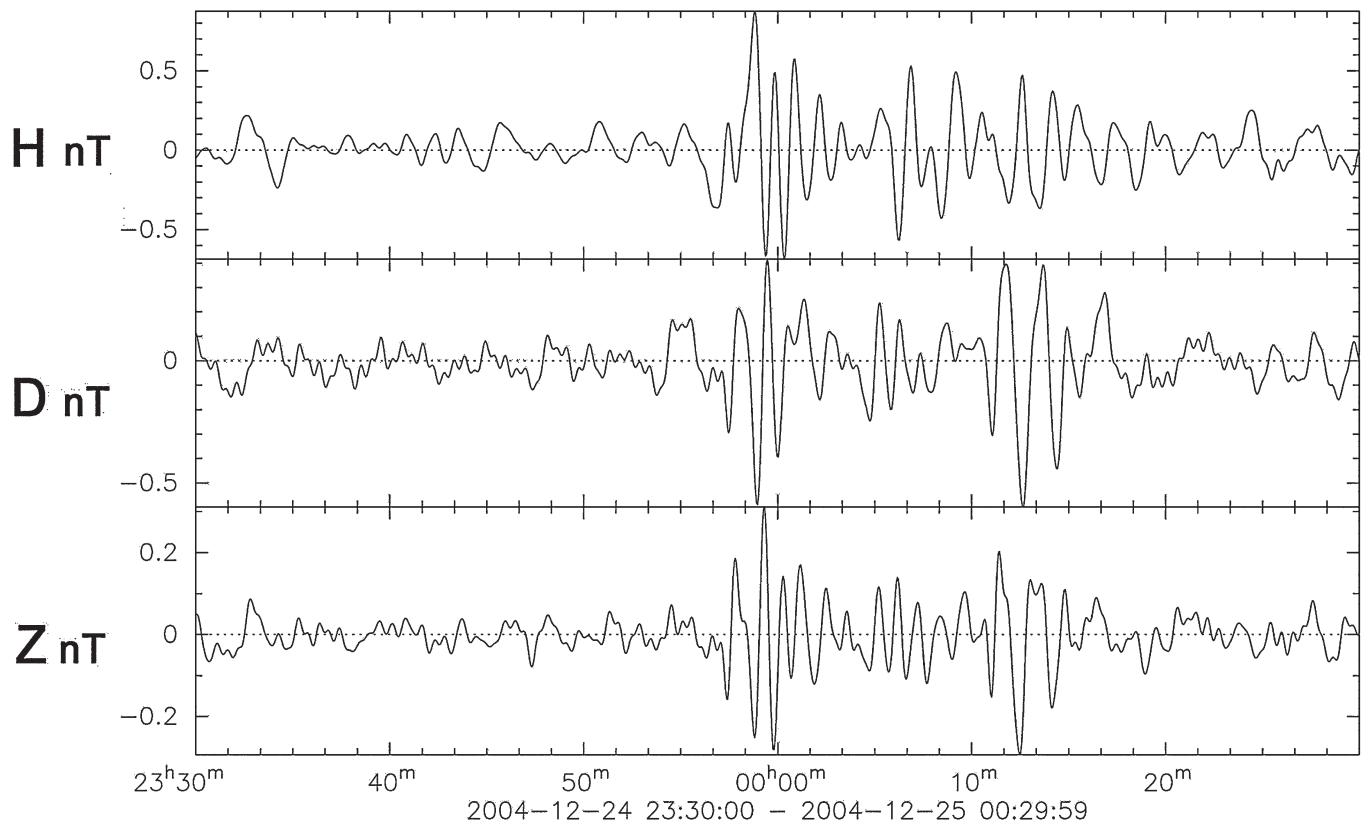


Рис. 24. Тонкая структура геомагнитного возмущения за сутки до Суматро-Адаманского цунамигенного землетрясения

7

Наконец, рассмотрим сейсмические волны в горном массиве и сопутствующие им сигналы.

