

рушение образцов являлось заключительным этапом в общем многоэтапном процессе накопления трещин и их укрупнения посредством взаимодействия и слияния. Макроразрушение образца является аналогом динамического явления в горном массиве.

Анализ кинетики образования микротрещин по данным локации источников АЭ и амплитудно-частотный анализ сигналов АЭ позволяют выявить переход от стадии накопления микроразрушений по всему разрушаемому объему к макроразрушению.

В заключение следует отметить, что производственная служба сейсмоакустического контроля состояния горного массива и прогноза опасности динамических явлений регулярно действует на 67 угольных шахтах Донбасса, обслуживая более 400 производственных участков. Производственный прогноз пока ведется по появлению маловероятных всплесков активности АЭ. Дальнейшее совершенствование прогноза предполагается на путях использования таких параметров, как изменение наклонов накопленных траекторий АЭ, деформирование спектров импульсов и учет периодичности активности АЭ, что приведет к существенному повышению точности прогноза как по времени, так и по месту возможного возникновения динамического явления.

#### Литература

1. Инструкция по безопасному ведению горных работ на пластах, склонных к внезапным выбросам угля, породы и газа. М., 1977. С. 26—29; 116—119.
2. Горная геофизика//Тез. докл. Тбилиси, 1981.
3. Горная геофизика//Тез. докл. Тбилиси, 1983.
4. Анцыферов М. С. и др. Сейсмоакустические исследования и проблема прогноза динамических явлений. М., 1971.

УДК 53.082.4

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ СЕЙСМИЧНОСТИ РАЗЛОМОВ ЛИТОСФЕРЫ

*В. А. Трусков, С. И. Шерман*

Разломы земной коры контролируют широкую гамму геологических процессов, среди которых особая роль принадлежит сейсмичности. Сейсмичность, точнее упругие волны и подвижки, возникающие при деструкции верхней оболочки Земли и ощущаемые человеком как землетрясения, отражает динамику развития крупных разломов литосферы. Изучение динамики разломообразования в конкретном районе земного шара является к познанию некоторых за-

кономерностей сейсмического режима и, что наиболее важно, к прогнозу землетрясений.

В природной ситуации изучить развитие разломов трудно. Формирование крупного (длиною более 100 км) разрыва земной коры и литосферы длится от тысяч до миллионов лет. Прямыми методами получить данные о закономерностях развития этого процесса на всех стадиях и сопровождающих его землетрясениях человек не может. Для познания связей между динамикой развития разломов и сейсмическим режимом необходимо использовать физическое моделирование, позволяющее экспериментальным путем добыть интересующую нас информацию. Метод акустической эмиссии (АЭ) применен в подобных экспериментах с целью изучения акустического режима моделируемого разлома. Считается, что акустические импульсы, сопровождающие деформацию и разрушение модельного материала, соответствуют землетрясениям в природе [1].

В экспериментальной тектонике АЭ-метод применялся и применяется при моделировании очага землетрясения, формирующегося в упругой (хрупкой) среде. Поэтому на моделях исследовались в основном закономерности разрушения твердых, хрупких тел [1—5]. В настоящее время исследователи больше склоняются к идее, что сейсмический процесс отражает сейсмическое (тектоническое) течение горных масс [6]. Поведение горных пород приближается к закономерностям деформации упруговязкого или упруговязкопластичного тела. В нашем случае в качестве эквивалентного материала использовалась паста бурой глины. Она хорошо воспроизводит упруговязкопластичное поведение земной коры в масштабе геологического времени — сотни тысяч и миллионы лет — и отвечает требованиям критериев подобия, лежащих в основе эксперимента (критерий Рейнольдса  $\eta/\rho g l T = \text{idem}$ ) [7]. Здесь  $\eta$  — вязкость;  $\rho$  — плотность;  $l$  — линейные размеры;  $T$  — время;  $g$  — ускорение силы тяжести.

Эксперименты по моделированию тектонических структур на глинах широко проводились и проводятся в нашей стране [8—10] и за рубежом [11, 12]. Образованию тектонических структур (разрывов) сопутствует выделение упругой энергии — импульсов АЭ — в момент нарушения сплошности модели. Было сделано предположение, как отмечалось выше, что АЭ отражает основные черты сейсмического процесса, сопровождающего разломообразование. Изучение методом АЭ разрушения подобных материалов (рис. 1), насколько нам известно, ранее не проводилось.

