

Особенности разрушения гранита при различных условиях деформирования

© А.Г. Кадомцев, Е.Е. Дамаскинская, В.С. Куксенко

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,
Санкт-Петербург, Россия

E-mail: andrej.kadomtsev@mail.ioffe.ru.

(Поступила в Редакцию 21 февраля 2011 г.)

С привлечением метода регистрации сигналов акустической эмиссии исследуются механизмы разрушения сухих и водонасыщенных образцов гранита, а также скольжение (сдвиг) по готовому разлому. Установлено, что под действием механической нагрузки в сухих образцах наблюдается дисперсное дефектообразование, затем происходит локализация, образуется очаг разрушения, развитие которого приводит к формированию макроразрыва. В водонасыщенных образцах происходит хаотичное дефектообразование во всем объеме, которое приводит к высокой степени поврежденности материала. На завершающем этапе деформирования образуется несколько очаговых областей, в которых развиваются магистральные трещины. В случае скольжения по готовому разлому происходит разрушение стопоров, находящихся на берегах разлома.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 09-05-00639) и ФЦП (государственный контракт № 02.740.11.0315).

1. Введение

Работа посвящена исследованию влияния условий деформирования на процесс разрушения горных пород. Интерес к этой проблеме обусловлен тем, что в естественных условиях на горные породы действуют многие факторы, такие как всестороннее сжатие, поровое давление жидкости, давление лежащих выше пластов. Кроме того, во многих регионах земная кора рассечена многочисленными разломами, по которым может происходить сдвиг, и трещинами, которые являются концентраторами напряжений. Лабораторные эксперименты позволяют дифференцировать влияние каждого фактора на развитие разрушения.

В работе приведен анализ накопления дефектов в экспериментах трех типов: I — деформирование сухих образцов в условиях управляемого режима нагружения (т.е. на установке с обратной связью, при которой нагрузка зависит от скорости образования дефектов), II — деформирование водонасыщенных образцов, III — деформирование образцов, позволяющих моделировать скольжение по разлому (stick-slip).

Исследование закономерностей разрушения в условиях управляемого режима нагружения было детально проведено в [1,2]. В настоящей работе будут приведены некоторые результаты этих экспериментов, которые необходимы для прямого (непосредственного) сравнения с характером разрушения образцов при других условиях деформирования.

Известно, что проникновение жидкости в материал приводит к изменению его физико-механических свойств: изменяется скорость распространения P -волны, увеличивается объем, меняется электросопротивление, прочность [3–6]. Для объяснения этих явлений было

предложено несколько моделей [3,7]. В работе [5] показано, что техногенное воздействие, связанное с закачкой или извлечением жидкости из породного массива, оказывает значительное влияние на режим сейсмичности. Однако механизм влияния жидкости на прочность недостаточно изучен. В связи с этим в настоящей работе выполнены лабораторные исследования разрушения гранита, насыщенного водой, проведено сравнение характера разрушения сухого и водонасыщенного образцов, предложены возможные механизмы влияния воды на изменение механических свойств материала.

В массиве горных пород в условиях естественного залегания всегда присутствуют разломы, образованные в результате природной (сейсмической, вулканической и т.д.) или техногенной деятельности. При изменении напряженного состояния массива по этим разломам может произойти сдвиг. Многие крупные землетрясения, происходящие в зоне субдукции,¹ развивались по подобному механизму [8]. При моделировании в лабораторных условиях скольжение по готовому разлому принято называть stick-slip [9]. В настоящей работе проведены эксперименты по деформированию образцов, моделирующих stick-slip, которые позволят в дальнейшем сравнить результаты эксперимента с развитием очага землетрясения.

2. Материал и методика эксперимента

Во всех трех типах экспериментов на установке, позволяющей управлять деформацией и давлением

¹ Зона субдукции — линейная зона, вдоль которой происходит погружение одних блоков земной коры под другие.

