

УДК 550.348.098

АКУСТИЧЕСКАЯ ЭМИССИЯ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ПРИМЕНЕНИЕ НОВОЙ МЕТОДИКИ С НЕВЗРЫВНОЙ РАЗРУШАЮЩЕЙ СМЕСЬЮ ПРИ РАЗРУШЕНИИ ОБРАЗЦОВ ГОРНОЙ ПОРОДЫ*

© 2009 г. Р.А. Лементуева, Н.Я. Бубнова

Институт физики Земли им. О.Ю.Шмидта РАН, г. Москва, Россия

Опробована методика разрушения образцов горных пород при нагружении с использованием прессы и невзрывной разрушающей смеси (НРС). Контроль над процессом разрушения осуществлялся с помощью акустического метода. Проведен сравнительный анализ по акустическим эмиссионным сигналам при образовании трещин отрыва и сдвига.

Ключевые слова: акустическая эмиссия (АЭ), нагружение, процесс разрушения, трещины отрыва и сдвига.

Введение

В связи с невозможностью проведения экспериментальных наблюдений на глубинах, где происходят процессы подготовки и реализации землетрясений, и отсутствием точных сведений о свойствах глубокозалегающих горных пород, большое внимание уделяется изучению вариаций естественных физических полей в лабораторных условиях [Соболев, Пономарев, 2003; Виноградов, 1989; Соболев, Лементуева, Гвоздев, 2005]. В частности, зависимость излучаемой энергии от времени позволяет по акустической эмиссии оценить стадию предразрушения.

Одно из направлений изучения формирования разрыва при моделировании на горных породах – постановка экспериментов на прессе [Соболев, Пономарев, 2003; Виноградов, 1989]. Экспериментаторы показали возможность анализа сдвиговых трещин по акустическим данным [Виноградов, 1989]. Однако проводимые на прессе исследования имеют ряд недостатков, так как разрушение происходит только за счет внешних сил, совершающих дополнительную работу при увеличивающихся деформациях. Таким образом, в стандартных экспериментальных условиях скорость разрушения фактически предопределяется нагружающим механизмом.

Важнейшая особенность процесса хрупкого разрушения природных массивов горных пород – то, что наблюдаемый процесс разрушения сопоставим со скоростью нагружения. Для исследования этой важной особенности природного процесса разрушения авторами была использована новая методика, основанная на применении невзрывной разрушающей смеси (НРС) [Ребецкий и др., 2005].

Экспериментальные исследования на образцах предполагают выбор формы и размера испытываемых моделей, а также отработку методики создания достаточно мощной нагрузки. Действие НРС, используемой для создания нагрузки, действующей на образец как снаружи, так и изнутри, эквивалентно действию жесткой нагружающей машины со скоростью нагружения много меньше скорости разрушения [Ребецкий и др., 2005].

* Статья публикуется в разделе “Дискуссия” по предложению редколлегии и с согласия авторов. Читатели приглашаются к обсуждению статьи на страницах нашего журнала.

Полученные материалы позволяют оценить характер разрушения по акустическим данным с использованием комплекса Aline32D [Дьяур и др., 2006].

Разрушение в реальных горных породах происходит не только (и не столько) за счет работы внешних сил, действующих на определенном этапе, но и за счет энергии упругих деформаций, накопленной в горных породах. Процесс подбора внешних условий нагружения образцов в экспериментах предварялся расчетами напряженного состояния с помощью комплекса UWAY [Ребецкий и др., 2005]. Расчеты показали возможность моделирования процесса разрушения образцов в обстановке, приближенной к процессу разрушения горных пород в природных условиях.

Используемое оборудование

Для исследования акустической эмиссии (АЭ) использовался специализированный измерительно-вычислительный комплекс Aline32D фирмы «Интерюнис», в комплект аппаратуры которого входят программно переключаемые фильтры низких и высоких частот приемных каналов в диапазоне от 10 кГц до 1 МГц.

