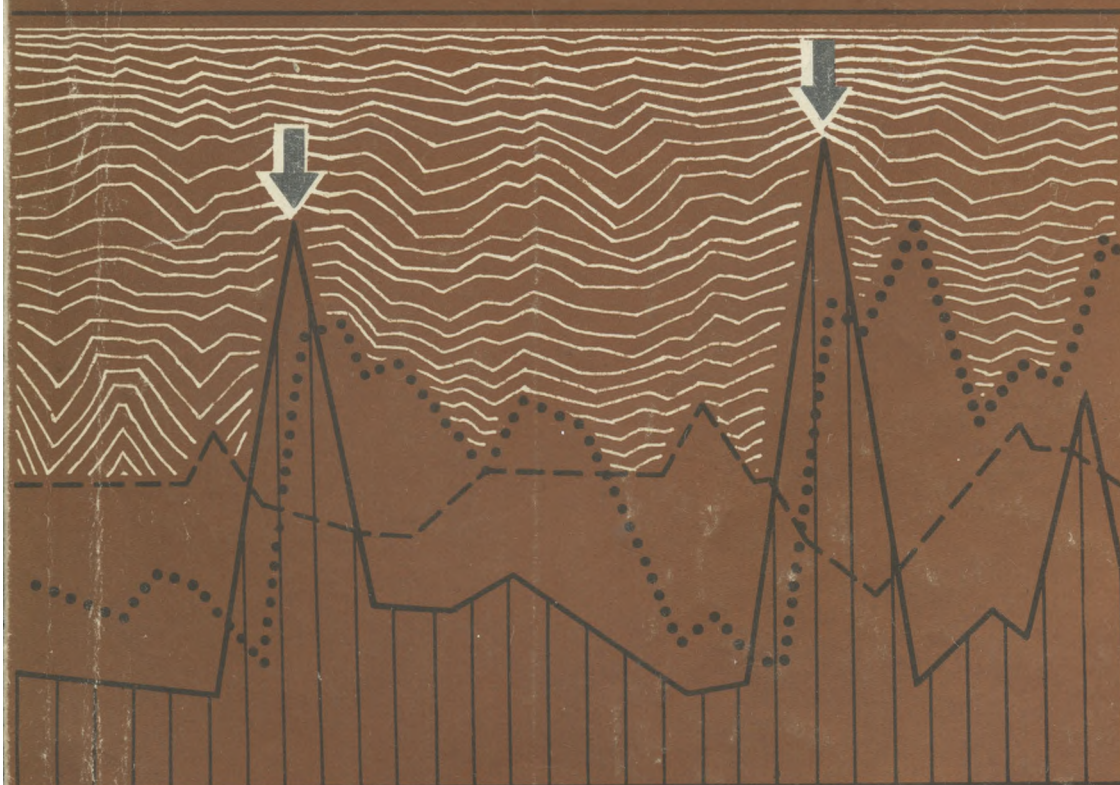


42
188
124519

3

ИССЛЕДОВАНИЯ
ПО
ПОИСКАМ
ПРЕДВЕСТНИКОВ
ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ
В
СИБИРИ



С. И. Шерман, С. А. Борняков, В. Ю. Буддо,
В. А. Трусков, А. А. Бабичев

КОМПЛЕКСНОЕ ИЗУЧЕНИЕ ДИНАМИКИ РАЗВИТИЯ КРУПНЫХ РАЗЛОМОВ НА УПРУГОВЯЗКИХ МОДЕЛЯХ

ВВЕДЕНИЕ

Физической основой теории очага землетрясения является представление о процессе землетрясения как о разрушении некоторого объема напряженного материала Земли, которое происходит чаще всего в зонах активных разломов. Это мнение общепринято, хотя имеются отличные друг от друга точки зрения на детали процесса.

Изменения сейсмической активности знаменуют собой определенные этапы в длительном процессе формирования генеральных разломов коры и литосферы. Таким образом, знание закономерностей развития крупных разломов литосферы должно быть очень полезным для разработки критериев прогноза сейсмичности.

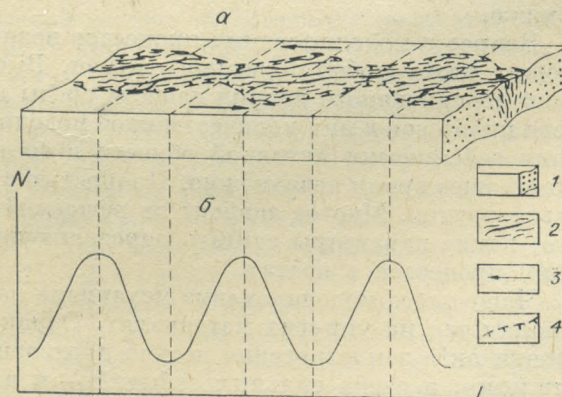
Очаг землетрясения представляет собой деструктивную зону, ее вмещающая среда — горные породы. Наиболее вероятно возникновение очагов в областях динамического влияния разломов в местах повышенной концентрации в них напряжений. Ширина этих областей зависит от морфогенетического типа разломов (рис. 1; см. табл.).

Сейсмичность крупных разломов коры и литосферы, формирующихся сотни тысяч и миллионы лет в огромных объемах горных пород, складывается из сильных и множества слабых землетрясений, соотношение между которыми описывается графиком повторяемости. В области динамического влияния крупных разломов могут возникать локализованные участки с повышенной сейсмической активностью, эти участки будут взаимодействовать между собой, изменять свое положение в пространстве по мере проработки зоны разлома. С учетом этих особенностей в приложении к длительным промежуткам времени области подготовки землетрясений будут иметь очень большие масштабы и сильно меняться со временем.

Таким образом, областью подготовки землетрясения можно считать объем горных пород, включающий взаимодействующую систему разрывных и пликтивных структур, в которой в результате воздействия тектонических сил происходит концентрация напряжений и создается ситуация, благоприятная для мгновенной разрядки накопленной упругой энергии при образовании нового разрывного нарушения, подвижке по уже существующему разрыву и т. п. Поскольку сейсмичность контролируется

Рис. 1. Деструктивные зоны в областях динамического влияния разломов, по [4] с изменениями (а — принципиальное строение и расположение деструктивных зон в области динамического влияния разлома, б — изменение плотности трещин N по простиранию разлома L).