воды (подробнее описано в [10]), подвергались нагружению цилиндрические образцы гранита Вестерли ($h = 190.5 \text{ mm}$, $d = 76.2 \text{ mm}$). Образцы деформировали в условиях постоянного всестороннего сжатия (давление $P_c = 50 \pm 0.2 \text{ MPa}$) и одноосного осевого нагружения (P_{ax}). В процессе эксперимента измерялись осевая нагрузка, продольная и поперечная деформации. Наблюдение за трещинообразованием проводилось с помощью регистрации сигналов акустической эмиссии (АЭ). Известно, что основным источником АЭ в горных породах являются образующиеся трещины [11] и существует связь между параметрами трещин и АЭ-сигналов [12]. Для регистрации сигналов АЭ, генерируемых в процессе нагружения, к образцу крепилась система из шести пьезоэлектрических преобразователей (резонансная частота 0.6 MHz). Точность определения координат гипоцентров источников АЭ составила $\approx 3 \text{ mm}$ во всем объеме образца для более чем 10^4 сигналов. В результате проведенного эксперимента формировалась база данных, которая представляет собой набор параметров хронологически последовательных сигналов АЭ. Каждый сигнал характеризовался временем излучения, тремя координатами гипоцентра и амплитудой A , приведенной к референс-сфере радиусом $R_f = 10 \text{ mm}$. Приведенная амплитуда является энергетической характеристикой сигнала.

3. Деформирование образцов в условиях управляемого режима нагружения

Особенность экспериментов типа I состоит в том, что изменение осевой нагрузки определялось параметрами процесса разрушения. Нагрузка изменялась таким образом, чтобы активность АЭ-сигналов с амплитудой выше пороговой не превышала заранее установленного уровня. В работе [10] показано, что такой режим позволил растянуть во времени обычно быстропротекающую очаговую стадию и детально исследовать ее.

На рис. 1 приведены XZ -проекции координат гипоцентров источников АЭ (по сути, это пространственное распределение образующихся трещин). Видно, что вначале дефекты образуются дисперсно (рис. 1, *a*). Затем наблюдается локализация, формируется очаг, развитие которого приводит к макроразрыву (рис. 1, *b*). Необходимо отметить, что такой вид распределений проекций гипоцентров получается при рассмотрении сигналов АЭ достаточно больших амплитуд, т. е. при анализе крупных дефектов [2].

Подробный анализ развития разрушения в экспериментах типа I был проведен ранее в работах [1,2]. Было установлено, что разрушение происходит по двухстадийному механизму [13] с образованием, как правило, одной магистральной трещины.

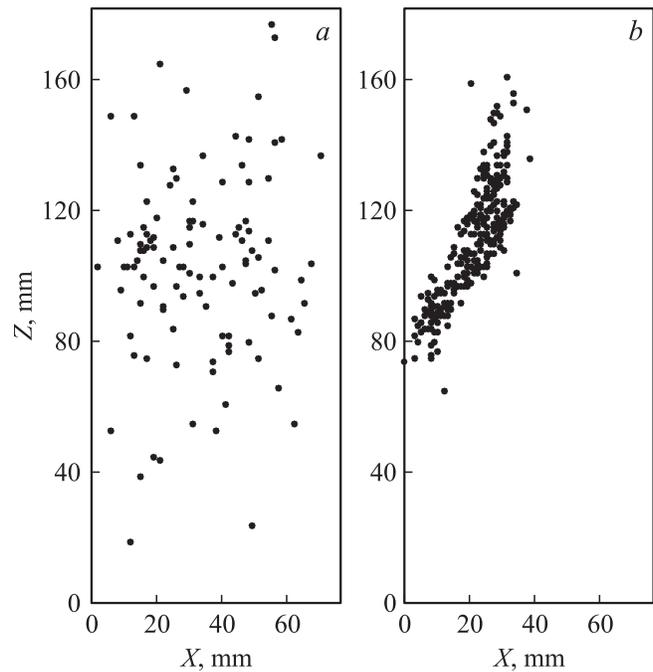


Рис. 1. Проекция координат гипоцентров источников АЭ. *a* — дисперсное разрушение (АЭ-сигналы, зарегистрированные в период времени от начала нагружения до 0.9 долговечности образца), *b* — локализованное разрушение, т. е. формирование очага и распространение макроразрыва (АЭ-сигналы, зарегистрированные в период времени от 0.9 долговечности вплоть до разрушения образца).