На рис. 25 приведены записи измерений на расстояниях до 50 км от ударов тяжелого вибратора по свободной поверхности [34]. Форшок магнитного поля отвечал электромагнитной волне и излучался самой ударной установкой. Электрические сигналы,

кинетически связанные [28] с перетоками воды, при вибрациях наблюдались на расстояниях порядка 1 км.

Были отмечены два сейсмосигнала, распространявшиеся до 50 км. Первый имел скорость 4–6 км/с, второй – 330 м/с. Скорее всего, это две P -волны Френкеля – Био. Вторая волна реализуется в форме поверхностной волны Рэлея, а также при наличии в массивах значительного количества газа (от 100 до 5 %). Она отличается большими деформациями,

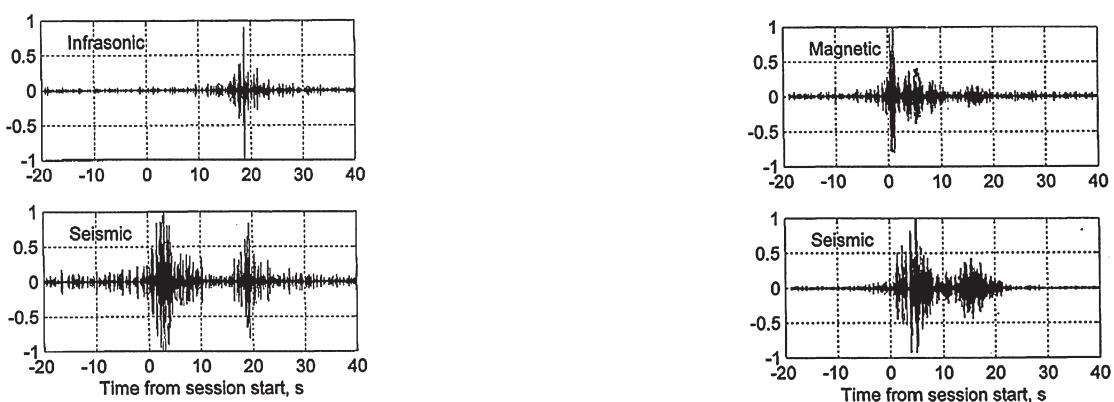


Рис. 25. При работе поверхного вибратора [34] вторая сейсмическая волна сопровождается акустическим и магнитным сигналами. Первая волна – только магнитным сигналом

которые вполне могут быть связаны и с поворотами зерен. Им сопутствуют как акустическая эмиссия, так и магнитные пульсации.

Заметим, что при масштабе эпицентра в 100 км и волновой скорости в 330 м/с продолжительность магнитных излучений будет 300 с = 5 мин, что уже сопоставимо с данными рис. 22–24.

Способ порождения ЭМИ определяется системой уравнений, предложенной в статье [3]. Пусть в упругой волне, бегущей вдоль оси $x_1 = x$ со скоростью V , присутствуют смещения u , кинематически независимые повороты ϕ :

$$u_i = \delta_{i3}\alpha(x - Vt), \quad \phi_i = \delta_{i2}\beta(x - Vt), \quad (7.1)$$

а также порождаемые ими электрическое E и магнитное H поля (ниже c – скорость света в вакууме, σ – электрическая проводимость, ξ_j – параметры микроструктуры):

$$E_i = \delta_{i3}e(x - Vt), \quad H_i = \delta_{i2}h(x - Vt). \quad (7.2)$$

Тогда функции, их определяющие, связаны между собой таким образом:

$$\begin{aligned} e &= -\xi_4 c^{-1} V(\beta + 2^{-1} \alpha_x) \\ h &= -4\pi\sigma\xi_4 c^{-1} V \left(\int_{-\infty}^x \beta(y) dy + 2^{-1} \alpha \right) + c^{-1} V \xi_2 \beta_x. \end{aligned} \quad (7.3)$$

В электрическое поле входит производная (градиент) смещения, т. е. оно улавливает фронт упругой волны в виде набегающего (внезапного) разрыва. Наоборот, в магнитное поле входит (помимо смещения) кумулятивный сигнал (интеграл) от поворота *всех* частиц, охваченных профилем бегущей волны.