1 — разрушаемый слой; 2 — трещиноватость; 3 — направление движения; 4 — границы области активного динамического влияния.



зонами разломов, совершенно естественно, что области подготовки землетрясений определенным образом соотносятся с областями динамического влияния разломов. В зависимости от масштаба изучаемой сейсмичности в пространстве и времени в качестве области подготовки землетрясений может рассматриваться либо часть территории (области), либо вся область динамического влияния крупного разлома.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ СЕЙСМИЧНОСТИ НА УПРУГОВЯЗКИХ МАТЕРИАЛАХ

Прямыми методами получить данные о сейсмичности, сопровождающей формирование крупных разломов, практически очень трудно в связи с чрезвычайной длительностью этого процесса (тысячи, сотни тысяч или миллионы лет).

Лабораторные эксперименты позволяют на моделях проследить стадии последовательного развития крупного разлома и вычленил те особенности, которые связаны с перестройками внутренней структуры зоны разлома и с выделением упругой энергии. Мгновенная разрядка накопленных напряжений в виде землетрясений происходит, очевидно, по законам разрушения упругого тела. Однако накопление напряжений в большом массиве горных пород в течение длительного времени при действии тектонических сил должно описываться более сложными законами, учитывающими такие свойства напряженно-деформированного массива пород, как способность к течению и релаксации напряжений. Эти свойства неплохо моделируются упруговязким телом Максвелла. Следует отметить, что крупные разломы земной коры и литосферы в целом развиваются так же [8].

В соответствии со сказанным выше при моделировании необходимо исходить из пространственного и временного масштаба изучаемого сейсмического процесса и из свойств субстрата, определяемых этим масштабом. Для исследования отдельного акта землетрясения или ряда событий, приуроченных к мелкому разрыву, развивающемуся обособленно в хрупких верхних частях коры в течение небольшого времени, имеет смысл производить моделирование на упругих материалах. Изучать крупномасштабную сейсмичность в зонах региональных (и более высокого ранга) разломов, развивающихся и сейсмоактивных в течение сотен тысяч и миллионов лет, нужно на моделях из упруговязких и упруго-пластических материалов, используя соответствующие критерии подобия.

За основные параметры, определяющие свойства модели, в этом случае следует принять динамическую вязкость среды, скорость деформирования, характерный линейный размер структуры и тип нагружения (или морфолого-генетический тип формирующего разлома), о чем будет сказано ниже.

Вопрос о моделировании процессов возникновения очага и предшествующих этому событий весьма сложен. Высказываются мнения [6], что ввиду ограниченного знания свойств среды в очагах и многопараметричности процессов в них количественное моделирование процессов формирования сейсмически активной области в соответствии с теорией подобия в настоящее время невозможно. Полностью с подобным суждением согласиться трудно. Многое зависит от решаемой задачи и, следовательно, от того, какие параметры считать определяющими при подготовке и реализации процессов в очагах.

Чаще всего моделирование механизма возникновения землетрясения выполняется на упругих материалах. Однако известно, что процесс подготовки акта землетрясения весьма длителен и оценивается в годы и десятилетия, а очень сильных событий — и в столетия. Вполне вероятно,

что неупругие составляющие участвуют и в самом очаговом процессе. Поэтому вполне правомерно использование для моделирования явлений в очаге упруговязкого (или более сложного) материала. Так, И. Брун [10] предложил в качестве трехмерной модели процесса возникновения очага в зоне разлома рассматривать поведение образца из пенорезины, находящейся в напряженном состоянии, с произвольным вязким скольжением вдоль предварительно подготовленной поверхности. Общий характер смещений по разрыву и фиксируемые события подобны наблюдаемым при землетрясениях. Это одна из немногих работ, в которой для моделирования используется неидеально упругое тело. На возможность использования неупругой среды указывают и другие исследователи [5].

Сложности в применении упруговязких материалов для моделирования очаговых процессов связаны прежде всего с недостаточной разработанностью теории подобия применительно к рассматриваемому явлению. Причиной затруднений в установлении подобия служит тот факт, что отношения скоростей деформирования к скоростям распространения упругих волн не могут быть равными на модели и в природе, как того требует теория размерностей. Такая диспропорция возникает ввиду того, что определяющие скорость распространения звука параметры горных пород и модельного упруговязкого материала слабо различаются по значениям, тогда как скорости деформирования разнятся на несколько порядков. Теоретически указанной несогласованности можно избежать введением аффинных преобразований по отношению к множителям подобия либо использованием анизотропных моделей.

Разделяя вслед за И. П. Добровольским [2; 3] единое сейсмическое событие на период подготовки и собственно землетрясение, можно сказать, что более реальным в настоящее время является моделирование на упруговязких средах периода подготовки землетрясения, но не момента лавинно-неустойчивого разрушения.

Часто при разработке физических моделей очаговых процессов не принимается во внимание морфолого-генетический тип сейсмогенерирующих разломов. Действительно, с точки зрения типа разрушения среды практически все разломы коры и литосферы представляют собой сложные зоны сдвига (сбросы, надвиги, собственно сдвиги в геологическом понимании последнего термина). Исключение составляют раздвиги, которые, как правило, во внимание не принимаются. Модельные исследования физики очага землетрясения, проведенные О. Г. Шаминой [7], также основываются на том, что разлом, генерирующий очаг землетрясения, представляет собой сдвиг.

Однако при изучении процессов формирования областей подготовки землетрясений и явлений, происходящих в их пределах, необходимо учитывать морфолого-генетический тип сейсмоактивного разлома, поскольку без учета этого фактора сложно говорить не только о подготовке отдельных сейсмических событий, но и о познании общих закономерностей проявления сейсмической активности широкого пространственного и временного масштаба в зонах крупных разломов, о сейсмическом районировании этих зон. Поэтому целесообразно моделировать сложные структуры, отвечающие существующим в природе основным морфолого-генетическим разновидностям разломов: сбросам, сдвигам, надвигам и даже срезам. Ниже будет показано, что область активного динамического влияния разлома зависит не столько от типа разрушения среды, сколько от способа нагружения и морфолого-генетической разновидности образующегося разлома. Таким образом, при моделировании крупных разломов способу нагружения необходимо придавать особое значение. Свойства геологической среды и ее предполагаемая структура в области, где возникает землетрясение, дают основание из всего многосложного перечня факторов принять за основные вязкость среды, морфолого-генетический тип разлома, скорость деформирования и линейные размеры структур.