4. Деформирование водонасыщенных образцов

Для исследования роли воды в развитии разрушения использовался такой же образец как и в экспериментах, описанных выше, только полностью насыщенный водой. Образец деформировался в условиях всестороннего сжатия (давление 50 MPa), вода нагнеталась под давлением 1 MPa . Осевая деформация задавалась дискретными шагами, при этом измерялась осевая нагрузка [6].

Как видно из рис. 2, в момент ступенчатого увеличения нагрузки на образец наблюдались всплески активности АЭ. Представляло интерес проследить картину накопления дефектов в периоды времени, когда деформация и нагрузка оставались практически неизменными. Так же как и в работе [6], были выбраны два этапа (рис. 2): на I этапе ($87\,400\text{--}258\,500 \text{ s}$) нагрузка составляла 86% разрушающей, на II этапе ($258\,500\text{--}437\,300 \text{ s}$) — 95%. На рис. 3 показаны XZ -проекции гипоцентров АЭ-сигналов, соответствующие этим временным этапам.

Видно, что на протяжении этих этапов не наблюдалась локализация, образование дефектов происходило дисперсно (хаотично) во всем объеме образца. Подобное пространственное распределение наблюдалось как при анализе АЭ-сигналов всех амплитуд, так и при анализе сигналов с амплитудами выше пороговой. Важно, что

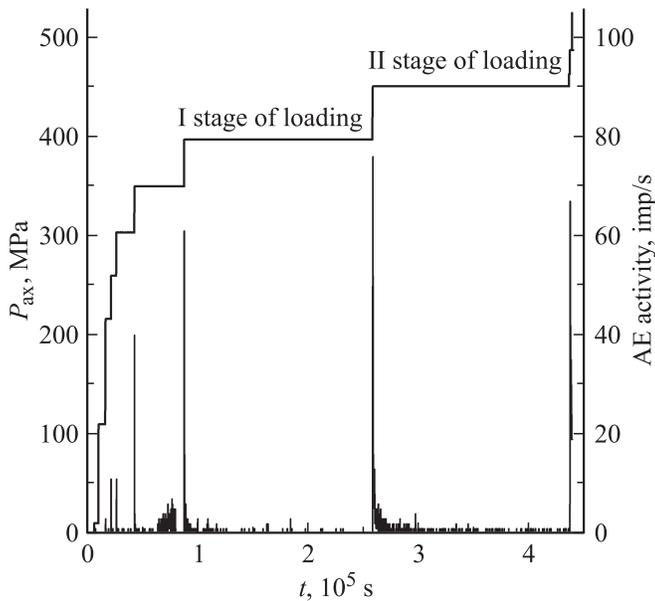


Рис. 2. Зависимости от времени осевого напряжения и активности АЭ при деформировании водонасыщенного образца.

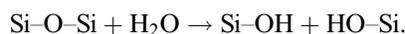
в этих экспериментах делокализованный характер разрушения наблюдался для любых амплитуд АЭ-сигналов, т. е. для любых размеров дефектов.

Только после последнего скачкообразного увеличения нагрузки в течение ≈ 100 s (что составляет $2 \cdot 10^{-4}$ от времени жизни образца) наблюдается образование нескольких областей повышенной концентрации дефектов, которые можно рассматривать как очаги разрушения. Причем такие области наиболее отчетливо видны при анализе не всех АЭ-сигналов, а только сигналов с достаточно большой амплитудой (крупные серые точки на рис. 3, *c*). Это можно интерпретировать как образование нескольких магистральных трещин, развитие которых привело к разрушению образца.

На основании экспериментов типа II можно сделать предположение о том, что роль воды состоит в следующем.

1) Вода заполняет все уже имеющиеся в материале до начала нагружения дефекты типа трещин, пор, капилляров. Эти дефекты распределены дисперсно по объему образца.

2) Как известно из [14], гидrolитический механизм значительно уменьшает энергию активации процесса разрушения. В работе показано, что молекулы воды принимают активное участие в гидrolитическом разрыве межatomных связей



При этом реакция гидролиза под влиянием внешнего напряжения идет даже при комнатной температуре. Энергия активации разрыва связи при таком процессе в ≈ 4 раза меньше, чем при чисто силовом, что облегчает процесс развития (укрупнения, слияния) имеющихся дефектов.

