

№ 0023

ISSN 0016—7886

**ГЕОЛОГИЯ
и
ГЕОФИЗИКА**

10

ИЗДАТЕЛЬСТВО «НАУКА» • СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ

разломов в верхние горизонты земной коры и связанным с ним формированием месторождений железа, титана, меди, марганца, свинца, цинка, а с другой стороны — процессами унаследованности рудообразования, т. е. перераспределением рудных концентраций предшествующих эпох с образованием новых типов рудных формаций.

Направленность металлогенической эволюции выражается, в частности, в вовлечении в процессы рудогенеза в более поздние металлогенические эпохи элементов с более низким кларком. Металлогеническая эволюция — это усложнение состава рудных формаций при постепенном последовательном повышении роли ассоциаций литофильного типа. Эта закономерность соответствует направленной литификации и повышению степени зрелости континентальной земной коры в рассматриваемом регионе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Геолого-геохимические особенности главнейших фосфоритонесных формаций Алтае-Саянской складчатой области. — Труды СНИИГГМСа, вып. 48, М.: Недра, 1970.
2. Дербиков И. В., Руткевич И. С. Железорудные месторождения Горной Шории в свете вулканогенно-осадочной теории рудообразования. — Труды СНИИГГМСа, вып. 125, Новосибирск, 1974.
3. Иванкин П. В. и др. О металлогенической асимметрии формации гранитоидных батолитов пестрого состава. — Геология и геофизика, 1971, № 6.
4. Кривцов А. И. Оценка перспектив бокситовосности древних кембросийских карбонатных толщ Горной Шории. — Труды ВСЕГЕИ, вып. 29, 1960.
5. Кузнецов В. А. Алтае-Саянская металлогеническая провинция и некоторые вопросы металлогении полициклических складчатых областей. — В кн.: Закономерности размещения полезных ископаемых. Т. VIII. М.: Наука, 1967.
6. Кузнецов В. А. Проблемы металлогении Тувы. — Геология и геофизика, 1984, № 2.
7. Пинус Г. В. и др. Гипербазиты Алтае-Саянской складчатой области. — М.: Изд-во АН СССР, 1958.
8. Поляков Г. В. Палеозойский магматизм и железоруденение юга Средней Сибири. — М.: Наука, 1971.
9. Рундквист Д. В. Эволюция рудообразования во времени. — В кн.: Геологическое строение СССР. Т. 5. М.: Недра, 1969.
10. Смирнов В. И. Первичность рудообразования в геологической истории. — В кн.: Металлогения и рудные месторождения. Доклады на XXVII МГК, т. 12. М.: Наука, 1984.

ИГиГ СО АН СССР
Новосибирск
ВСЕГЕИ Ленинград

Поступила в редакцию
25 января 1985 г.

V. A. Kuznetsov, Yu. I. Pijinsky

METALLOGENIC EVOLUTION OF THE PHANEROZOIC FOLDED SYSTEMS IN THE SOUTH OF SIBERIA

The analysis of metallogenic features of the Altai-Sayan folded region attests that in Phanerozoic folded systems, which bound the south of the Siberian Platform, metallogenic evolution was natural. It was due to the process of successive lithification and rise in the degree of continental crust maturity in this region.

УДК 551.240.089 + 551.243

С. И. ШЕРМАН, С. А. БОРНЯКОВ, В. Ю. БУДДО,
В. А. ТРУСКОВ, А. А. БАБИЧЕВ

МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕХАНИЗМА ОБРАЗОВАНИЯ СЕЙСМОАКТИВНЫХ РАЗЛОМОВ В УПРУГО-ВЯЗКОЙ СРЕДЕ

Обоснована возможность моделирования областей подготовки землетрясений на упруго-вязких материалах с учетом морфологогенетического типа разломов. Приводятся экспериментальные данные о ширине и форме областей подготовки землетрясений, о миграциях зон интенсивных деформаций в их пределах, о связи акустической эмиссии формирующегося разлома со стадиями его развития. Очерчен круг задач, которые могут быть решены моделированием на упруго-вязких материалах.