ЗАДАЧИ ЭКСПЕРИМЕНТА

Основным для нас было изучение процесса формирования сложных магистральных трещин (разломов) при разных способах нагружения: сбросов, надвигов, сдвигов и срезов с акцентом на способы и последовательность развития вторичных структур и процессов, сопровождающих деформирование исходной среды и ее разрушение (рис. 2). При изучении вторичных (приразломных) структур предполагалось попутно решить две задачи: изучить зоны активного динамического влияния магистральных трещин и, следовательно, зоны, в которых наиболее вероятно возникновение очагов землетрясений, и оценить их объемы и связь с параметрами структур и свойствами среды.

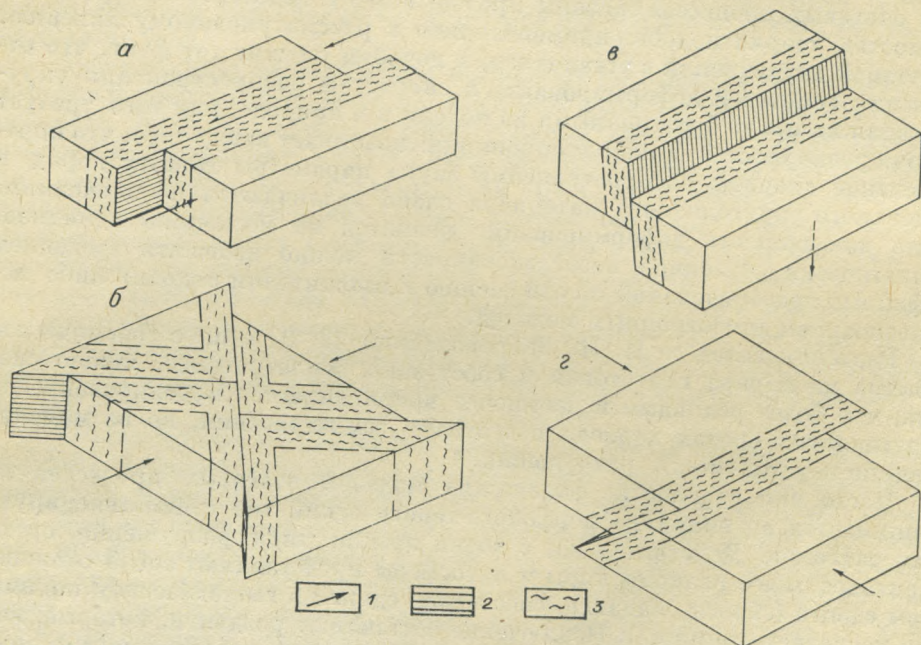


Рис. 2. Морфолого-генетические типы разломов и области их активного динамического влияния (*а* — срез, *б* — сдвиг, *в* — сброс, *г* — надвиг, взброс).
1 — направление действия нагрузки; 2 — плоскость сместителя; 3 — область активного динамического влияния.

Одновременно ставилась задача выделить «структурные» стадии развития крупного разлома, оценить динамику поля напряжений, условия локализации максимумов концентрации напряжений в различных точках в целом однородной модели. Подобные разработки могут найти применение в методике сейсмического районирования в зонах сейсмически активных разломов.

Параллельно изучались некоторые процессы, сопровождающие деформацию модели и ее разрушение, т. е. образование магистральной трещины. Эта серия экспериментов выполнялась с целью поиска предвестниковой информации. Здесь основное внимание обращалось на акустическую эмиссию (АЭ).

МОДЕЛЬНАЯ СРЕДА. ОСНОВНЫЕ ФИЗИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ МОДЕЛИ. ПОДОБИЕ ПРОЦЕССОВ

В качестве модели использовалась глина, вязкость которой можно было варьировать от 10^5 до 10^8 Па·с. На специальной установке глина подвергалась деформированию при разных способах и скоростях нагружения, вязкости и толщине модели.

В процессе эксперимента предполагалось: изучить зону активного динамического влияния и ее изменения в связи со структурными перестройками в процессе развития магистральной трещины; установить связь между способом нагружения и шириной зоны активного динамического влияния; установить, как изменяется зона активного динамического влияния при вариациях скорости нагружения и вязкости модели; изучить динамику поля напряжений в модели (поведение τ_{\max}); исследовать связь АЭ со стадиями развития магистральной трещины.

Проведенная серия опытов представляет собой один комплексный эксперимент, в котором одновременно фиксируются структурные особенности и процессы. Основными физическими параметрами в эксперименте были приняты: параметры среды, определяющие процесс деструкции, — вязкость и плотность материала, толщина деформируемого слоя; параметры, определяющие тектоническую ситуацию, — способ и скорость приложения нагрузки; параметры, характеризующие сейсмический процесс (т. е. исследуемые), — ширина области активного динамического влияния, скорость и миграция полей сдвиговых деформаций, плотность и частота импульсов АЭ.

Подобие определялось критерием Рейнольдса, записанным в несколько отличной от привычной форме

$$\frac{\eta}{\rho g H t} = \text{idem}, \quad (1)$$

где η — динамическая вязкость; ρ — плотность; g — ускорение силы тяжести; H — линейные размеры (толщина слоя); t — время. Тут же следует отметить, что уравнение можно использовать для описания эксперимента, воспроизводящего стадию подготовки землетрясения или долговременного сейсмического процесса (как сейсмического течения масс) в целом. Собственно сейсмический акт (момент разрушения) оно характеризовать не может, так как совершенно не учитывает упругие свойства деформируемой среды.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТ

Эксперименты позволили установить, что ширина зоны нарушения (в природе — области активного динамического влияния разлома) непостоянна и зависит от морфолого-генетического типа разломов (способа нагружения), толщины слоя, вязкости материала, скорости деформирования [9]. Как видно на графиках (рис. 3, а), ширина ее характеризуется линейной зависимостью от толщины разрушаемого слоя; с учетом способа нагружения (в природе — разных морфолого-генетических типов разло-