3) Видно, что лишь при резком увеличении деформации происходит образование трещин, что сопровождается значительным, но кратковременным увеличением активности АЭ (рис. 2).

4) Далее в условиях постоянной нагрузки происходит заполнение этих трещин водой, а их последующий рост также сопровождается выделением упругой энергии, однако ее уровень ниже порога регистрации нашей

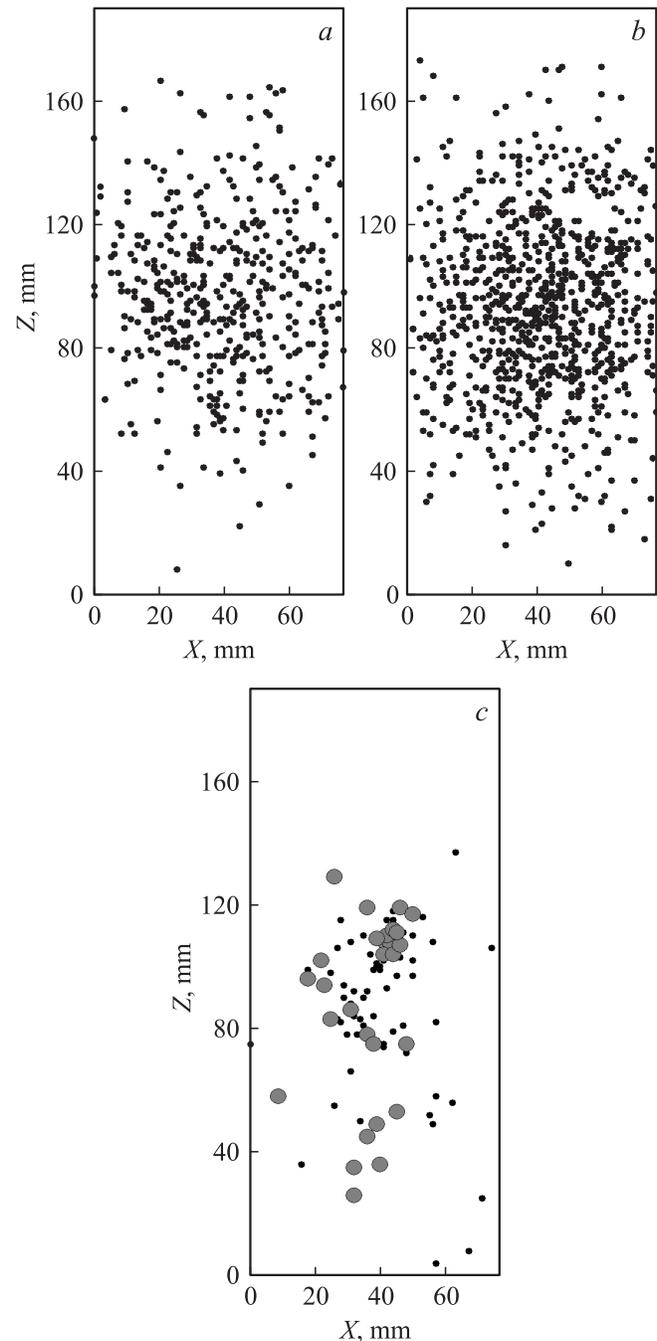


Рис. 3. Накопление дефектов в водонасыщенном образце. *a* — на этапе I деформирования; *b* — на этапе II деформирования; *c* — после последнего увеличения деформации. Нагрузки те же, что на рис. 2.

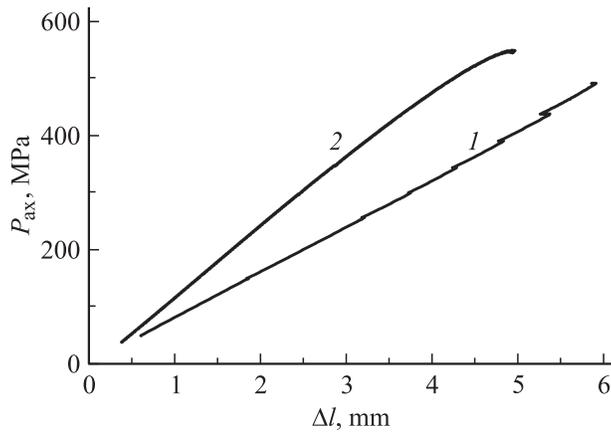


Рис. 4. Графики зависимости осевого напряжения от деформации. 1 — водонасыщенный образец, 2 — сухой образец.