Представляется, что срезание шероховатостей (ratcheting [24]), излучающее ЭМИ и АЕ приводит к снижению сухого трения. С другой стороны, имеется серия работ Дитриха, который специально изучал скоростное снижение сил трения [25]. Дело сводилось к уменьшению трения по Кулону с ростом относительной скорости v .

Разделим скорость смещения частиц на среднюю и флуктуационную части:

$$v = v_* + v'. \quad (7.4)$$

Тогда формула Дитриха (слева) изменяется:

$$\begin{aligned} \tau &= \tau_0 + a \ln \left(\frac{v}{v_*} \right) \sigma = \tau_0 + a \ln \left(1 + \frac{v'}{v_*} \right) \sigma \approx \\ &\approx \tau_0 + a \left(\frac{v'}{v_*} - \left(\frac{v'}{v_*} \right)^2 + \left(\frac{v'}{v_*} \right)^3 - \dots \right) \sigma. \end{aligned} \quad (7.5)$$

Здесь коэффициент a должен быть пропорционален числу грубых дефектов в единице объема, будем считать пористости ϕ . Примем $a = a_0 \phi^m \sigma^n$, σ – давление. Представим флуктуацию скорости, как обычно в кон-

тинальной теории, через градиент средней скорости (звездочка опущена; λ – толщина слоя трения):

$$v' = \lambda \left| \frac{\partial v}{\partial x} \right| \operatorname{sgn} v. \quad (7.6)$$

Тем самым получаем степенной ряд для градиента скорости смещений в волне. В первом приближении справедливо расщепление сопротивления на статическое сцепление и трение с коэффициентом, пропорциональным градиенту скорости смещения:

$$\tau = \tau_0(A) + a_0 \phi^m \sigma^{n+1} \lambda \left| \frac{\partial v}{\partial x} \right| \operatorname{sgn} v. \quad (7.7)$$

Отсюда приходим к волновому уравнению (для S-волны) такого типа:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \tilde{N} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{a_0}{\rho} \frac{\partial}{\partial x} \left(\phi^m \sigma^{n+1} \lambda \left| \frac{\partial^2 u}{\partial x \partial t} \right| \operatorname{sgn} \frac{\partial u}{\partial t} \right). \quad (7.8)$$

В литературе известны волновые уравнения, включающие модули одних переменных, умноженные на знаки других [10]. Они отвечают эффектам сухого трения. В.Е. Назаров и др. [7] пришли к таким формам путем подгонки решения к экспериментально измеренному профилю волны, бегущей по сырому песку.

Тем самым, введение эффектов сухого трения кажется оправданным и отвечает особым видам диссипации. Можно думать, что срезание шероховатости (при перехлесте контактов в режиме прерывистого скольжения) реализуется в сейсмических волнах значительных деформаций матрицы (т. е. в волнах второго типа), о чем говорит и акустическая эмиссия (АЭ), и ЭМИ с магнитными импульсами (рис. 25). Их уравнения, естественно, должны быть изменены за счет добавления диссипации в самой [10, 28] и за счет сопутствующих перетоков природных флюидов (как слабых электролитов). Действительно, дилатационные приращение объемов в разломе снижает поровое давление вплоть до вакуума, как это видно на примере датчика на рис. 1. В этой связи интересны измерения, проведенные в зоне Мацуширо (Япония), которые и привели к начальной дилатационнодиффузной (DD) модели очага землетрясения [38]. На сегодня оценены [40] глубинная проницаемость (0,01–0,1 дарси) и скорость заполнения очага водой (4–10 дней), а также вовлеченность газов [21] в миграцию вод. Сжатие газов внутри пор обеспечивает [4] существование P -волн второго типа. Поступление вод в систему свежераскрытых трещин облегчает их дальнейшее спонтанное расширение согласно эффекту Ребиндера [16], а полученная оценка времени объясняет временной разрыв (в несколько дней) между срочными предвестниками и собственно ударом.