На образце устанавливались четыре ультразвуковых пьезоэлектрических датчика типа GT300 для приема сигналов АЭ по каналам комплекса Aline32D (рис. 1, а, б).

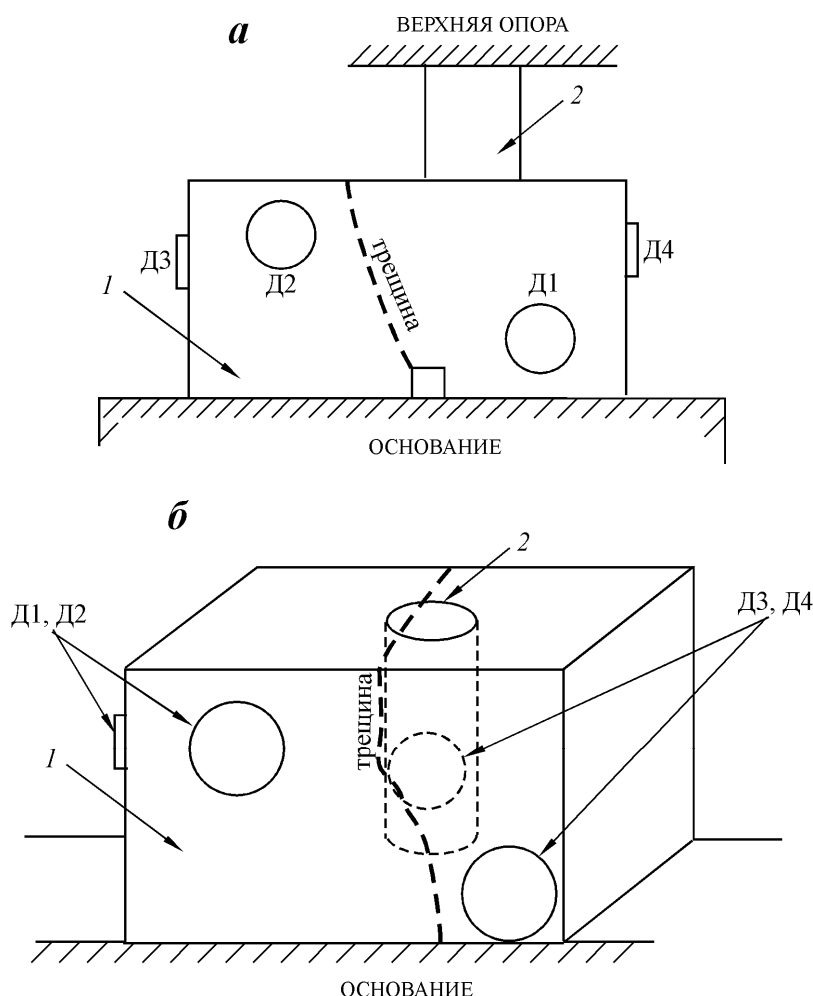


Рис. 1. Схема экспериментальной установки при опытах с внешним (а) и внутренним (б) нагружением образца

1 – образец, 2 – резервуар с НРС, Д1–Д4 – ультразвуковые пьезоэлектрические датчики

Описание эксперимента

В ходе испытаний разрушению подверглись образцы из мрамора, известняка, глинисто-песчаного композита. Продолжительность каждого из экспериментов составляла около двух суток. В настоящей статье обсуждаются результаты эксперимента на двух образцах мрамора – М1 и М2.

Нагружение образцов осуществлялось с помощью НРС – специальной цементной смеси, способной испытывать объемное расширение при реакции гидратации. Были разработаны приспособления, позволяющие создавать с помощью этой смеси не только внутреннее, но и внешнее нагружение, необходимое для образования трещин сдвига. Методика изучения трещин отрыва, создаваемых НРС, представлена в работе [Ребецкий и др., 2005].