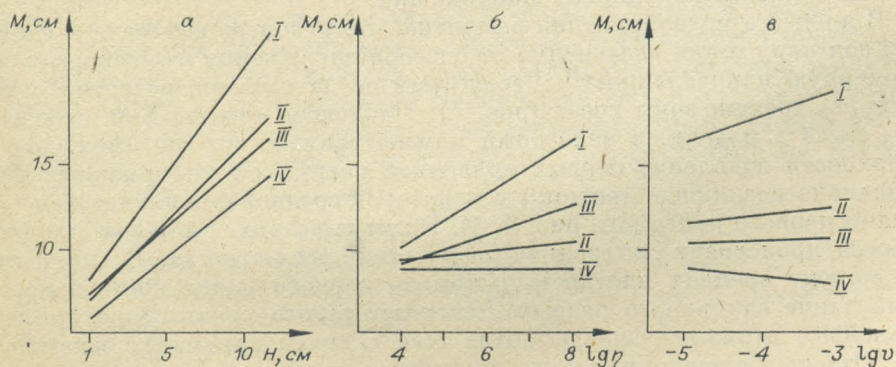


Рис. 3. Влияние толщины модели H (а), ее динамической вязкости η (Па·с) (б) и скорости деформирования v (м/с) (в) на ширину M области активного динамического влияния срезов (I), надвигов (II), сбросов (III) и сдвигов (IV).

Уравнения множественной регрессии, описывающие ширину областей активного динамического влияния разломов различных морфолого-генетических типов (по результатам моделирования)

| Морфолого-генетический тип разлома (вид деформации) | Ширина области активного динамического влияния разломов М (ширина нарушенной зоны), м | Коэффициент | | |
|---|---|--------------------------|---|---|
| | | множественной корреляции | парной корреляции между основными параметрами | детерминации, описывающий вклад основных параметров в изменение параметра М |
| Сдвиги, образующиеся при деформации среза | $M = 1,4533H + 0,0088 \lg \eta + 0,0090 \lg v - 0,0088$ | 0,98 | М и Н = 0,95 М и $\lg \eta$ = 0,18 М и $\lg v$ = 0,01 | 0,9 0,03 0,01 |
| Сдвиги, образующиеся при деформации сжатия | $M = 0,97H + 0,00002 \lg \eta - 0,0047 \lg v + 0,0287$ | 0,89 | М и Н = 0,88 М и $\lg \eta$ = 0,006 М и $\lg v$ = -0,12 | 0,77 0,00004 0,014 |
| Сбросы | $M = 0,9404H + 0,0041 \lg \eta + 0,0025 \lg v - 0,0037$ | 0,99 | М и Н = 0,99 М и $\lg \eta$ = 0,11 М и $\lg v$ = 0,05 | 0,98 0,01 0,002 |
| Надвиги | $M = 1,0967H + 0,0087 \lg \eta + 0,0037 \lg v - 0,0327$ | 0,89 | М и Н = 0,95 М и $\lg \eta$ = 0,24 М и $\lg v$ = 0,06 | 0,90 0,06 0,004 |

Примечание. М — ширина зоны нарушения, м; Н — толщина модели, м; η — вязкость модельного материала, Па·с; v — скорость деформирования, м/с.

мов) эта связь проявляется неодинаково, что свидетельствует о том, что разломы разных морфолого-генетических типов, формирующиеся даже в слоях одинаковой мощности, будут иметь различные размеры областей влияния или областей потенциально возможного возникновения очагов землетрясений.

Следующие графики (см. рис. 3, б, в) отражают изменения ширины зоны нарушения в зависимости от вязкости и скорости деформирования. Видно, что с увеличением этих параметров отмечается разрастание ее при всех способах нагружения, за исключением тех, что моделируют сдвиги. В сводной таблице приведены уравнения множественной регрессии, показывающие величину вклада каждого из факторов в параметр ширины зоны нарушения (см. таблицу).

Таким образом, приведенные результаты позволяют говорить о том, что в зависимости от тектонической обстановки, соотношения векторов тектонических напряжений и тектонического режима изменяются форма и объем областей накопления напряжений.

В процессе моделирования выявлено, что развитие внутренней структуры зон нарушения независимо от способа нагружения имеет общую закономерную направленность. Рассмотрим ее на примере развития одной из систем трещин зоны среза (рис. 4). Наблюдая процесс формирования зоны среза в модели, в некоторый момент времени мы фиксируем на ее поверхности появление первых признаков разрывной деформации. Первоначально возникшие трещины с некоторой средней длиной назовем трещинами первого ранга (см. рис. 4, I). По мере развития деформации в зоне среза происходит синхронное разрастание всех трещин. В определенный момент времени плотность разрывов первого ранга при некоторой новой длине единичного разрыва достигает такого уровня, при котором дальнейшее гармоническое развитие всей системы становится невозможным. Отдельные трещины в силу случайных причин получают преимущество роста, снижая напряжение и подавляя рост трещин, попавших в область их влияния. Происходит структурная перестройка, выражающаяся в пространственном разрежении активно развивающихся трещин, со-

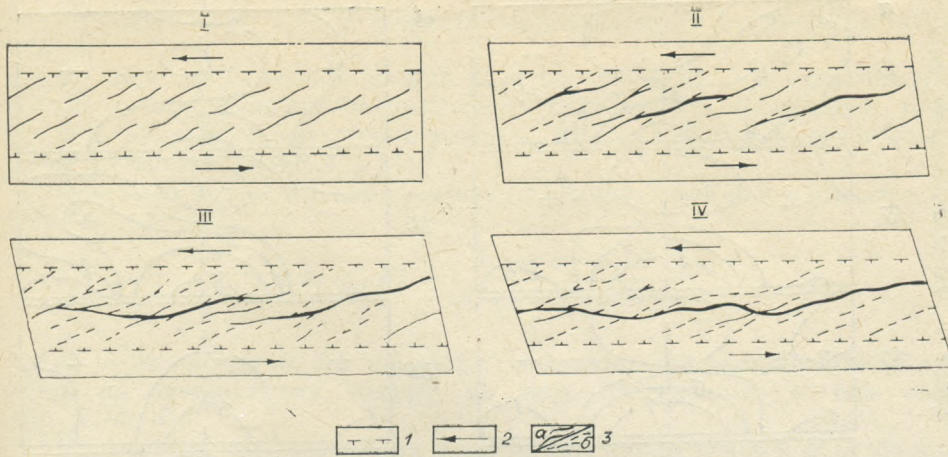


Рис. 4. Схема структурного развития области активного динамического влияния разлома (на примере среза): I—IV — развитие трещиноватости от мелких трещин (ранг I) до магистрального разрыва (ранг IV).