ЛИТЕРАТУРА

1. Адушкин В.В., Спивак А.А. Подземные взрывы. М.: Наука, 2007.
2. Гарагаш И.А., Хайдаров М.С. Модель развития сейсмического процесса в зоне тектонического разлома перед сильным землетрясением // Сейсмологические исследования. М. 1989. № 11.
3. Динариев О.Ю., Николаевский В.Н. Электромагнитный отклик фрагментированных горных пород на сейсмическое воздействие // Изв. РАН. Физика Земли. 1998. № 6.
4. Дунин С.З., Михайлов Д.Н., Николаевский В.Н. Продольные волны в частично насыщенных пористых средах: влияние газовых пузырьков // ПММ. 2005. № 5.
5. Кольская сверхглубокая. Исследование глубинного строения континентальной коры с помощью бурения Кольской сверхглубокой скважины. М.: Недра, 1984. 490 с.
6. Конничев Ю.Ф., Соколова И.Н. Пространственно-временные вариации макросейсмических эффектов сильных землетрясений в районах Тянь-Шаня и Памира // Вестник НЯЦ РК. Вып. 3. 2004. С. 104–110.
7. Назаров В.Е., Колпаков А.Б., Радостин А.В. Самовоздействие низкочастотной акустической волны и генерация второй гармоники в сухом и водонасыщенном речном песке // Акуст. ж. 2010. Т. 56, № 1.
8. Николаевский В.Н. О связи объемных и сдвиговых деформаций и об ударных волнах в мягких грунтах. // Докл. РАН СССР. 1967. Т. 117, № 3. С. 542–545.
9. Николаевский В.Н. Граница Мохоровичча как предельная глубина хрупко-дилатационного состояния горных пород. // Докл. АН СССР. 1979. Т. 249, № 4. С. 817–821.
10. Николаевский В.Н. Геомеханика и флюидодинамика. М.: Недра, 1996, 448 с.
11. Родионов В.Н., Адушкин В.В., Костюченко В.Н., Николаевский В.Н., Ромашов А.С., Цветков В.М. Механический эффект подземного взрыва. М.: Недра, 1971.
12. Собисевич А.Л. Избранные задачи математической геофизики и вулканологии. М.: ИФЗ РАН, 2010.
13. Гохберг М.Б., Шалимов С.Л. Воздействие землетрясений и взрывов на ионосферу. М.: Наука, 2008. 296 с.
14. Соболев Г.А., Пономарев А.В. Физика землетрясений и предвестники. М.: Наука, 2003.
15. Стефанов Ю.П. Численное исследование формирования разрывов в геоматериалах. Режимы развития деформаций. // Триггерные эффекты в геосистемах. М.: Геос, 2010. С. 238–246.
16. Траскин В.Ю., Скворцова З.Н. Эффект Ребиндера в геодинамических процессах // Флюиды и геодинамика. М.: Наука, 2006. С. 147–164.
17. Aki K., Tsai Y.-B. Mechanism of Love wave excitation by explosive sources. // JGR. 1972. V. 77. P. 1452–1475.
18. Anderson D.L., Whitcomb J.H. Time-dependent seismology // JGR. 1975. V. 80, N 11. P. 1497–1503.
19. Azcarate M.J. F., Martinez L.A., Gomez R. J., Detection and appraisal of gas deposits using seismic registers. Madrid, 2008. 136 p.
20. Brune J.N. Tectonic stress and spectra of seismic waves from earthquakes // JGR. 1970. V. 75, N 26. P. 4997–5009.
21. Cappa F., Rutqvist J., Yamamoto K. Modeling crustal deformation and rupture processes related to upwelling of deep CO₂-rich fluids during the 1965–1967 Matsushiro earthquake swarm in Japan // J. Geophys. Res. 2009. V. 114, B10304.
22. Carpinteri A. et al. Energy emission from fracture phenomena: mechanical, electromagnetic, nuclear. Convegno Nazionale IGF XXX, Torino 24–26 giugno, 2009.
23. Chemenda A.I. Origin of compaction bands: Anti-cracking or constitutive instability? // Tectonophysics. 2011. V. 499. P. 156–164.
24. Dereniy I., Tegzes P., Vicsek T. Collective transport in locally asymmetric periodic structures // Chaos. 1998. V. 8, N 3.
25. Dietrich J.H., Modeling of rock friction. I. Experimental results and constitutive equations // JGR. 1979. V. 84. P. 2161–2168.
26. Egbert G.D. On the Generation of ULF Magnetic Variations by Conductivity Fluctuations in a Fault Zone // Pure Appl. Geophys. 2002. V. 159. P. 1205–1227.
27. Gusev A.A. Two dilatancy-based models to explain coda-wave precursors and P/S spectral ratio // Tectonophysics. 1988. V. 152. P. 227–237/
28. Fenoglio, M.A., Johnston, M.J. S., Byerlee, J.D. Magnetic and Electric Fields Associated with Changes in Pore Pressure in Fault Zones: Application to the Loma Prieta ULF Emissions // JGR. 1995. V 100. P. 12951–12958.
29. Fraser-Smith A.C. Ultra-Low-Frequency Magnetic Fields Preceding Large Earthquakes // EOS. 2008. V. 89, N 23. P. 211.
30. Jonsson S., Segall P., Pedersen R., Bjornsson G. Post-earthquake ground movements correlated to pore-pressure transients // Nature. 2003. V. 424:1. P. 79–183.
31. Kao et al. Northern Cascadia ETS: 1997–2007 // JGR. 2009. V. 114, B00A12.
32. Kawada Y. et al. Atmospheric radon concentration and crustal strain // Ground Water. 2006. V. 44, N. 5. P. 642–647.
33. Kuo T.M.C., Fan K., Kuoche H., Chen W. A Mechanism for Anomalous Decline in Radon Precursory to an Earthquake // Geoph. Res. Letters. 1990. N 9. P. 1465–1468.
34. Kuznetsov V. V., Plotkin V. V., Khomutov S. Y. Acoustic, electromagnetic and ionospheric disturbances during the vibroseisraic sounding // Geoph. Res. Lett. 1999. V. 26, N. 13. P. 2017–2020.
35. Manga M., Wang C.-Y. Earthquake hydrology. Treatise on geophysics. Chapter 4.10. Elsevier, 2007. P. 293–320.
36. Merzer M., Klemperer S.L. Modeling Low-frequency Magnetic-field Precursors to the Loma Prieta Earthquake with a Precursory Increase in Fault-zone Conductivity // Pure Appl. Geophys. 1997. V. 150. P. 217–248.
37. Nikolaevskiy V.N., Kapustyanik S.M., Thiercelin M., Zhilenkov A.G. Explosion dynamics in saturated rocks and soils // Transport in Porous Media. 2006. V. 65. P. 485–504.