АЭ-системы. Новые трещины в этот период времени, скорее всего, не образуются.

5) Расчет поля напряжений, проведенный с помощью метода конечных элементов, показал, что коэффициент перенапряжений (т.е. отношение локального напряжения к среднему) на поверхности дефекта, заполненного водой, меньше, чем на поверхности дефекта в сухом материале. Следовательно, взаимодействие трещин, которое определяется полем напряжений, в случае сухих и заполненных водой трещин различно.

6) В результате получаем сильно поврежденный материал, который разрушается при приложении меньшей нагрузки, чем в экспериментах с сухим образцом (рис. 4). (Как показано в [6], объем новых дефектов составил не менее 5% объема образца).

Таким образом, происходит изменение механизма разрушения. При развитии разрушения в водонасыщенных образцах роль дефектов, имеющихся до начала нагружения, оказывается существенной. Развитие заполненных водой трещин происходит при меньших напряжениях.

5. Деформирование образцов, позволяющих моделировать stick-slip

В традиционных экспериментах по исследованию stick-slip образец приготавливают в виде двух частей, плотно прижатых друг к другу [9]. Сдвиг происходит вдоль плоскости контакта, которая расположена под углом к осевой нагрузке. В настоящей работе условия для сдвига не были созданы заранее, а получились естественным образом при нагружении изначально целого образца.

Такая ситуация характерна для естественных условий разрушения горных пород (например, в зонах субдукции).

В экспериментах типа III образцы нагружались в условиях гидростатического давления (50 МПа) и одноосного

сжатия с постоянной скоростью деформации. На первом этапе эксперимента в целом образце под действием приложенной нагрузки образовался разлом. Об этом можно судить по резкому (почти в 4 раза: с 375 до 99 МПа) падению нагрузки и всплеску активности АЭ. На рис. 5 приведены XZ-проекции координат гипоцентров

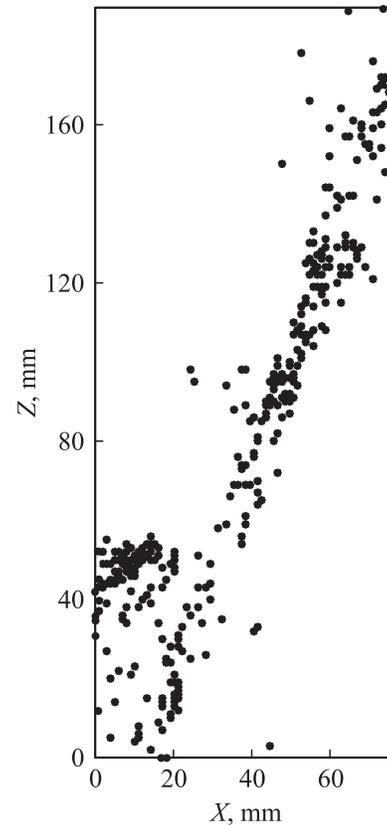


Рис. 5. XZ-проекции координат гипоцентров источников АЭ, зарегистрированных от начала нагружения до момента образования разлома.

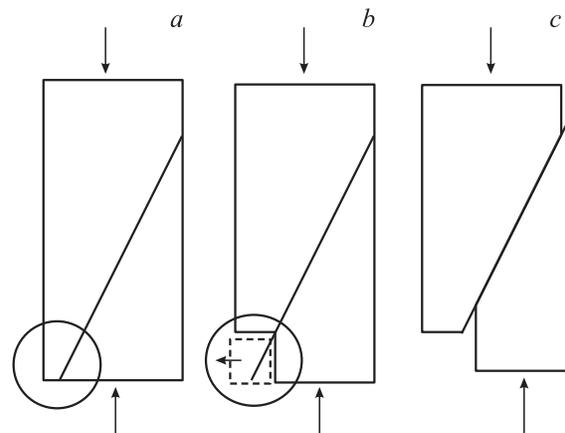


Рис. 6. Схема разлома в образце. a — образование разлома, b — отлом части образца, примыкающий к опоре нагружающего устройства; c — образование разлома, позволяющего моделировать stick-slip.