1 — границы области активного динамического влияния среза; 2 — направление движения; 3 — активные (а) и пассивные (б) разрывы.

ответствующих новому, более высокому по сравнению с первым, второму рангу (см. рис. 4, II). Подобно эволюции трещин первого ранга, трещины второго ранга, развиваясь и достигая некоторой критической плотности, дают начало более протяженным по длине трещинам третьего ранга (см. рис. 4, III) и т. д. При переходе от ранга к рангу наблюдается постепенное сокращение количества активных трещин с одновременным увеличением их длины. Высшему рангу будет соответствовать образование магистрального разрыва (см. рис. 4, IV).

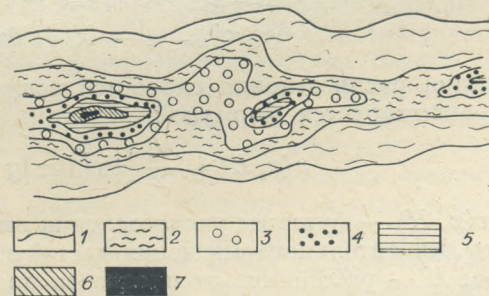
Приведенная схема структурного развития зон разломов показывает, что внутренняя их структура развивается поэтапно: от множества непротяженных трещин первого ранга через поранговые структурные перестройки к единому магистральному разрыву. Перестройки сопровождаются выделением упругой энергии и скачками напряжений. Последние свидетельствуют о переходе системы от одного положения равновесия к другому, отражая равномерно-прерывистый характер разрушения упруговязкого тела.

Было изучено распределение полей сдвиговых деформаций и касательных напряжений в области активного динамического влияния среза на верхней свободной поверхности модели [1]. Эти поля имеют сложную дифференцированную структуру (рис. 5). Их интенсивность изменяется не только вкрест, но и по простирацию области влияния среза.

Для изучения динамики полей сдвиговых деформаций и напряжений непосредственно внутри моделей нами разработана методика измерения больших пластических сдвиговых деформаций модельного материала с помощью датчиков на основе фольговых тензорезисторов. По этой методике проведены первые серии экспериментов, направленные на изучение

Рис. 5. Распределение касательных напряжений на свободной поверхности модели в области активного динамического влияния среза.

1—7 — уровни напряжений, г/см²: 1 — <5,5, 2 — 5,5—5,75, 3 — 5,75—5,90, 4 — 5,90—6,05, 5 — 6,05—6,20, 6 — 6,20—6,35, 7 — >6,35.



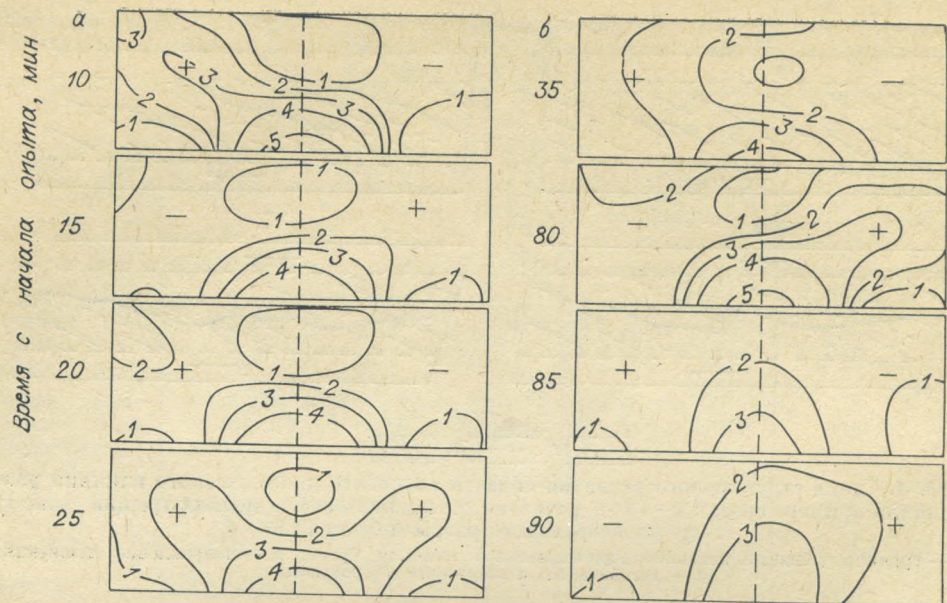


Рис. 6. Миграция зон повышенной интенсивности касательных напряжений из крыла в крыло формирующегося среза в течение одного опыта (а — пликвативная, б — дизъюнктивно-пликвативная стадии).

Знаками плюс и минус обозначены крылья, обладающие в данный момент соответственно большей или меньшей активностью. Изолинии оцифрованы в условных единицах. Пунктиром показан перпендикуляр к оси среза и плоскости подложки.

деформаций и напряжений по вертикальному сечению вкrest простираения формирующегося сдвигового нарушения. Исследованы изменения структуры полей деформаций и напряжений внутри модели в процессе формирования в ней сдвига, образующегося при деформации срезывания, т. е. среза (см. рис. 2, а).

Экспериментально установлено наличие неравномерности и асимметрии распределения касательных напряжений в сечении вкrest простираения зарождающегося разлома (рис. 6). В процессе развития деформации структура поля напряжений изменяется, не теряя при этом своих характерных черт. В результате действия на материал этого, сложным образом меняющегося во времени, неравномерного и асимметричного поля касательных напряжений в модели образуется тем не менее приблизительно симметричная зона трещиноватости. Таким образом, имеет смысл пользоваться для расчета области, в которой возникает трещиноватость, усредненным по времени полем напряжений. В соответствии с этим предположением получены обобщающие экспериментальные данные для формулы распределения скоростей и касательных напряжений в материале модели для пликвативной стадии формирования среза.