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

Быстрому разрушению материала в очаговой зоне всегда предшествует определенный период подготовки, который на несколько порядков длительнее собственно акта землетрясения и оценивается годами и десятилетиями, а подготовка сильных событий — и столетиями. Абсолютные значения тектонических сил, вызывающих землетрясения, изменяются очень медленно, определяя тем самым соответствующий геотектонический режим развития территории. От него зависит скорость движений коры (и литосферы в целом), а следовательно, и ее деформации. Кроме того, последние во многом определяются реологическими свойствами горных пород и их тектонической структурой. Особенно высокие градиенты движений и скорости деформаций характерны для зон генеральных разломов, которые и являются при любом активном режиме геотектонического развития главными тектоническими структурами, контролирующими сильные землетрясения. Точнее, сильные землетрясения знаменуют собой определенные этапы в длительном процессе формирования генеральных разломов коры и литосферы. Таким образом, знание закономерностей развития крупных разломов литосферы очень важно для изучения физики очага землетрясения и разработки критериев прогноза сильных событий.

Прямыми геологическими методами получить данные о закономерностях развития крупных разломов и сопровождающих их формирование физико-химических процессах и вторичных структурах практически очень трудно вследствие большой длительности развития геологических структур, составляющей тысячи, сотни тысяч лет.

Косвенные методы, в частности, лабораторные эксперименты, могут позволить в «ускоренном темпе» промоделировать формирование крупного разлома и вычлениить те особенности его развития на отдельных временных этапах, которые связаны с перестройками внутренней структуры зоны формирующегося разлома и с выделением упругой энергии, сопровождающей резкие подвижки.

Высказываются мнения [7], что ввиду ограниченного знания свойств среды в очагах и многопараметричности процессов в них, количественное моделирование процессов подготовки землетрясений в соответствии с теорией подобия в настоящее время невозможно. Полностью с подобным суждением согласиться трудно. Многие зависит от того, какие параметры считать определяющими при подготовке и реализации процессов в очагах.

Основные параметры очага. Среда и ее геологическая характеристика. По современным понятиям, очаг землетрясения представляет собой эллипсоидную деструктивную зону. Ее линейные размеры и ориентировка характеризуются направленностью и размерами длинной и короткой осей эллипса: Вмещающей средой являются горные породы; контролирующими структурами — зоны разломов. Таким образом, наиболее вероятно возникновение очагов в области динамического влияния разлома в местах повышенной концентрации напряжений, благоприятных для развития зон дробления пород. Другими словами, очаги землетрясений — это деструктивные зоны в областях динамического влияния разломов (имеются в виду сильные землетрясения, контролируемые разломами). Как показывают геологические наблюдения [4, 5], деструктивные зоны являются неотъемлемой особенностью структуры областей динамического влияния разломов. Пока нет гипотезы, удовлетворительно объясняющей их развитие.

Крупные разломы земной коры и литосферы в целом развиваются по законам деформирования упруго-вязкого тела Максвелла [9], и процесс этот достаточно длителен. Было отмечено, что стадия подготовки землетрясения также длительна по времени. Следовательно, можно полагать, что и зона подготовки землетрясения развивается по законам деформации

максвелловского тела, описываемым уравнением

$$\dot{\epsilon} = \dot{\sigma}/E + \sigma/\eta, \quad (1)$$

где ϵ — деформации; σ — напряжения; η — динамическая вязкость; E — модуль Юнга.

Естественно предложить для изучения процесса подготовки землетрясения модели, поведение материала которых при нагружении и разрушении соответствует свойствам максвелловского тела.

Принимая во внимание многопараметричность процессов, протекающих в очаговой зоне в период подготовки землетрясения и в момент его реализации, особенно их разную длительность, весьма целесообразно, вслед за И. П. Добровольским [2, 3], рассматривать отдельно физические процессы, сопровождающие деформацию и первые стадии разрушения среды (период подготовки землетрясения), и процессы, сопровождающие собственно лавинно-неустойчивое разрушение (землетрясение). В соответствии с этим деформацию упруго-вязкой среды вплоть до образования магистральной трещины можно рассматривать как подготовительную стадию, а слияние дислокаций в магистральную трещину — как основную сейсмическую стадию развития зоны разлома. В эту основную стадию может произойти несколько сильных землетрясений, разделенных небольшими интервалами времени. Они отражают разрыв отдельных перемычек, а в целом — сейсмическое течение в понимании Ю. В. Ризниченко [5]. Такой подход позволит четче выявить главные предвестники для целей прогноза и главные структуры, образуемые при полном формировании разрыва, для целей сейсмического районирования.

Часто при разработке физических моделей очага землетрясения не принимается во внимание морфологогенетический тип разломов коры. 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. Как правило, последний случай во внимание не принимается. Модельные исследования физики очага землетрясения, проведенные О. Г. Шаминой [8], также исходят из того, что разлом, генерирующий очаг землетрясения, представляет собой сдвиг.