Прямоугольная модель из глины вязкостью  $10^5$  Па·с, размерами  $1000 \times 350 \times 20$  мм подвергалась деформации среза при постоянной скорости деформирования  $6 \cdot 10^{-4}$  м/с. Срез соответствует одной из наиболее распространенных морфологогенетических разновидностей разрывов — разрывов сдвига. При проведении экспериментов использовались установки

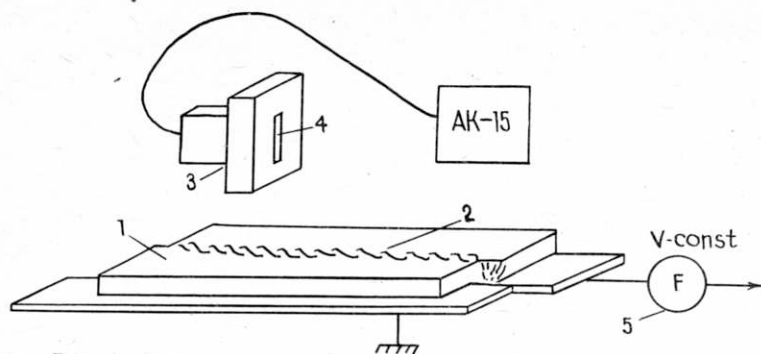


Рис. 1. Схема эксперимента: 1 — модель; 2 — зона разлома; 3 — футляр с микрофоном; 4 — прорезь (в рабочем положении датчика прорезь ориентирована по простиранию разломной зоны в 15 мм от нее); 5 — тензодинамометр

осуществляется через тросик, в разрыв которого включен тензодинамометр, фиксирующий изменение нагрузки на модели. Регистрация АЭ проводилась с помощью комплекса приборов для акустических исследований АК-15 производства ГДР, в полосе частот шириной 1/3 октавы с центральной частотой 12,5 кГц.

В связи с большим звукопоглощением модельного материала, обычно применяемые контактные датчики из пьезокерамики оказались непригодны. Использовался микрофонный датчик конденсаторного типа МК102 чувствительностью 53 мВ/Па. Он размещался в пенопластовом футляре с узкой прорезью, обеспечивающем направленность микрофона и защиту от посторонних шумов. Прорезь ориентировалась по простиранию в центральной части разломной зоны и имела длину 140 мм. Расстояние от модели до датчика составляло 80 мм.

Диапазон измерения сигналов АЭ по уровню звукового давления — 7—20 дБ. Нижняя граница определена уровнем помех в диапазоне регистрации, верхняя соответствует максимальным значениям принимаемых сигналов.

Для уменьшения влияния внешнего шума экспериментальная установка располагалась в звукоизолирующей камере, а полоса регистрируемых частот выбиралась после исследования спектрального состава шумов применяемой в работе аппаратуры.

Наибольший интерес, с нашей точки зрения, представляло распределение импульсов АЭ по времени в процессе разрушения. Импульсы с определенным уровнем дискриминации (7,5 дБ) подсчитывались в 10-секундных интервалах. Аппроксимирующая кривая этого распределения построена по полученным значениям методом Фурье-анализа по 14 гармоникам (рис. 2а). На рис. 2б показана кривая «нагрузка — деформация», по особенностям которой и ви-

зуальным наблюдениям структуры трещин на поверхности модели выделяются четыре основные стадии развития разлома [13]: I — предшествующая зарождению трещиноватости; II — зарождение и развитие мелкой трещиноватости (до начала прорастания магистрального разрыва); III — формирование магистрального разрыва; IV — трение берегов магистрального разрыва. Каждая из стадий в свою очередь состоит из отдельных этапов. Для нашего случая важны лишь этапы III стадии, определяемые по изменениям угла наклона кривой  $F(\epsilon)$ . Они соответствуют: 1) образованию связей между трещинами по всей длине разлома; 2) смятию и разрушению центров наибольшей раздробленности в зоне разлома; 3) «при-тирке» берегов разрыва.