Схема установки с образцом и расположенными на нем акустическими датчиками при изучении внешнего нагружения с помощью НРС приведена на рис. 1, а; схема эксперимента с внутренним нагружением – на рис. 1, б.

Уровень порогового значения акустического сигнала задан равным 40 дБ/мкВ. При осциллографическом контроле устанавливался претриггеринг 100 мкс, позволяющий наблюдать предысторию развития акустической эмиссии.

Разрушение образцов во времени происходило примерно одинаково (с учетом различия объемов НРС). Разрушение образца М1 (с образованием магистральной трещины в виде двух ветвей) началось через 40 ч после включения аппаратуры и завершилось по прошествии примерно 5.5 ч; разрушение образца М2 началось через 14 ч и завершилось через 3.5 ч. Основной интенсивный поток сигналов акустической эмиссии отмечался двумя всплесками, соответствующими началу и концу образования магистральных трещин.

Результаты приема и обработки данных акустических эмиссионных событий средствами системы Aline32D

В процессе эксперимента было установлено, что период разрушения образца магистральной трещиной может быть разделен на четыре временных интервала (П1–П4).

Интервал П1 – образование магистральной трещины – непосредственно примыкает к начальному моменту разрушения. Это период нарастания нагрузки от уровня, при котором акустические эмиссионные сигналы начинают регистрироваться аппаратурой Aline32, до момента начала образования магистральной трещины.

Интервал П2 (очень короткий) – интенсивное развитие магистральной трещины.

Интервал П3 – период замедленного по сравнению с периодом начального интенсивного развития магистральной трещины разрушения образца. В конце интервала отмечается всплеск интенсивности акустической эмиссии, обусловленный завершением образования магистральной трещины.

Последний интервал П4 соответствует дальнейшему разрушению образца; образец перестает существовать как единый блок.

С учетом скорости распространения акустических событий в мраморе, равной 5.1 мм/мкс, оценено местоположение источников акустических эмиссионных сигналов, относящихся к началу интервала П1: источник расположен в верхней части образца вблизи начала образующейся магистральной трещины.

График накопления акустических эмиссионных сигналов во времени на разных этапах разрушения образца М1 приведен на рис. 2, а.