В то же время при построении физической модели процесса подготовки землетрясения необходимо учитывать морфологогенетический тип сейсмогенерирующего разлома. Без учета этого фактора сложно говорить не только о подготовке отдельных сейсмических событий, но и тем более о познании общих закономерностей проявления сейсмической активности широкого масштаба в зонах крупных разломов, о сейсмическом районировании этих зон. Целесообразно моделировать не единичные трещины сдвига, а более сложные структуры, отвечающие существующим в природе основным морфологогенетическим разновидностям разломов: сбросы, сдвиги, надвиги и срезы. Как будет показано ниже, оказывается, что область активного динамического влияния разломов зависит не столько от типа разрушения материала, сколько от способа нагружения и морфологогенетической разновидности образующегося разлома. Таким образом, при моделировании крупных разломов способу нагружения необходимо придавать особое значение. Модель очага по ряду параметров существенно зависит от способа нагружения и, следовательно, от морфологогенетического типа разлома. Свойства геологической среды и ее предполагаемая структура в зоне подготовки очага землетрясения дают основание из многих факторов принять за основные вязкость среды, морфологогенетический тип разлома, относительную скорость деформирования и линейные размеры структур.

Условно разделив единый сейсмический процесс на период подготовки землетрясения и собственно акт землетрясения, рассмотрим основные задачи, которые решаются с помощью физического эксперимента.

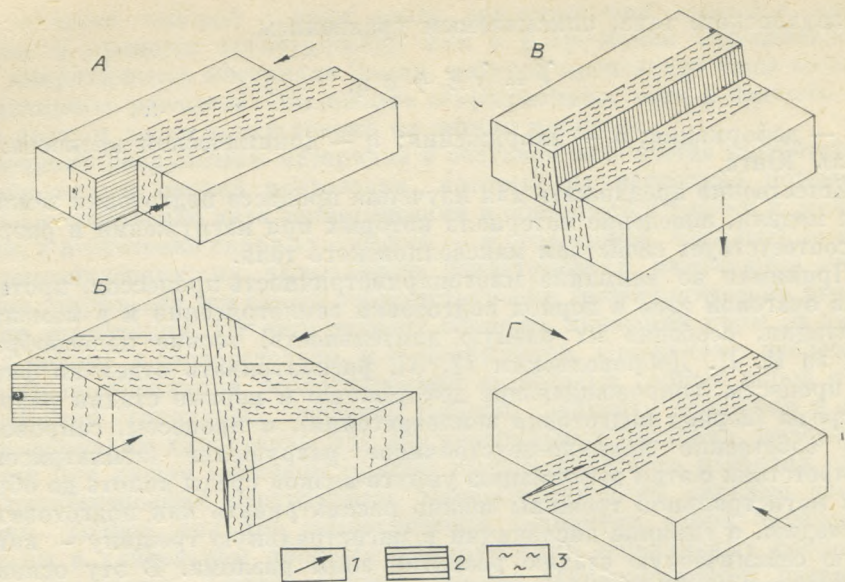


Рис. 1. Морфологогенетические типы разломов и области их активного динамического влияния.

А — срез, Б — сдвиг, В — сброс, Г — надвиг, взброс; 1 — направление действия нагрузки, 2 — плоскость сместителя, 3 — область активного динамического влияния.

В качестве принципиальной физической модели очага землетрясения принята модель лавинонеустойчивого трещинообразования, хотя она и не в состоянии полностью описать процесс для максвелловского тела. Основной являлась задача изучить процесс формирования сложных магистральных трещин (разломов) при разных способах нагружения, т. е. изучить образование генеральных разломов: сбросов, надвигов, сдвигов и срезов (рис. 1) с акцентом на способы и последовательность развития вторичных структур и процессов, сопровождающих деформирование исходной среды и ее разрушение. При изучении вторичных (приразломных) структур предполагалось попутно решить две задачи: изучить зоны активного динамического влияния магистральных трещин и, следовательно, зоны, наиболее вероятные для возникновения очагов землетрясений и оценить их объемы и связь с параметрами структур и свойствами среды.

Одновременно ставилась задача выделить «структурные» стадии развития крупного разлома, оценить динамику поля напряжений, оценить условия локализации максимумов концентрации напряжений в различных местах в целом однородной модели. Ответы на поставленные вопросы должны расширить наши знания о принципах сейсмического районирования в зонах сейсмически активных разломов.