38. *Nur A.* Matsushiro, Japan, earthquake swarm: Confirmation of the dilatancy – fluid diffusion model // *Geology*. 1974. V. 2. P. 217–221.
39. *Ohnaka M.* A physical basis for earthquakes based on the elastic rebound model // *Bull. Seismol. Soc. Amer.* 1976. V. 66, N 2. P. 433–451.
40. *Otake M.* Seismic activity induced by water injection at Matsushiro, Japan. // *J. Phys. Earth*, 1974. V. 22. P. 163–176.
41. *Russell B. H., Hedlin K., Hilterman F.J., Lines L.R.* Fluid – property discrimination with AVO: A Biot – Gassmann perspectives // *CREWES Research Report*. 2001. V. 13. P. 403–419.
42. *Schock R.N.* Strain behavior of a granite and a graywacke sandstone in tension // *JGR*. 1982. V. 87₄, № B9. P. 7817–7823.
43. *Shipton Z.K., Evans J.P., Abercrombie R.E., Brodsky E.E.* The missing sinks: slip localization in faults, damage zones and the seismic energy budget // *Abercrombie R., ed. Earthquake: radiated energy and physics of faulting*. Washington, AGU, 2006. P. 217–222.
44. *Templeton E.L., Rice J.R.* Off-fault plasticity and earthquake rupture dynamics // *JGR*. V. 113, B09306; B09307.
45. *Toksoz M.N., Thomson K.C., Ahrens T.J.* Generation of seismic waves by explosions in prestressed media // *BSSA*. 1971. V. 61, N 6. P. 1589–1623.
46. *Walton O.R., Maddix D. M., Butkovich T. R., Heuze F. E.* Redirection of dynamic compressive waves in materials with nearly orthogonal and random joint sets // *Lawrence Livermore national Laboratory Livermore, California, AMD. ASME*. 1991. V. 117. P. 65–73.