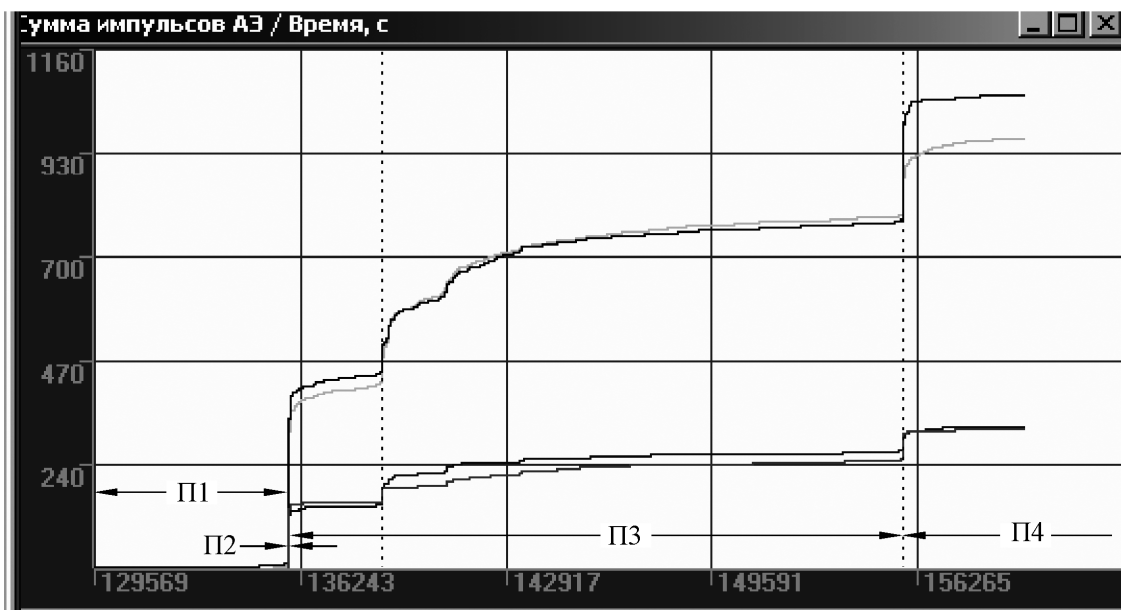
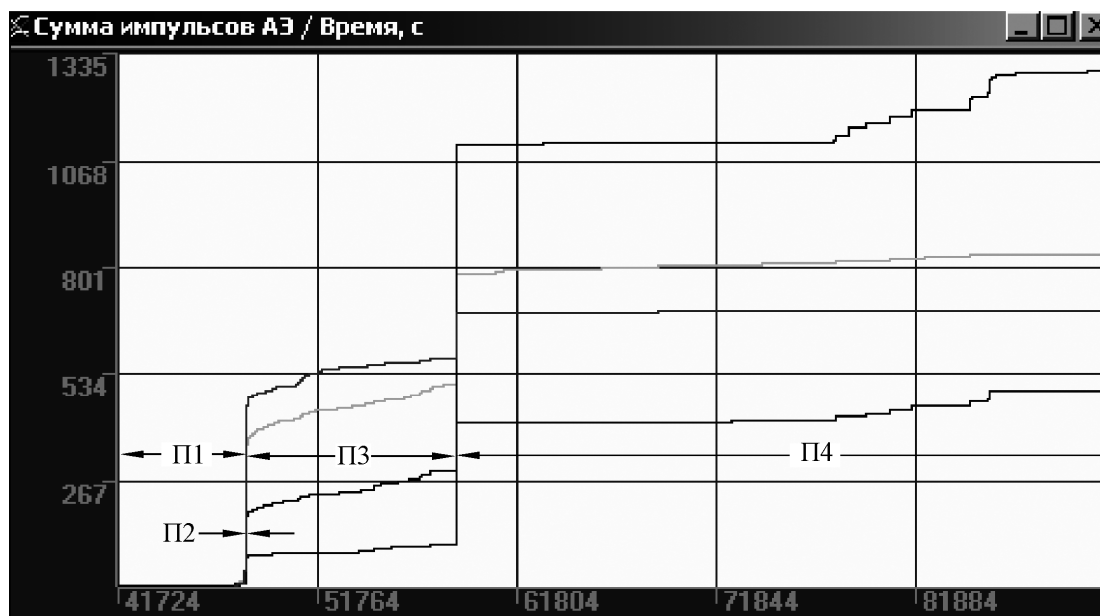
а*б*

Рис. 2. Накопление импульсов акустической эмиссии для двух образцов: *а* – образец М1 (мрамор); *б* – образец М2 (мрамор). Для обоих образцов П1–П4 – периоды их разрушения

При проведении эксперимента на образце М2 был использован бóльший объем НРС, вследствие чего разрушение образца проходило более форсированно, чем в первом случае. График накопления импульсов акустической эмиссии при разрушении образца М2 приведен на рис. 2, *б*. Датчик Д2 располагался в верхней части образца.

В ходе эксперимента регистрировалось накопление импульсов акустической эмиссии и записывались осциллограммы сигналов АЭ. Помимо энергии сигналов фиксировались их продолжительность и фазы вступления колебаний.

При микроразрушениях, создающих в образце волну растяжения, акустические датчики регистрируют колебания, фаза вступления которых положительна (рис. 3).