Параллельно нами изучались в качестве предвестников землетрясений некоторые процессы, сопровождающие деформацию модели и ее разрушение, т. е. образование магистральной трещины. Здесь основное внимание было обращено на акустическую эмиссию (АЭ).

Модельная среда. Основные физические параметры модели. Подобие процессов. Принимая во внимание изложенные выше соображения о длительности подготовки сейсмического события и главное об упруго-вязкопластичном поведении среды в этот период, в моделях использовалась глина, вязкость которой можно было варьировать от 10^4 до 10^8 Па·с при разных способах и скоростях нагружения, вязкости и толщине модели. Задачи исследования заключались в следующем:

1) изучить зону активного динамического влияния и ее изменения в связи со структурными перестройками в процессе развития магистральной трещины;

2) установить связь между способом нагружения и шириной зоны активного динамического влияния;

- 3) установить, как изменяется зона активного динамического влияния при вариациях скорости нагружения и вязкости модели;
- 4) изучить динамику поля напряжений в модели (поведение τ_{\max});
- 5) исследовать связь АЭ со стадиями развития магистральной трещины.

Проведенная серия опытов в целом представляла собой один комплексный эксперимент, в котором одновременно фиксировались структурные особенности и процессы.

Подобие при моделировании определялось критерием Рейнольдса, записанным в несколько измененной от привычного стандарта форме $\eta/\rho g H T = \text{idem}$ (2), где η — динамическая вязкость; ρ — плотность; g — ускорение силы тяжести; H — линейные размеры (толщина слоя); T — время.

Тут же следует заметить, что уравнение можно использовать для моделирования стадии подготовки землетрясения или долговременного сейсмического процесса (как сейсмического течения масс) в целом. Собственно сейсмический акт оно характеризовать не может, так как совершенно не учитывает упругие свойства деформируемой среды.

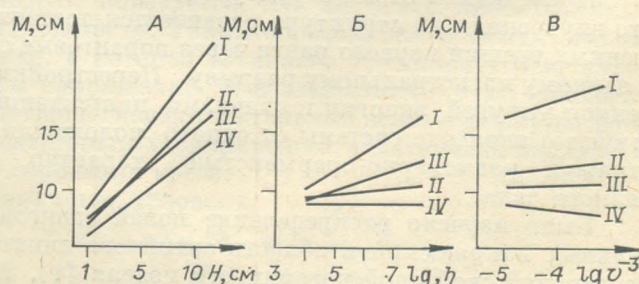
Сейсмический акт и модель мгновенного импульса напряжений рассмотрена в других работах (например, Бруна [11]) и имеет большее отношение к оценке распространения волн от дислокаций при импульсном нагружении. Позже Брун [12] предложил в качестве трехмерной модели очага в зоне разлома рассматривать модель 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 очага землетрясения используется не идеально упругое тело. На необходимость использовать при моделировании землетрясений неупругие среды указывают и другие авторы [6].

Результаты работ. Эксперименты позволили установить, что ширина областей активного динамического влияния разломов непостоянна и зависит от морфологогенетического типа разломов (способа нагружения), толщины слоя, вязкости материала, скорости деформирования [10].

Как видно из приведенных графиков (рис. 2, А), ширина области активного динамического влияния линейно зависит от толщины разрушаемого слоя, причем для разных морфологогенетических типов разломов эта связь проявляется неодинаково. Это говорит о том, что разные морфологогенетические типы разломов, формирующиеся даже в слоях одинаковой мощности, будут иметь различные размеры областей своего влияния или областей потенциально возможного возникновения очагов землетрясений.

Следующие графики (рис. 2, Б, В) отражают изменения размеров областей влияния разломов в зависимости от вязкости и скорости деформирования. Видно, что с увеличением этих параметров ширина областей влияния всех разломов, за исключением сдвигов, возрастает. В таблице приведены уравнения множественной регрессии, показывающие величину вклада каждого из факторов в параметр ширины области влияния разломов.