СОДЕРЖАНИЕ

<i>Ю.Г. Гатинский, Д.В. Рундквист, Г.Л. Владова, Т.В. Прохорова</i> СЕЙСМО-ГЕОДИНАМИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ ГЛАВНЕЙШИХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ РОССИИ И БЛИЖНЕГО ЗАРУБЕЖЬЯ	13
<i>В.И. Осипов, Н.И. Фролова, С.П. Сущев, В.И. Ларионов</i> ОЦЕНКА СЕЙСМИЧЕСКОГО И ПРИРОДНОГО РИСКА ДЛЯ НАСЕЛЕНИЯ И ТЕРРИТОРИЙ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ	28
<i>В.И. Величкин, Б.П. Власов, М.В. Шумилин</i> ОСНОВНЫЕ ПРОМЫШЛЕННО-ГЕНЕТИЧЕСКИЕ ТИПЫ УРАНОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ БЫВШЕГО СССР И РОССИИ	49
<i>С.А. Дмитриев, В.И. Величкин, Б.И. Омельяненко</i> ОБЕСПЕЧЕНИЕ БЕЗОПАСНОЙ ИЗОЛЯЦИИ ЖИДКИХ ОТХОДОВ НИЗКОГО И СРЕДНЕГО УРОВНЕЙ РАДИОАКТИВНОСТИ	64
<i>В.И. Величкин, В.И. Мальковский, Н.Н. Тарасов, Ю.П. Диков</i> АНАЛИЗ УСЛОВИЙ МИГРАЦИИ РАДИОНУКЛИДОВ В ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ СРЕДЕ В РАЙОНЕ ОЗЕРА КАРАЧАЙ (ЧЕЛЯБИНСКАЯ ОБЛАСТЬ)	77
<i>Б.И. Омельяненко, В.И. Величкин, С.В. Юдинцев</i> ПОВЕДЕНИЕ АКТИНИДОВ В УСЛОВИЯХ ДОЛГОСРОЧНОГО ХРАНЕНИЯ И ЗАХОРОНЕНИЯ ОТРАБОТАННОГО ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА	86
<i>С.В. Юдинцев, Б.И. Омельяненко</i> ГЕОХИМИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ИЗОЛЯЦИИ ТЕХНЕЦИЯ	99
<i>И.Н. Соловов, А.К. Лисицын</i> ПОЛИЭЛЕМЕНТНЫЕ ЭКЗОГЕННЫЕ ЭПИГЕНЕТИЧЕСКИЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ УРАНА: ГЕНЕТИЧЕСКИЕ ТИПЫ И МЕТАЛЛЫ, ИЗВЛЕКАЕМЫЕ СЕРНОКИСЛОТНЫМ ПОДЗЕМНЫМ ВЫЩЕЛАЧИВАНИЕМ	109
<i>В.А. Петров, В.В. Полуэктов, Р.М. Насимов, А.А. Бурмистров, С.И. Щукин, Й. Хаммер</i> ИЗУЧЕНИЕ ПРИРОДНЫХ И ТЕХНОГЕННЫХ ПРОЦЕССОВ НА УРАНОВОМ МЕСТОРОЖДЕНИИ В ГРАНИТАХ ДЛЯ ОБОСНОВАНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ДЛИТЕЛЬНОЙ ИЗОЛЯЦИИ ОЯТ	124
<i>В.М. Котляков, Л.Н. Васильев, М.Ю. Москалевский</i> БАЛАНС МАССЫ АНТАРКТИЧЕСКОГО ЛЕДНИКОВОГО ПОКРОВА	139