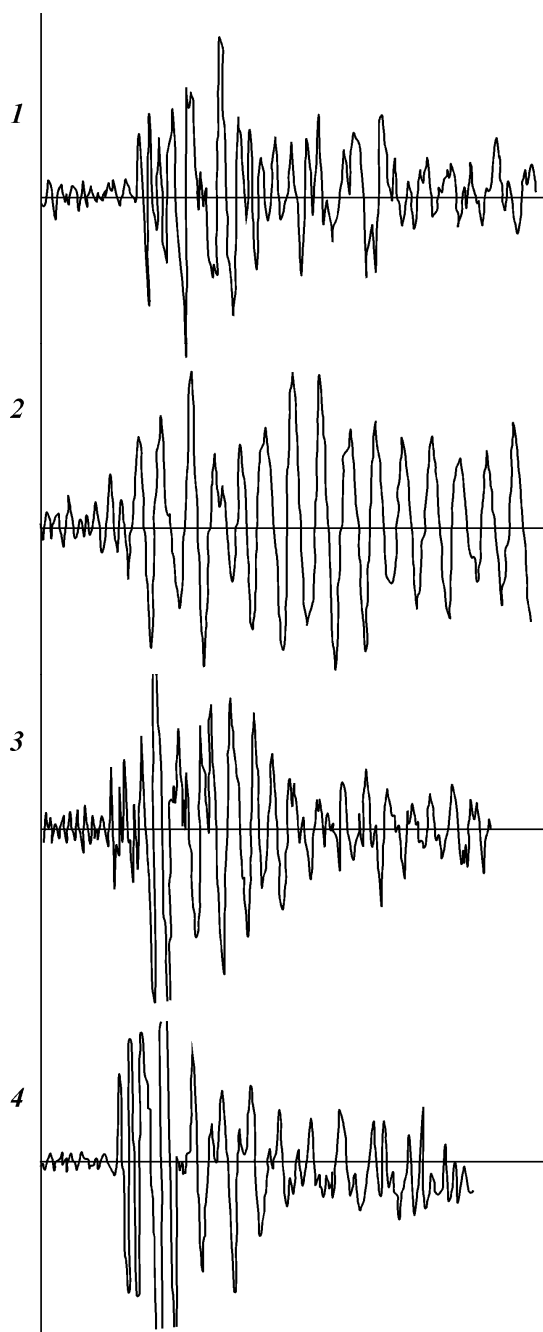


Рис. 3. Осциллограммы акустических эмиссионных сигналов на начальном временном интервале разрушения, зарегистрированные четырьмя датчиками (1–4). Первые положительные фазы вступления колебаний соответствуют фронту волны растяжения

Волны сжатия регистрируются датчиками как сигналы с отрицательной фазой вступления. Предполагалось, что информативной является фаза вступления первых сигналов акустической эмиссии, которая позволяет уточнить характер магистральной трещины и установить, является она трещиной сдвига или отрыва.

В проведенных авторами экспериментах на интервалах, предшествующих началу активного разрушения образца, три из четырех датчиков фиксировали акустические сигналы, имеющие отрицательные фазы вступления колебаний. Акустические сигналы (как с положительной, так и с отрицательной фазой вступления колебаний), уровень которых превышал установленный порог, наблюдались в периоды активного разрушения образцов.