Рис. 2. Влияние толщины модели $H(A)$, 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 морфологогенетических типов

Морфологогенетический тип разломов	Ширина области активного динамического влияния разломов M , м	Коэффициент множественной корреляции	Коэффициент парной корреляции между основными параметрами	Коэффициент детерминации
Сдвиги, образуемые при деформации среза	$M = 1,4533H + 0,0088 \lg \eta + 0,0090 \lg v - 0,0088$	0,98	M и $H = 0,95$ M и $\lg \eta = 0,18$ M и $\lg v = 0,11$	0,9 0,03 0,01
Сдвиги, образуемые при деформации сжатия	$M = 0,97H + 0,00002 \lg \eta - 0,0047 \lg v + 0,0287$	0,89	M и $H = 0,88$ M и $\lg \eta = 0,006$ M и $\lg v = -0,12$	0,77 0,00004 0,014
Сбросы	$M = 0,940H + 0,0041 \lg \eta + 0,0025 \lg v - 0,0037$	0,99	M и $H = 0,99$ M и $\lg \eta = 0,11$ M 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	M и $H = 0,95$ M и $\lg \eta = 0,24$ M и $\lg v = 0,06$	0,90 0,06 0,004

Примечание. M — ширина области активного динамического влияния разломов, м; H — толщина модели, м; η — вязкость модельного материала (Па·с); v — скорость деформирования (м/с). Коэффициент детерминации описывает вклад основных параметров в изменение параметра M .

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

В процессе моделирования выявлено, что развитие внутренней структуры зон разломов независимо от их морфологогенетического типа имеет общую закономерную направленность [1]. В некоторый момент времени на поверхности зоны среза фиксируются первые признаки разрывной деформации. Первоначально возникшие трещины с некоторой средней длиной назовем трещинами первого ранга. 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 такой величины, при которой дальнейшее гармоническое развитие всей системы становится невозможным. Отдельные трещины в силу случайных причин получают преимущество роста, снимая напряжения с трещин, попавших в область их влияния. Происходит структурная перестройка, выражающаяся в пространственном разрежении активно развивающихся трещин, соответствующих новому, более высокому по сравнению с первым, второму по длине рангу. Подобно эволюции трещин первого ранга, трещины второго ранга, развиваясь и достигая некоторой критической плотности, дают начало более протяженному по длине третьему рангу и т. п. При переходе от ранга к рангу наблюдается постепенное сокращение количества активных трещин с одновременным увеличением их длины. Высшему рангу будет соответствовать образование магистрального разрыва.

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 упруго-вязкого 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

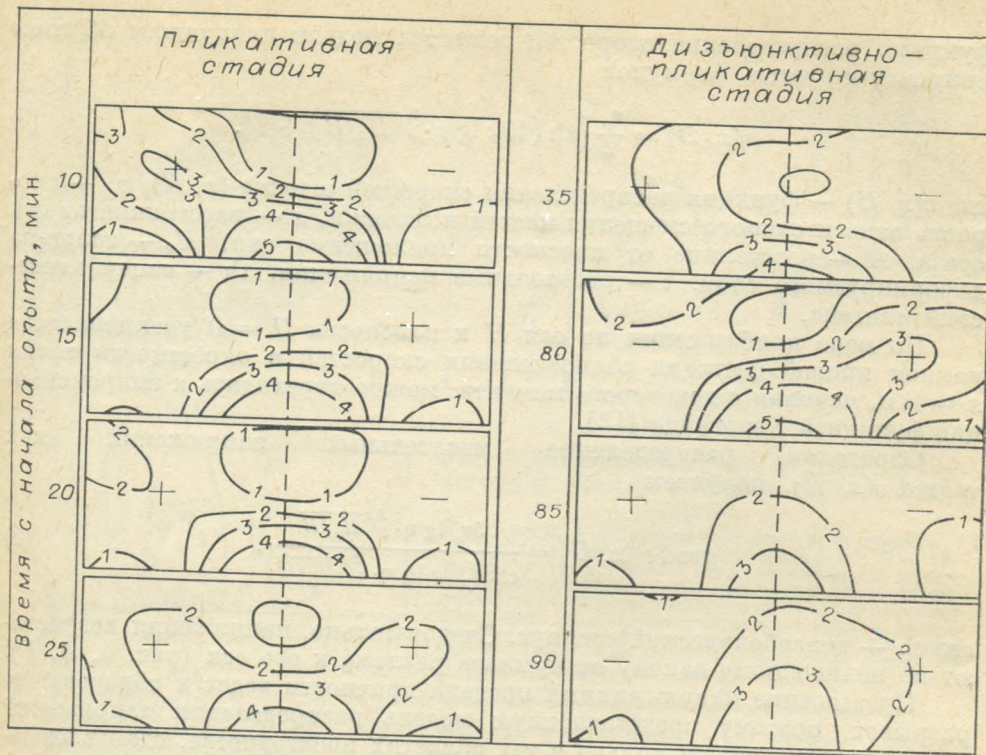


Рис. 3. Миграция зон повышенной интенсивности касательных напряжений из крыла в крыло формирующегося среза в течение одного опыта. Знаками «+» и «-» обозначены крылья, обладающие в данный момент соответственно большей и меньшей активностью. Изолинии оцифрованы в условных единицах. Пунктиром показан перпендикуляр к оси среза и плоскости подложки.