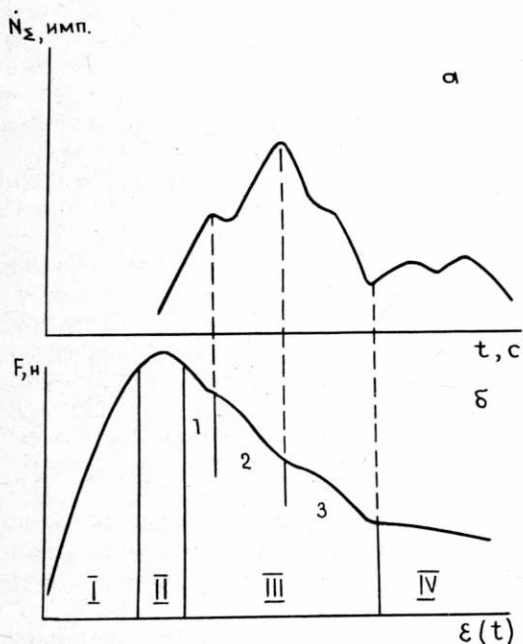


Рис. 2. Характеристика изменения активности АЭ (а) и нагрузки на модели (б) в ходе эксперимента

Сопоставление кривых (рис. 2) дает возможность сделать вывод о взаимосвязи АЭ со стадиями и этапами развития разлома. Графики изменения активности АЭ  $\dot{N}_z(T)$  в проведенных опытах незначительно отличаются друг от друга. Но гармоники  $\dot{N}_z(T)$ , отвечающие за время активизации АЭ, строго приурочены к определенным участкам кривой  $F(\epsilon)$ , которая является характерной для данного вида нагружения, скорости деформирования и вязкости (влажности) модельного материала. Следовательно, если исходить из предположения, что сигналы АЭ отражают сейсмический процесс моде-

лируемого разлома, то по данным АЭ мы можем судить о степени его сейсмической активности на разных этапах развития.

Анализ распределения импульсов АЭ во времени эксперимента для различных амплитуд показал, что процессу трения берегов разрыва, так же, как и другим этапам, свойственно излучение сильных импульсов порядка 18—20 дБ (рис. 3), несмотря на общее уменьшение их количества. Хотя на первый взгляд естественно было бы предположить, что проработанный разлом не способен генерировать сигналы больших величин. Сопоставление с природными данными показывает, что и к разломам земной коры, находящимся на сходной стадии развития, приурочены очаги крупных землетрясений. Это означает, что хорошо развитые в природе крупные разломы земной коры при активизации движений по ним представляют серьезную сейсмическую опасность.

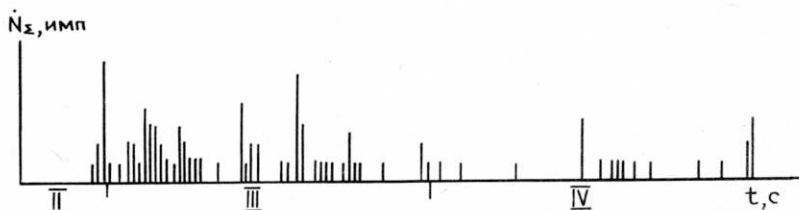


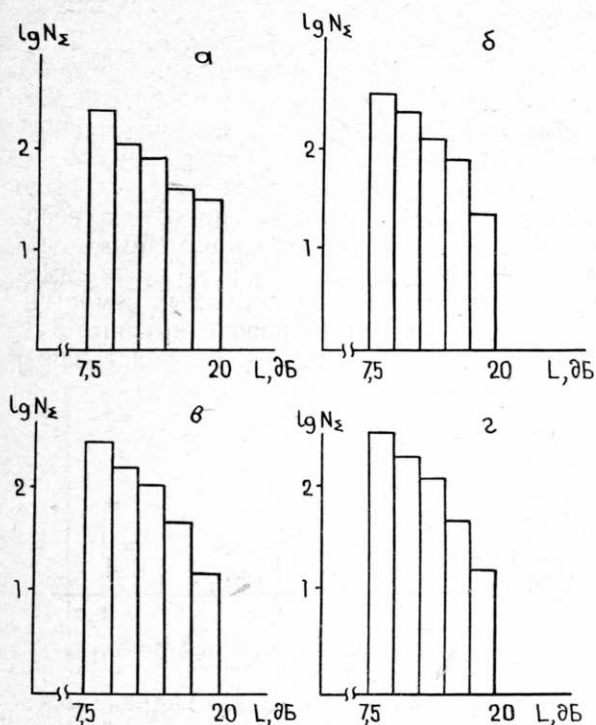
Рис. 3. Распределение импульсов АЭ с уровнем  $\geq 18$  дБ в 10-секундных интервалах; II—IV — стадии развития разлома

В качестве примера можно привести разлом Сан-Андреас в Калифорнии, представляющий собой типичный правосторонний сдвиг. За последние 100 лет в зоне этого разлома зарегистрировано несколько землетрясений в 8—9 баллов.