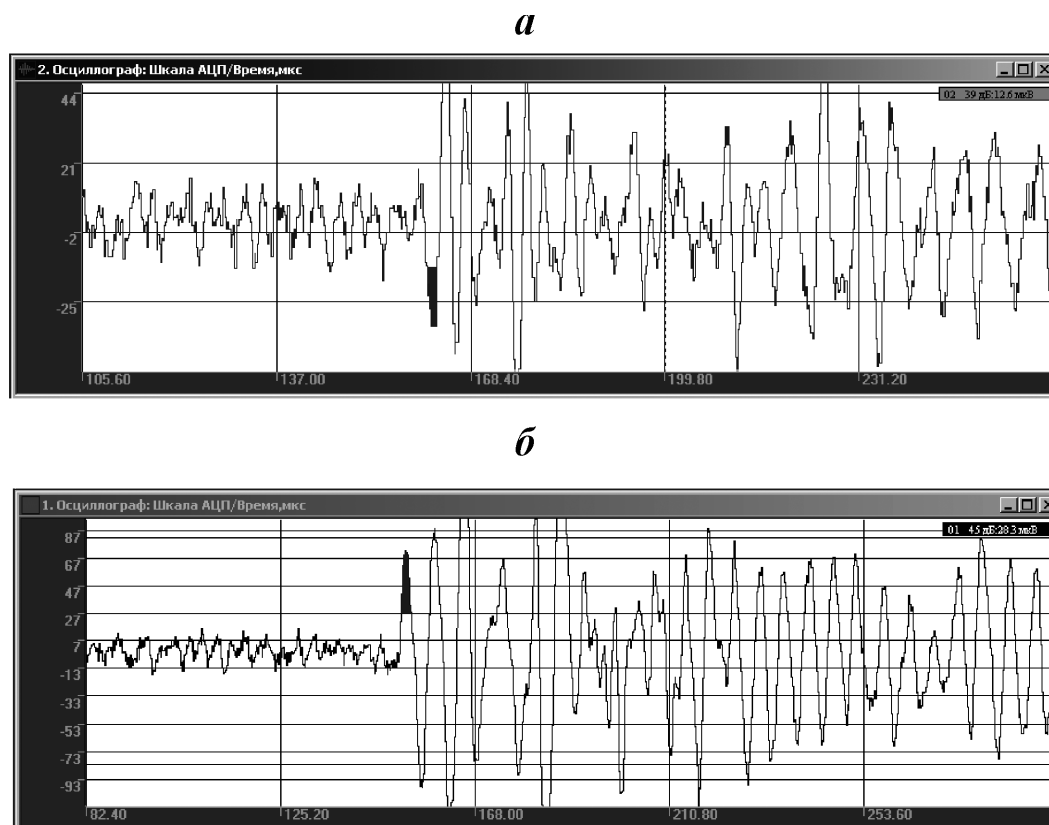


Рис. 4. Осциллограммы сигналов датчиков Д1 (а) и Д2 (б). Отмечены отрицательные и положительные фазы первых вступлений, соответствующие областям сжатия (а) и растяжения (б)

В наших экспериментах с применением НРС один из датчиков – Д1 – был размещен в области вероятного сжатия, другой – Д2 – в области вероятного растяжения (см. рис. 1, а). На рис. 4 приведены осциллограммы сигналов, зафиксированных этими датчиками. Отметим, что фазы вступления сигналов аналогичны полученным в экспериментах С.Д. Виноградова [Виноградов, 1989], т.е. сигналам, излучаемым трещиной сдвига, образующейся в средней или нижней частях образца. Для датчиков, расположенных в нижней части, более характерны волны сжатия, при которых регистрируются отрицательные фазы вступления сигнала. Акустические сигналы при разрушении второго образца были аналогичны по форме и интенсивности сигналам первого эксперимента.

В работах [Виноградов, 1989; Виноградов, Луцкий, Терентьев, 2005] показано, что при изучении поведения трещины сдвига диаграмма направленности продольных волн в пространстве, окружающем источник сигналов АЭ, имеет четыре лепестка с чередующимися фазами вступления ударной волны сжатия и растяжения. Акустические датчики, размещенные соответствующим образом на образце, воспримут эти сигналы в виде колебаний соответственно с отрицательной и положительной фазами вступления. Распределение фаз сигналов, приходящих на входы приемных каналов системы, позволяет судить о характере вероятного источника упругих колебаний (сдвиг или отрыв), а также о пространственном направлении развития трещины.

Сравнивая записи сигналов АЭ, сделанные в ходе эксперимента при формировании трещин отрыва, с полученными при моделировании в результате сдвига [Дьяур и др., 2006], можно отметить их существенные различия. Так, при разрушениях в результате сдвига зависимость накопленного числа сигналов во времени имеет скачкообразный характер.