дифференцированную структуру. Их интенсивность изменяется не только вкрест, но и по простирацию области влияния разлома.

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 деформаций и напряжений по вертикальному сечению вкрест простираения формирующегося сдвигового разлома. Исследованы изменения структуры полей деформаций и напряжений внутри модели в процессе формирования в ней сдвига, образующегося при деформации срезывания, т. е. среза (см. рис. 1, А).

Экспериментально установлено наличие неравномерности и асимметрии распределения касательных напряжений в сечении вкрест простираения зарождающегося разлома (рис. 3). 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 формулы распределения скоростей и касательных напряжений в материале модели для пликативной стадии формирования среза.

При следующих граничных условиях:

$$v|_{x=-\infty} = 0; \quad v|_{x=0} = v_0/2; \quad v|_{x=+\infty} = v_0;$$

$$\tau|_{x=\pm\infty} = 0; \quad \partial\tau/\partial x|_{x=0} = 0,$$

функция распределения скоростей вещества модели наилучшим образом аппроксимируется формулой

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

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 деформируемого 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 [13].

Определяя распределение касательных напряжений как $\operatorname{grad} v(x, H)$, получаем

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

где ch — гиперболический косинус. Следовательно, напряжения возрастают по нелинейному закону от крыльев разлома к его оси (рис. 4, А, В).

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 (рис. 4, В). Эта зона является областью активного динамического влияния образующегося среза. Таким образом, предложен способ расчета осредненной формы и ширины области активного динамического влияния среза.

В результате анализа изменений структуры поля напряжений сдвига обнаружены явления миграции поля τ_{\max} из крыла в крыло образующегося разлома (см. рис. 3) и из приосевой части модели к ее поверхности. Миграции имеют колебательный характер. Установлено, что характеристики процесса миграций изменяются в зависимости от стадии формирования разлома и скорости деформирования модели. Возникновение миграций обусловлено первоначально более активным образованием разрывов в одном из крыльев будущего разлома 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 разлома. К составляющим этого процесса относятся миграции максимумов напряжений от подложки к поверхности, которые, как предполагается, представляют собой волны напряжений. Таким образом, процесс формирования разлома является сложным колебательным процессом, включающим миграции поля напряжений из крыла в крыло разлома, от источника нагрузки к поверхности и, возможно, другие виды миграций.

Выдвинуто 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 разломов. Измерения нагрузки на моделях проводились с помощью тензодинамометра. Полученные графики (рис. 5, А) отражают напряженно-деформированное состояние модели при формировании в ней зоны разлома. Тензодинамометр, благодаря высокой чувствительности, позволяет очень точно фиксировать малейшие изменения нагрузки на модели. Анализ кривых «нагрузка — деформация» в со-

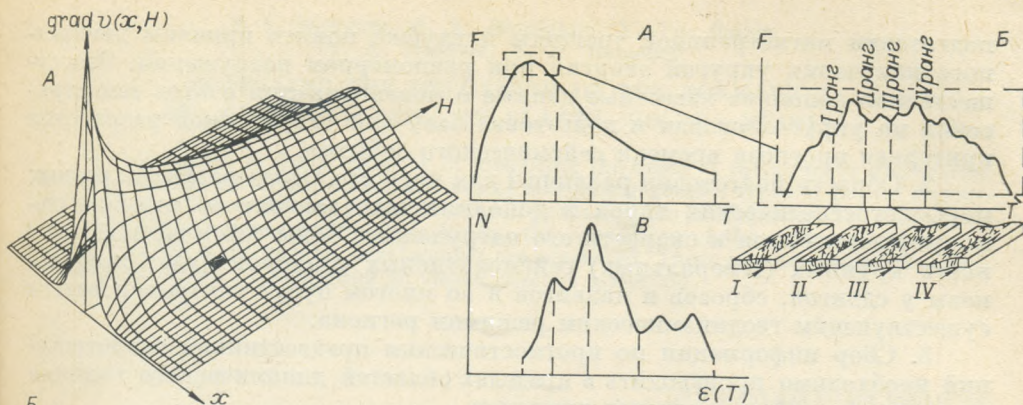


Рис. 5. Изменения нагрузки на модели и акустической эмиссии в процессе формирования среза.