Исходя из следующих граничных условий

$$\begin{aligned} v|_{x=-\infty} = 0; \quad v|_{x=0} = v_0/2; \quad v|_{x=+\infty} = v_0; \\ \tau|_{x=\pm\infty} = 0; \quad \partial\tau/\partial x|_{x=0} = 0, \end{aligned} \quad (2)$$

функция распределения скоростей вещества модели наилучшим образом аппроксимируется формулой

$$v(x, H) = \frac{v_0}{2} \left[\operatorname{th} \left(10x \lg \eta \cdot \sqrt[3]{H_0/H} \right) + 1 \right], \quad (3)$$

где $v(x, H)$ — функция распределения скоростей в точке (x, H) ; v_0 — скорость относительного смещения частей подложки; x — расстояние от оси среза; H — расстояние от плоскости приложения сил; H_0 — толщина де-

формируемого слоя; τ — касательные напряжения; th — гиперболический тангенс.

По мере приближения по оси H к плоскости $H = 0$ увеличивается наклон кривой функции распределения скоростей в окрестности точки $x = 0$ и, начиная с некоторого момента, можно переходить к аппроксимации функцией Хевисайда [11].

Описывая распределение касательных напряжений как $\eta \text{grad } v(x, H)$, получим

$$\text{grad } v(x, H) = \frac{5v_0 \lg \eta \sqrt[3]{H_0/H}}{\text{ch}^2(10x \lg \eta \sqrt[3]{H_0/H})}, \quad (4)$$

где ch — гиперболический косинус. Следовательно, напряжения возрастают по нелинейному закону от крыльев разлома к оси среза (рис. 7, а, б).

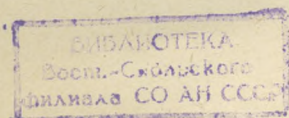
Превышение напряжениями предела прочности ведет к образованию разрывов, поэтому представленную модель распределения напряжений следует рассматривать только в тех областях пространства, где их значения не превышают прочности материала. Найдя эквипотенциальную поверхность критических напряжений, очерчиваем зону, внутри которой будут образованы разрывы (см. рис. 7, в). Эта зона является областью активного динамического влияния образующегося среза. Следовательно, предложен способ расчета осредненной формы и ширины области активного динамического влияния среза.

Анализируя изменения структуры поля напряжений сдвига, можно обнаружить явление миграции поля τ_{max} из крыла в крыло образующегося разрыва (см. рис. 6) и из приосевой части модели к ее поверхности. Миграции имеют колебательный характер. Установлено, что характеристики процесса миграций изменяются в зависимости от стадии формирования разрыва и скорости деформирования модели. Возникновение миграций обусловлено первоначально более активным образованием «микроразрывов» в одном из крыльев будущего разрыва в результате исходной асимметричности и неоднородности крыльев в силу флуктуаций некоторых механических свойств материала модели. Далее вступает в действие колебательный механизм выравнивания степени дислоцированности разных крыльев разрыва. Одной из составляющих этого процесса служат миграции максимумов напряжений от подложки к поверхности, которые, как предполагается, представляют собой волны напряжений. Таким образом, процесс формирования разрыва является сложным колебательным процессом, включающим миграции поля напряжений из крыла в крыло разрыва, от источника нагрузки к поверхности и, возможно, другие виды миграций.

Полученные результаты позволяют выдвинуть предположение о наличии подобных процессов с периодом, согласно теории подобия, 10^4 — 10^6 лет при формировании зон крупных разломов в земной коре.

На специальной установке были изучены изменения нагрузки на модели в период ранговых перестроек внутренней структуры области активного динамического влияния разрывов. Измерения нагрузки на моделях проводились с помощью тензодинамометра. Полученные графики отражают напряженно-деформированное состояние модели при формировании в ней зоны нарушения (рис. 8, а). Тензодинамометр, благодаря высокой чувствительности, позволяет очень точно фиксировать малейшие изменения нагрузки на модели. Анализ кривых «нагрузка — деформация» в сопоставлении с визуальными наблюдениями эволюции разрыва показал, что особенности изменения нагрузки хорошо согласуются с отмеченной выше этапностью ранговых перестроек (см. рис. 8, б).

Метод акустической эмиссии — наиболее сложный и, как показывают первые результаты, наиболее информативный из всех использованных