<i>Ю.Я. Мачерет, А.Ф. Глазовский, И.И. Лаврентьев</i> ВОДА В ПОЛИТЕРМИЧЕСКИХ И ТЕПЛЫХ ЛЕДНИКАХ	152
<i>В.Н. Михаленко, С.С. Кутузов, О.В. Нагорнов, С.А. Тюфлин, И.И. Лаврентьев, С.А. Марченко, В.И. Окопный</i> СТРАТИГРАФИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ И ТЕМПЕРАТУРНЫЙ РЕЖИМ ФИРНОВО-ЛЕДЯНОЙ ТОЛЩИ НА ЗАПАДНОМ ПЛАТО ЭЛЬБРУСА	180
<i>Ю.П. Масуренков, А.Л. Собисевич</i> ЭЛЬБРУССКОЕ ОЛЕДЕНЕНИЕ – ИНДИКАТОР ГЕОТЕРМИЧЕСКОГО И ФЛЮИДНОГО СОСТОЯНИЯ ВУЛКАНА	189
<i>А.Н. Хименков, Г.З. Перльштейн, Д.О. Сергеев, А.Н. Власов, В.П. Мерзляков, Ю.В. Халилова</i> ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ОЦЕНКИ РИСКА ОПАСНЫХ ПРОЦЕССОВ В КРИОЛИТОЗОНЕ	205
<i>Е.В. Коротеева, Е.И. Вейсберг, Н.Б. Куюнцева, С.А. Лесина</i> ВЛИЯНИЕ КЛИМАТИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА ДИНАМИКУ РАСТИТЕЛЬНОГО ПОКРОВА ВОСТОЧНЫХ ПРЕДГОРИЙ ЮЖНОГО УРАЛА	213
<i>А.Ю. Кудеярова</i> ТРАНСФОРМАЦИЯ ПРИРОДНЫХ СОРБЦИОННЫХ БАРЬЕРОВ ПРИ ЗАФОСФАЧИВАНИИ КИСЛЫХ ПОЧВ	223
<i>И.В. Галицкая, И.А. Позднякова, Л.С. Томс</i> МЕТОДОЛОГИЯ И МЕТОДИКА ПРОГНОЗА И УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОПРИРОДНЫМ ГЕОХИМИЧЕСКИМ РИСКОМ НА УРБАНИЗИРОВАННЫХ ТЕРРИТОРИЯХ	239
<i>Л.С. Кучмент, А.Н. Гельфан</i> СОВМЕСТНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВЕРОЯТНОСТНЫХ И ДЕТЕРМИНИСТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ОЦЕНКИ МАШТАБОВ И РИСКА КАТАСТРОФИЧЕСКИХ НАВОДНЕНИЙ НА ОСНОВЕ ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ФОРМИРОВАНИЯ СТОКА	252
<i>В.В. Адушкин, П.П. Фирстов</i> ОСОБЕННОСТИ ЭКСПЛОЗИВНЫХ ПРОЦЕССОВ ВУЛКАНИЧЕСКИХ ИЗВЕРЖЕНИЙ И ИХ ПРОЯВЛЕНИЕ В ВОЛНОВЫХ ВОЗМУЩЕНИЯХ В АТМОСФЕРЕ	264
<i>А.Ю. Озеров</i> МЕХАНИЗМ ПЕРИОДИЧЕСКОГО ФОНТАНИРОВАНИЯ БАЗАЛЬТОВЫХ ВУЛКАНОВ (ПО ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМ ИССЛЕДОВАНИЯМ И ПРИРОДНЫМ НАБЛЮДЕНИЯМ)	279
<i>О.В. Руденко, А.Л. Собисевич, Л.Е. Собисевич</i> О ФИЗИКЕ АКУСТИЧЕСКИХ НЕЛИНЕЙНОСТЕЙ И МЕДЛЕННЫХ ВОЛНАХ В ГРАНУЛИРОВАННОЙ ФЛЮИДОНАСЫЩЕННОЙ СРЕДЕ	299
<i>В.Н. Николаевский</i> ОЧАГ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ – СОБЫТИЯ И ПРЕДВЕСТИКИ УДАРА	316
<i>Б.В. Левин, Г.В. Шевченко, В.М. Кайстренко, Т.Н. Ивельская, Т.К. Пинегина, Н.Г. Разжигаева</i> ПРОБЛЕМА ЦУНАМИ: СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ (ДАЛЬНЕВОСТОЧНЫЙ АСПЕКТ)	332
<i>В.А. Семенов, И.И. Мохов, М. Латиф</i> МОДЕЛИРОВАНИЕ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ В РЕГИОНАХ СЕВЕРНОЙ ЕВРАЗИИ ЗА ПОСЛЕДНИЕ ДЕСЯТИЛЕТИЯ	355