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.

Рис. 4. 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.

поставлении с визуальными наблюдениями эволюции разлома показал, что особенности изменения нагрузки хорошо согласуются с отмеченной выше этапностью ранговых перестроек (рис. 5, Б).

Метод акустической эмиссии наиболее сложный и, как показывают первые результаты, наиболее информативный в проводимых работах. Так, при сопоставлении кривых «нагрузка — деформация» и визуальных наблюдений с данными по АЭ отмечается соответствие аппроксимирующей кривой распределения плотности импульсов АЭ, излучаемых формирующимся разломом, со стадиями его развития, отраженными характерными изменениями кривой нагрузки (см. рис. 5, А, Б).

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

а) частотный анализ сигналов АЭ в реальном масштабе времени даст информацию о типе образующихся трещин и их размерах;

б) распределение импульсов АЭ позволит судить о сейсмоактивности моделируемого природного разлома на различных стадиях его развития.

Заметим, что метод АЭ, насколько нам известно, впервые применен при изучении деформации и разрушения упруго-вязко-пластичной среды, тогда как обычно АЭ изучается при разрушении хрупких тел.

Общие выводы

Анализ проведенных экспериментальных работ дает основание для следующих заключений.

1. Сейсмический процесс и акт землетрясения, отражающие зарождение, развитие и распад некоторой деструктивной области в земной коре или литосфере, можно изучать на лабораторных моделях, используя упруго-вязкие или упруго-вязко-пластичные 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 очагов землетрясений на упругих средах и подготовит базу для углубленной разработки критериев прогноза времени сейсмического события.

2. Области подготовки различны для магистральных разрывов разных морфологогенетических типов и дополнительно зависят от толщины деформируемого слоя и скорости его нагружения. Зоны сейсмической опасности крупных (генеральных) сейсмоактивных разломов будут неодинаковы у сдвигов, сбросов и надвигов и во многом будут контролироваться существующим геодинамическим режимом региона.

3. Сбор информации по прогностическим предвестникам землетрясений необходимо производить в пределах областей динамического влияния генеральных сейсмоактивных разломов.

В ближайшие задачи лабораторного эксперимента должны включаться:

1. Более глубокое изучение стадийности процесса разломообразования и определение четких, пригодных для практического использования в сеймотектонике, критериев выделения стадий формирования магистральных сейсмоопасных разломов.

2. Классификация стадий формирования и развития сейсмоопасных разломов по состоянию, близкому к нарушению устойчивого равновесия.

3. Исследование физических и геологических факторов долгосрочного и краткосрочного прогноза времени смены стадий развития магистральных трещин и разработка рекомендаций по их практическому использованию.

Кроме того, 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. — В кн.: Проблемы разломной тектоники. Новосибирск: Наука, 1981.
2. Добровольский И. П. О модели подготовки землетрясения. — Изв. АН СССР. Серия физика Земли, 1980, № 11.
3. Добровольский И. П. Модель подготовки сильного тектонического землетрясения. Автореф. докт. дис. Ин-т физики Земли. М., 1983.
4. Лобацкая Р. М. О дискретности внутренней структуры разрывных нарушений. В кн.: Экспериментальная тектоника в решении задач теоретической и практической геологии. Новосибирск: ИГиГ, 1982.
5. Ризниченко Ю. В. Сейсмичность и тектоника. — В кн.: Развитие идей Г. А. Габурцева в геофизике. М.: Наука, 1982.
6. Сейсмический риск и инженерные решения. — М.: Недра, 1981.
7. Соболев Г. А. Предвестники землетрясения и условия лабораторного эксперимента. — Изв. АН СССР. Серия физика Земли, 1980, № 12.
8. Шамина О. Г. Модельные исследования физики очага землетрясения. — М.: Наука, 1981.
9. Шерман С. И. Физические закономерности развития разломов в земной коре. Новосибирск: Наука, 1977.
10. Шерман С. И., Борняков С. А., Буддо В. Ю. Области динамического влияния разломов (результаты моделирования). — Новосибирск: Наука, 1983.
11. Brune Y. N. Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes. — J. Geophys. Res., 1970, v. 75.
12. Brune Y. N. Earthquake modelling by stick-slip along pre-cut surfaces in stressed foam rubber. — Bull. Seismol. Soc. Amer., 1973, v. 63, p. 2105.
13. Lockett Y. M., Kuznir N. Y. Ductile shear zones: some aspects of constant slip velocity and constant shear stress models. — Geophys. J. Roy. Astron. Soc., 1982, v. 70, p. 2.