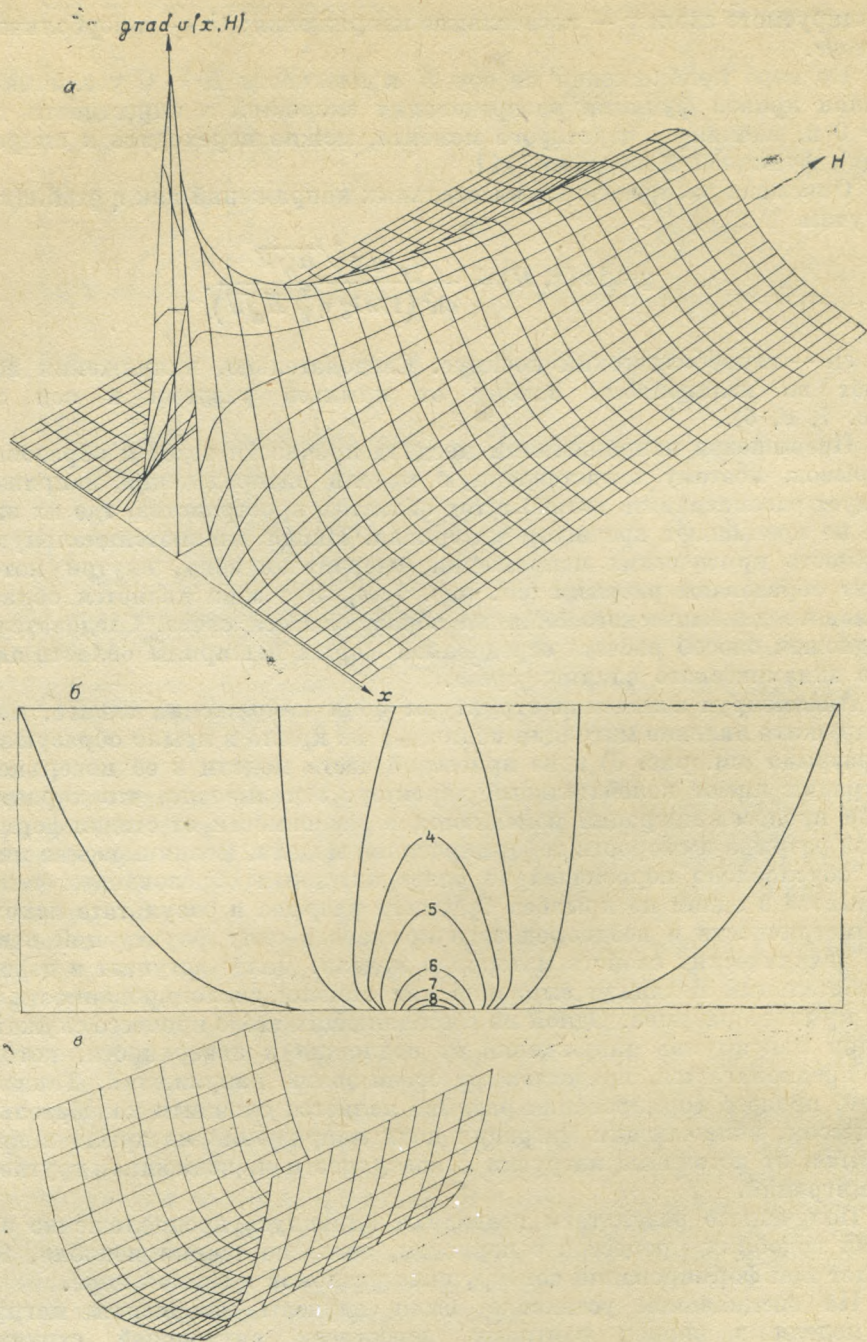


Рис. 7. Усредненные поля касательных напряжений (а — график $\text{grad } v(x, H)$, б — изолинии $\text{grad } v(x, H)$, в — эквипотенциальная поверхность критических напряжений, ограничивающая область активного динамического влияния среза).

нами. Так, при сопоставлении кривых «нагрузка — деформация» и визуальных наблюдений с данными по АЭ отмечается соответствие аппроксимирующей кривой распределения плотности импульсов АЭ, излучаемых формирующимся разрывом, со стадиями его развития, отраженными характерными изменениями кривой нагрузки (см. рис. 8, а, в).

В настоящее время частично отработана методика экспериментов, изучаются способы обработки данных в следующих направлениях: ча-

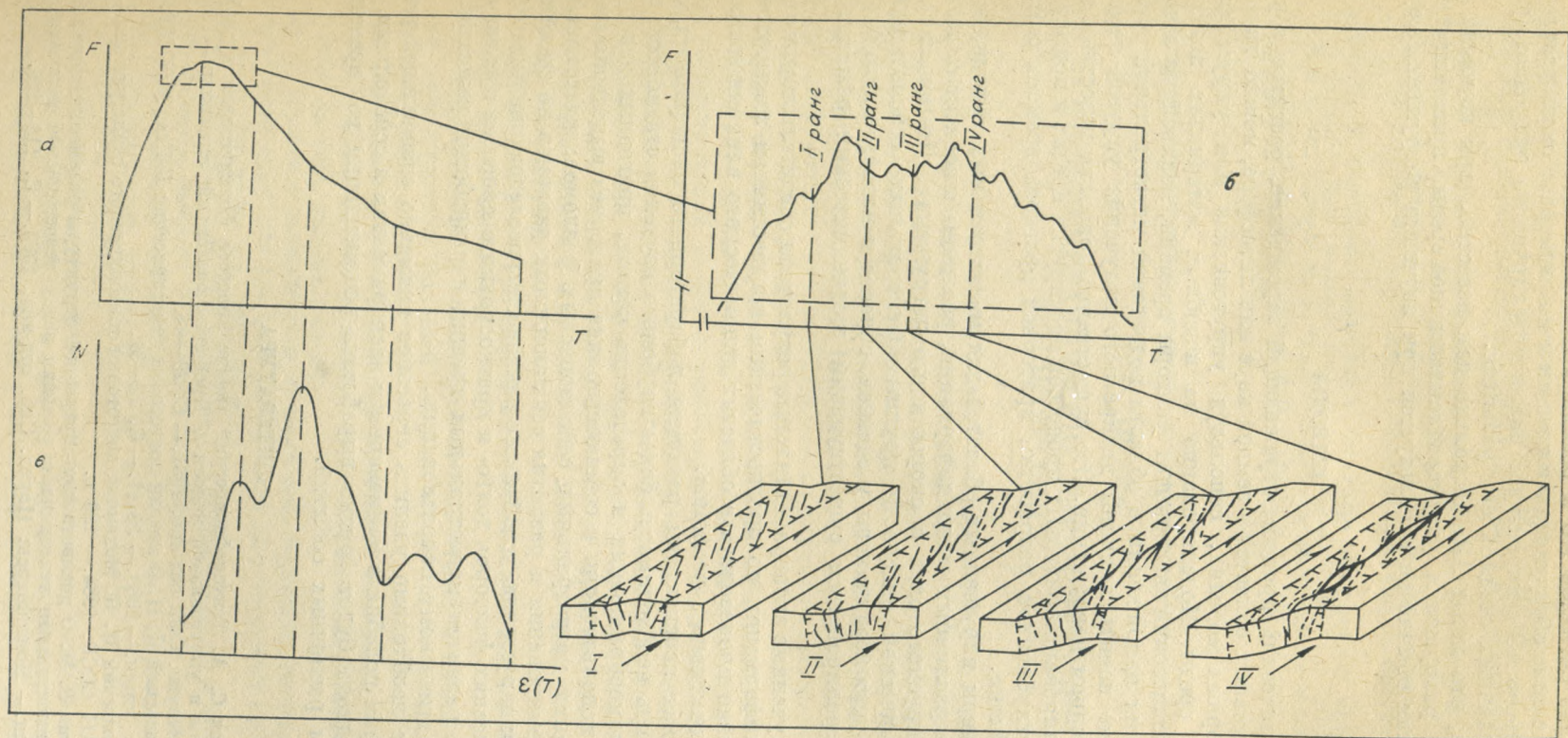


Рис. 8. Изменения нагрузки на модели и акустической эмиссии в процессе формирования среза. а — кривая зависимости нагрузки F от времени t (деформация ε прямо пропорциональна t); б — увеличенная часть кривой $F(t)$, отражающая особенности изменения нагрузки при перестройках трещиноватости в области активного динамического влияния среза; в — аппроксимирующая кривая распределения плотности импульсов акустической эмиссии N . I — IV — разрушаемая модель во время образования трещин I — IV рангов.