Проведен анализ распределения импульсов АЭ по амплитудам для различных стадий и этапов моделируемого разлома с целью выявления каких-либо тенденций изменения соотношения импульсов различных величин. При моделировании на хрупких материалах доля крупных импульсов увеличивается в ходе разрушения [5]. Для наших экспериментов результаты анализа показали постоянство искомых соотношений с небольшими вариациями от среднего значения (рис. 4), несмотря на то, что активность  $\dot{N}_\Sigma$  существенно меняется с развитием разлома.

Отмеченные закономерности свойственны и природным процессам. Чем больше величина сейсмоимпульсов, тем меньше их количество в общем фоне. Соотношение количества землетрясений различных энергий за определенный промежуток времени получило свое выражение в законе (графике) повторяемости. Тангенс угла наклона  $\gamma$  данного графика характеризуется удивительным постоянством и слабо изменяется при переходе от одного сейсмоактивного региона к другому.

Рис. 4. Соотношение количества импульсов в 5 уровнях градации области измерения уровня звукового давления для: а — II стадии и 1-го этапа III стадии; б, в — 2-го и 3-го этапов III стадии; г — IV стадии



Проведенное физическое моделирование позволяет изучать количественные закономерности АЭ, сопровождающей деформацию и разрушение упруговязкопластичного тела. Оно дает пока наиболее общие, качественные представления о сейсмических процессах, отражающих различные стадии развития крупных разломов литосферы. Тем не менее перспективность АЭ-метода применительно к изучению ряда длительно развивающихся геологических явлений не вызывает сомнений. Следует шире использовать и развивать этот метод для подобных исследований, одновременно проводя работы по сближению искусственно моделируемых и естественных природных процессов. Нет сомнения в том, что с помощью метода АЭ можно будет выявить закономерности излучения импульсов в зависимости от условий эксперимента и переходить к разработкам определенных практических рекомендаций.

#### Литература

1. Виноградов С. Душар. Исследование сейсмического режима при разрушении образцов. Душанбе, 1975.

2. Виноградов С. Д. Формирование излучения околодвигового разрыва// Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли. 1980. № 7.
3. Соболев Г. А. и др. Предвестники разрушения большого образца горной породы//Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли. 1982. № 8. С. 29—43.
4. Томашевская И. С., Хамидуллин Л. Н. Предвестники разрушения образцов горных пород//Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли. 1972. № 5.
5. Шамина О. Г. Упругие импульсы при разрушении образцов горных пород//Изв. АН СССР. Сер. геофиз. 1956. № 5.
6. Ризниченко Ю. В. О сейсмическом течении горных масс//Динамика земной коры. М., 1965.
7. Шерман С. И. и др. Области динамического влияния разломов (результаты моделирования). Новосибирск, 1983.
8. Гептнер Т. М. Моделирование трещин скалывания в условиях больших деформаций//Вестник МГУ. Сер. геол. 1970. № 4. С. 81—89.
9. Гзовский М. В. Основы тектонофизики. М., 1975.
10. Михайлова А. В., Осокина Д. Н. Изучение соотношений между характеристиками вертикальных перемещений поверхности и величиной деформации на глубине (на моделях)//Современные движения земной коры. Тарту, 1973. С. 589—594.
11. Cloos H. Zur Mechanik grosser Brüche und Gräben//Centrallblatt Mineral. Geol., Paläontol., Abt. B. 1932. N 6. S. 273—286.
12. Elmohandes S.-E. The central European Graben system: rifting imitated by clay modelling//Tectonophysics. 1981. V. 73. P. 69—78.
13. Трусков В. А., Буддо В. Ю. Экспериментальное исследование стадийности процесса образования среза//Экспериментальная тектоника в решении задач теоретической и практической геологии. Новосибирск, 1982. С. 65—66.