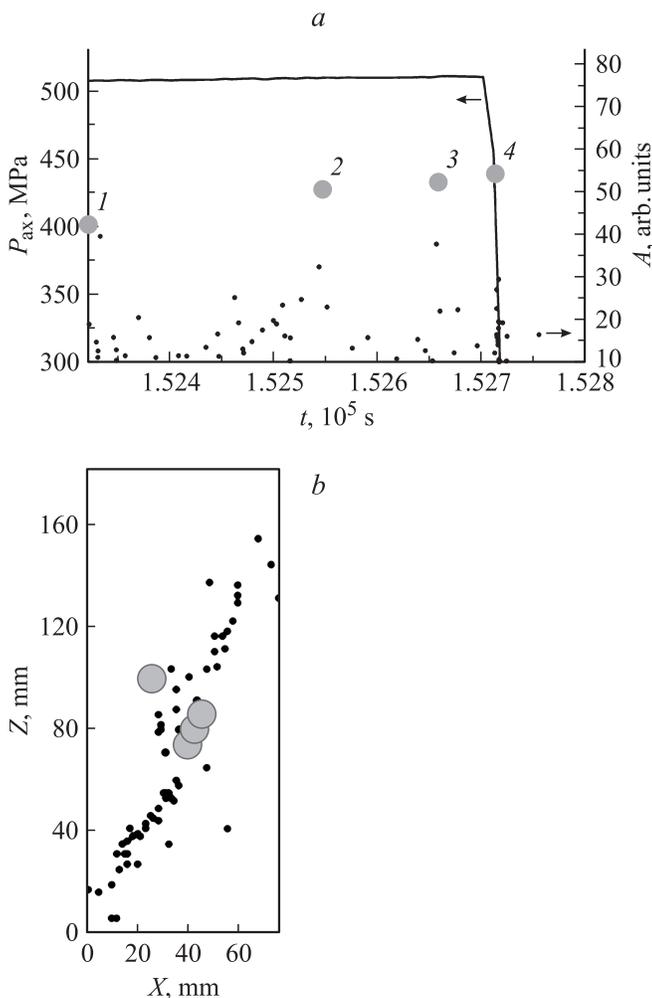


Рис. 7. Зависимости от времени осевого напряжения и амплитуды сигналов АЭ (а) и распределение координат гипоцентров источников этих же сигналов АЭ (b). Каждая точка соответствует одному АЭ-сигналу. Сигналы с большими амплитудами показаны серыми кружками.

тров источников АЭ, зарегистрированных в этот период. Видно, что плоскость разлома составляет угол $\approx 30^\circ$ с вертикалью. Схематично геометрия разлома показана на рис. 6, а. Если бы нагружение было продолжено в тех же условиях, то в скором времени образец распался бы на две части. Чтобы этого не произошло, гидростатическое давление было увеличено в 2 раза (до 100 МПа). На втором этапе под действием возрастающей осевой нагрузки произошло накопление дефектов и отлом нижней области образца, примыкающей к опоре нагружающего устройства (рис. 6, b). В результате разлом приобрел геометрию (рис. 6, c), которая позволила моделировать stick-slip, т.е. сдвиг одной части образца относительно другой.

Проанализируем детально развитие разрушения перед сдвигом по разлому. На рис. 7, а показано изменение осевого напряжения и амплитуды (A) сигналов АЭ непосредственно перед сдвигом. Пространственное распре-

ление этих же сигналов показано на рис. 7, b. Видно, что образование дефектов происходит вблизи зоны разлома. АЭ-сигнал с амплитудой 42 arb. units (что соответствует образованию крупного дефекта) зафиксирован в средней части образца, т.е. в той области, где возможен сдвиг. Этот сигнал отмечен серым кружком 1 на рис. 7, a, b. После этого в течение 4 min наблюдалось множественное образование относительно мелких (судя по амплитудам сигналов) дефектов. Следующие три АЭ-сигнала с большими амплитудами также происходили именно в области сдвига (серые кружки 2–4 на рис. 7, a).