стотный анализ сигналов АЭ в реальном масштабе времени — источник информации о типе образующихся трещин и их размерах; связь распределения импульсов АЭ с характеристиками моделируемого природного разлома на различных стадиях его развития.

Заметим, что метод АЭ, насколько нам известно, при изучении деформации и разрушения упруговязкопластичной среды, применен впервые, тогда как обычно он используется при изучении разрушения хрупких тел.

ВЫВОДЫ

1. Сейсмический процесс, отражающий зарождение, развитие и распад деструктивных областей в земной коре или литосфере, можно изучать на лабораторных моделях, используя упруговязкие или упруговязкопластичные среды. Моделирование на подобных материалах позволит ввести в сейсмический эксперимент факторы времени, нелинейные законы распределения напряжений в области подготовки магистральной трещины и глубже понять причины дискретного излучения упругой энергии при равномерном нагружении. Это существенно дополнит известные данные о моделировании очаговых процессов на упругих средах и подготовит базу для углубленной разработки критериев прогноза времени сейсмического события.

2. Размеры нарушенных областей для магистральных трещин, полученных при различных типах деформации, различны и зависят от толщины деформируемого слоя и скорости его нагружения. Иными словами, зоны сейсмической опасности крупных (генеральных) сейсмоактивных разломов будут неодинаковы у сдвигов, сбросов и надвигов и во многом будут контролироваться существующим геодинамическим режимом региона.

3. Полученные экспериментальные результаты свидетельствуют о том, что сбор информации по прогностическим предвестникам землетрясений целесообразно производить в областях динамического влияния генеральных сейсмоактивных разломов.

Оценивая перспективы развития лабораторного эксперимента, следует отметить необходимость более глубокого изучения стадийности процесса разломообразования и определение четких, пригодных для практического использования в сеймотектонике критериев выделения стадий формирования магистральных сейсмоопасных разломов; классификации стадий формирования и развития сейсмоопасных разломов по состоянию, близкому к нарушению устойчивого равновесия; исследования физических и геологических факторов долго- и краткосрочного прогноза времени смены стадий развития магистральных трещин и разработки рекомендаций по их практическому использованию.

Также необходимо уделить серьезное внимание специальной разработке теории подобия в применении к экспериментам в сейсмологии. Без такого подхода будет трудно выработать рекомендации по временным критериям различных событий.

ЛИТЕРАТУРА

1. Борняков С. А. Тектонофизический анализ процесса формирования трансформной зоны в упруговязкой модели // Проблемы разломной тектоники. — Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1981. — С. 26—44.
2. Добровольский И. П. О модели подготовки землетрясения // Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли. — 1980. — № 11. — С. 23—31.
3. Добровольский И. П. Механика подготовки тектонического землетрясения. — М.: ИФЗ АН СССР, 1984. — 189 с.
4. Лобацкая Р. М. О дискретности внутренней структуры разрывных нарушений // Экспериментальная тектоника в решении задач теоретической и практической геологии. — Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1982. — С. 118—120.

5. Сейсмический риск и инженерные решения.— М.: Недра, 1981.— 375 с.
6. Соболев Г. А. Предвестники землетрясения и условия лабораторного эксперимента // Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли.— 1980.— № 12.— С. 30—43.
7. Шамина О. Г. Модельные исследования физики очага землетрясения.— М.: Наука, 1981.— 192 с.
8. Шерман С. И. Физические закономерности развития разломов в земной коре.— Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1977.— 402 с.
9. Шерман С. И., Борняков С. А., Буддо В. Ю. Области динамического влияния разломов (результаты моделирования).— Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1983.— 112 с.
10. Brune Y. N. Earthquake modelling by stick-slip along pre-cut surfaces in stressed foam rubber // Bull. Seismol. Soc. Am.— 1973.— V. 63.— P. 2105—2119.
11. Lockett Y. M., Kuznir N. Y. Ductile shear zone: some aspects of constant slip velocity and constant shear stress models // Geophys. J. Roy. Astron. Soc.— 1982.— V. 69, N 2.— P. 477—494.

В. И. Щеглов

О ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРАХ ОЧАГА ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ

Решение обратной задачи очага — определение его физико-механических параметров, таких как скачок напряжений $\Delta\sigma$, величина подвижки, длина L и ширина W площадки разрыва, — является ключевой проблемой современной сейсмологии. Впервые такая задача была решена Дж. Брюном для одномерной модели очага в виде мгновенной круговой площадки разрыва радиуса R [6]. Его способ долгое время пользовался успехом у сейсмологов, которые надеялись получить с его помощью новую количественную информацию об очаге [3].

Однако с течением времени выяснилась несостоятельность этой методики, поскольку любые попытки количественной классификации параметров землетрясений с целью районирования оканчивались неудачей. Стало ясно, что для описания динамики процесса разрушения в очаге и определения его параметров должна быть создана модель более сложная и информативная, чем одномерная круговая площадка разрыва Брюна. Исследования особенностей излучения от произвольной площадки разрыва (средние длина и ширина L и W соответственно) [2—4] позволили установить следующее:

с увеличением $p = W/L$ спектр излучения в объемных волнах становится более высокочастотным;

для землетрясений с одинаковыми размерами площадок разрыва $S = LW$ землетрясение большей энергии будет более высокочастотным (за счет увеличения p);

для землетрясений с одинаковой величиной подвижки в очаге $D = W \cdot \Delta\gamma$ [3] более высокочастотным будет землетрясение меньшей энергии (также за счет увеличения p);

при $p = \text{const}$ с увеличением энергии землетрясения спектр становится более низкочастотным (за счет увеличения длительности процесса разрыва), $\Delta\gamma$ и $\Delta\sigma$ остаются постоянными;

если $\nu_{0,5}$ (частота спектра на правом склоне на уровне 0,5) постоянна, то с увеличением энергии землетрясения растут p , т. е. изометричность площадки разрыва, и остальные параметры очага. Перечисленные выводы иллюстрируются палеткой $\lg M_0 = f(\lg \nu_{0,5})$, где M_0 — сейсмический момент (см. рисунок).

В работе [4] исследовались зависимости между параметрами очага и изометричностью площадки разрыва. Очаг землетрясения представляется в виде вытянутого вдоль оси z цилиндра длиной L и диаметром ос-