<i>Ю.Н. Авсюк, А.Л. Собисевич</i> ПРИЛИВНАЯ ЭВОЛЮЦИЯ СИСТЕМЫ ЗЕМЛЯ – ЛУНА – СОЛНЦЕ И ГЕОДИНАМИЧЕСКАЯ АКТИВНОСТЬ ЗЕМЛИ	373
<i>В.Ч. Хон, И.И. Мохов</i> ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ ГИДРОЛОГИЧЕСКОГО ЦИКЛА К ИЗМЕНЕНИЮ ОРБИТАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ И КОНЦЕНТРАЦИИ АНТРОПОГЕННЫХ ПАРНИКОВЫХ ГАЗОВ	392
<i>В.М. Григорьев, Л.В. Ермакова, А.В. Мордвинов, Ю.А. Наговицын, А.Г. Тлатов, В.Г. Иванов, Е.В. Милецкий, Е.Ю. Наговицына, А.И. Хлыстова, С.А. Язев</i> ВОЗНИКНОВЕНИЕ АКТИВНЫХ ОБЛАСТЕЙ НА СОЛНЦЕ, ИЗМЕНЕНИЯ ЕГО ГЛОБАЛЬНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ В 11-ЛЕТНЕМ ЦИКЛЕ И НА ДЛИТЕЛЬНОЙ ШКАЛЕ ВРЕМЕНИ	399
<i>С.И. Сороко, В.П. Рожков, Е.Г. Сергеева, С.С. Бекшаев, С.С.Андреева, И.В.Николаев</i> ОСОБЕННОСТИ МОРФОФУНКЦИОНАЛЬНОГО РАЗВИТИЯ ЦЕНТРАЛЬНОЙ НЕРВНОЙ СИСТЕМЫ И ГЕМОДИНАМИКИ МОЗГА У ДЕТЕЙ И ПОДРОСТКОВ В УСЛОВИЯХ ЕВРОПЕЙСКОГО И ДАЛЬНЕВОСТОЧНОГО СЕВЕРА	413

Научное издание

ЭКСТРЕМАЛЬНЫЕ ПРИРОДНЫЕ ЯВЛЕНИЯ И КАТАСТРОФЫ

В 2 томах

Том 2

ГЕОЛОГИЯ УРАНА, ГЕОЭКОЛОГИЯ, ГЛЯЦИОЛОГИЯ

*Печатается по решению Научного совета Программы
фундаментальных исследований президиума РАН № 4*

Ответственный составитель д.ф.-м.н. Собисевич Алексей Леонидович

Технический редактор В.И. Горбенко
Компьютерная верстка К.А. Мордвинцев
Корректор С.Б. Суслова

Подписано в печать 05.09.11. Формат 60×90/8
Гарнитура Таймс. Бумага мелованная. Печать офсетная
Усл. печ. л. 54. Тираж 200 экз.

ИФЗ им. О.Ю. Шмидта РАН
123995 ГСП-5, Д-242, Москва, ул. Б. Грузинская, 10

Отпечатано в типографии издательства «ПРОБЕЛ 2000»
109544 Москва, ул. Рабочая, 91