Описанные высокоамплитудные АЭ-сигналы, скорее всего, относятся к разрушению последнего стопора, сдерживающего сдвиг. За время между этими событиями продолжалось деформирование образца, накапливалась упругая энергия, увеличивались напряжения. Когда напряжение достигло величины, достаточной для его разрушения, произошел stick-slip, на что указывает резкое падение нагрузки (рис. 7, a). При этом произошел всплеск активности АЭ, причем все сигналы были низкоамплитудные, т.е. происходило интенсивное разрушение материала в области сдвига.

Таким образом, при деформировании образца, имеющего разлом, происходит разрушение стопоров, находящихся на берегах разлома. Последовательность их разрушения определяется геометрией разлома и напряжением, необходимым для срыва стопора.

6. Заключение

Проведенные в работе исследования позволяют сделать следующие выводы.

1) При деформировании сухих изначально целых образцов разрушение развивается по двухстадийному механизму: дисперсное накопление дефектов, локализация и развитие, как правило, единственного очага.

2) При деформировании водонасыщенных образцов происходит изменение механизма разрушения. Наиболее существенным оказывается развитие дефектов, имеющих в образце до начала нагружения. Это приводит к хаотичному разрушению во всем объеме образца и высокой поврежденности материала. В результате происходит образование нескольких очаговых зон, в которых образуются магистральные трещины, приводящие к разрушению всего образца.

3) При разрушении по механизму stick-slip происходит разрушение стопоров, находящихся на берегах излома. Можно предположить, что часто наблюдаемое сейсмическое затишье связано с тем, что требуется время, в течение которого напряжения в земной коре достигнут величины, достаточной для разрушения последнего прочного стопора, сдерживающего сдвиг, который и является землетрясением. Поэтому для понимания развития таких процессов в земной коре необходима информация о геометрических характеристиках активных разломов.

Список литературы

- [1] Н.Г. Томилин, Е.Е. Дамаскинская, В.С. Куксенко. ФТТ **36**, 3101 (1994).
- [2] Н.Г. Томилин, Е.Е. Дамаскинская, П.И. Павлов. Физика земли **8**, 69 (2005).
- [3] С.Н. Scholz, L.R. Syke, Y.P. Aggarwal. Science **181**, 803 (1973).
- [4] Г.А. Соболев. Основы прогноза землетрясений. Наука, М. (1993). 313 с.
- [5] В.В. Адушкин, С.Б. Турунтаев. Техногенные процессы в земной коре (опасности и катастрофы). ИНЭК, М. (2005). 252 с.
- [6] S.A. Stanchits, D.A. Lockner, A.V. Ponomarev. Bull. Seismological Soc. Am. **93**, 1803 (2003).
- [7] P.M. Shearer. Introduction to seismology. University Press, Cambridge (1999). 260 p.
- [8] C.J. Ammon, H. Kanamori, T. Lay. Nature **451**, 561 (2008).
- [9] Г.А. Соболев, X. Шпетцлер, А.В. Кольцов, Т.Л. Челидзе. В сб.: Построение моделей развития сейсмического процесса и предвестников землетрясений / Под ред. Г.А. Соболева. М. (1993). С 38.
- [10] D.A. Lockner, J.D. Byerlee, V. Kuksenko, A. Ponomarev, A. Sidorin. In: Fault mechanics and transport properties of rocks / Eds B. Evans, T.-F. Wong. Academic Press, London (1992). P. 3.
- [11] В.И. Мячкин, Б.В. Костров, Г.А. Соболев, О.Г. Шамина. Изв. АН СССР. Физика Земли **10**, 2526 (1974).
- [12] В.С. Куксенко, А.И. Ляшков, К.М. Мирзоев, С.Х. Негматуллиев, С.А. Станчиц, Д.И. Фролов. ДАН СССР **264**, 846 (1982).
- [13] V. Kuksenko, N. Tomilin, E. Damaskinskaya, D. Lockner. Pure Appl. Geophys **146**, 253 (1996).
- [14] В.А. Берштейн, В.В. Никитин, В.А. Степанов, Л.М. Шамрей. ФТТ **15**, 3260 (1973).