Начало развития трещин отрыва

Рис. 5. Накопление числа акустических эмиссионных сигналов при реализации разрушения, связанного с отрывом

Напротив, разрушению, связанному с отрывом, свойственен плавный рост зависимости накопления сигналов (рис. 5). Интенсивность потока событий в области образования первой магистральной трещины в этом случае почти на порядок ниже.

Выводы

1. При проведении лабораторных экспериментов использована методика создания трещин на образцах с применением невзрывной разрушающей смеси (НРС); предположительно получены трещины отрыва и сдвига.

2. Начальному интервалу формирования трещин сдвига соответствуют первые положительные фазы акустической эмиссии, характерные для фронта волны растяжения. Сделана попытка сравнения акустических данных, наблюдаемых при возникновении трещин отрыва и сдвига средствами одной и той же измерительной аппаратуры.

3. Из рассмотрения накопленных акустических эмиссионных сигналов следует, что сдвигу, по-видимому, предшествует краткий момент образования отрывной трещины, и это необходимо учитывать при анализе результатов.

4. При сдвиговых разрушениях зависимость накопления сигналов АЭ носит скачкообразный характер; отрывному разрушению свойственны зависимости накопления сигналов с плавным характером нарастания.

Целесообразно проведение дальнейших исследований для выработки критерия классификации характера разрушений в исследуемых условиях с применением детального тензометрического контроля напряженного состояния.

Литература

Виноградов С.Д. Акустический метод в исследованиях по физике землетрясений. М.: Наука, 1989. 175 с.

Виноградов С.Д., Луцкий В.А., Терентьев В.А. Опыт регистрации с помощью системы Аline32D нагрузки, смещений берегов разрыва и акустических сигналов // Сейсм. приборы. 2005. Вып. 41. С.36–39.

Дьяур Н.И., Ребецкий Ю.Л., Луцкий В.А., Майбук З.-Ю.Я., Михайлова А.В., Бубнова Н.Я. Исследование развития трещин сдвига на моделях горных пород // Материалы VII международной конференции “Физико-химические и петрографические исследования в науках о Земле”, Борок, 25–26 сент. 2006 г. М.: ИФЗ РАН, 2006. С.24–25.

Ребецкий Ю.Л., Лементуева Р.А., Дьяур Н.И., Михайлова А.В. Соподчиненность микроструктурных деформаций и хрупкого макроразрушения // Докл. РАН. 2005. Т. 403, № 2. С.253–257.

Соболев Г.А., Пономарев А.В. Физика землетрясений и предвестники. М.: Наука, 2003. 54 с.

Соболев Г.А., Лементуева Р.А., Гвоздев А.А. Динамика механоэлектрических параметров в образцах горных пород при внутреннем источнике упругих напряжений // Геофизические исследования. М.: ОИФЗ РАН, 2005. С.5–9.

Сведения об авторах

ЛЕМЕНТУЕВА Рита Ануфриевна – старший научный сотрудник, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН. 123995, ГСП-5, Москва, Д-242, ул. Большая Грузинская, д. 10. Тел.: 254-23-30.

БУБНОВА Наталья Яковлевна – старший научный сотрудник, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН. 123995, ГСП-5, Москва, Д-242, ул. Большая Грузинская, д. 10. Тел.: 254-23-38.

ACOUSTIC ISSUE AND EXPERIMENTAL APPLICATION OF A NEW TECHNIQUE WITH HPC AT DESTRUCTION OF SAMPLES OF ROCK

R.A. Lementueva, N.J. Bubnova

Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Abstract. The technique on destruction of samples of rocks is tested at loading with the use of a press and not explosive destroying mix. The control over destruction process was carried out by means of an acoustic method. The comparative analysis on the acoustic signals is carried out during formation of cracks of a separation and shift.

Keywords: deformation, destruction of samples of rocks, acoustic method, separation and shift cracks.