Институт Земной коры СО АН СССР
Иркутск

Поступила в редакцию
25 мая 1984 г.

S. I. Sherman, S. A. Bornjakov, V. Yu. Buddo,
V. A. Truskov, A. A. Babichev

MODELLING THE MECHANISM OF THE FORMATION
OF SEISMIC FAULTING IN ELASTIC-VISCOUS MEDIUM

Well-grounded is the possibility of modelling the areas of earthquakes preparation on elastic-viscous materials taking account of morphologogenetic types of faults. Experimental data on the width and shape of areas of preparing the earthquakes, the migrations of intensive strain zones within their limits, the connection of the acoustic emission of faulting and the stage of fault development are presented. There is a number of problems that may be solved by modelling on elastic-viscous materials.

УДК 552.333.5 : 551.735(571.36)

А. И. СТАРНИКОВ, К. Б. ХАЙЗНИКОВА

РАННЕКАМЕННОУГОЛЬНЫЕ БАЗАЛЬТЫ ХРЕБТА СЕТТЕ-ДАБАН

(Южное Верхоянье)

Приведены данные об угловом несогласии между отложениями среднего девона и нижнего карбона в бассейне р. Тыры. По остаткам табулят определен раннекаменноугольный возраст отложений, вмещающих два тела базальтовых порфиритов. Установлена интрузивная природа нижнего тела и лавовая верхнего. Сделан вывод о проявлении основного магматизма на всей территории Сетте-Дабана вплоть до раннего карбона и о возможности расширения перспективных площадей на поиски меди.

На проявление вулканизма и подводное излияние лав основного состава в Верхоянье в раннекаменноугольную эпоху впервые указала М. Д. Булгакова [1]. В дальнейшем на северо-западе Сетте-Дабана в вулканогенно-осадочной джалканской серии, датировавшей средним-верхним девонем [1, 7, 8], был установлен раннекаменноугольный возраст ее верхней части, включающей четвертый покров базальтовых порфиритов [2]. Однако до настоящего времени среди большинства исследователей распространено представление о завершении основного магматизма в регионе в предкаменноугольное время. В процессе изучения девонских — нижнекаменноугольных образований на сочленении Сетте-Дабанского горст-антиклинория и Южно-Верхоянского синклинория по р. Халыя (бассейн р. Тыры) нами, помимо ранее известного здесь магматического тела, считавшегося среднедевонским покровом [10], выявлено еще одно тело базальтовых порфиритов среди нижнекаменноугольных отложений.

Разрез, включающий тела базальтовых порфиритов, имеет следующее строение (снизу вверх):

I. Средний девон.

Загадочинская свита (D_2zg) — переслаивание темно-серых органогенных глинистых известняков с тонкоплитчатыми черными записованными известковистыми алевролитами. Из известняков определены табуляты *Thamnopora bublichenkoi* Dubat., *Alveolitella karmakensis* Tchern., *Crassialveolites crassus* Lec., *Placocoenites planus* Koksch. живетского возраста [11].

II. Нижний карбон.

1. Базальтовые порфириты. 30 м.

2. Известняки слабопесчаные, мраморизованные, мощностью 0,7 м. По простиранию известняки замещаются линзовидным пластом (до 2 м) конгломератов с мелкой галькой силурийских и девонских доломитов, известняков, базальтовых порфиритов.

3. Гравелиты темно-серые, кварцево-кремнистые, с известняково-доломитовым цементом. 3,5 м.

4. Доломиты зеленовато-серые, слабопесчаные, плитчатые и листоватые, горизонтально- и пологоволнисто-слоистые, реже массивные, с линзовидными прослоями черных и темно-серых глинистых известняков. Количество и мощность прослоев известняков нарастают вверх по разрезу. В этом слое у уреза воды (см. рисунок), в 6,5 м от его основания, найдены табуляты *Syringopora reticulata* Goldf., *S. sp.*, датирующие отложения раннекаменноугольным возрастом. 14 м.