

Триггерный эффект слабых вибраций в твердых телах (горных породах)

© В.С. Куксенко*, Б.Ц. Манжиков, К. Тилегенов, Ж.К. Шатемиров, Б.Э. Эмильбеков

* Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,
194021 Санкт-Петербург, Россия

Институт физики и механики горных пород Национальной академии наук Киргизии,
Бишкек, Киргизия

E-mail: victor.kuksenko@mail.ioffe.ru

(Поступила в Редакцию 26 февраля 2003 г.
В окончательной редакции 5 мая 2003 г.)

Исследовалось воздействие слабых низкочастотных вибраций на процесс микроразрушения. Образцы цилиндрической формы из горных пород подвергались одноосному сжатию, в процессе которого на них периодически воздействовали слабыми по сравнению с сжимающей нагрузкой низкочастотными вибрациями. Непрерывно измерялась акустическая эмиссия. Обнаружено резкое увеличение акустической эмиссии при воздействии вибрации в течение короткого времени (100–200 с) после некоторого запаздывания. Дано объяснение этим эффектам с позиции концентрационного критерия формирования и развития очага разрушения.

Работа поддержана грантами Российского фонда фундаментальных исследований № 01-05-64893, 02-05-08003, 02-05-39017, а также грантом Американского фонда гражданских исследований и развития для государств бывшего СССР N YGI-2316 BI-02 и грантом МНТЦ № 1745.

Нагруженные твердые тела различной природы обладают заметной неоднородностью деформирования и микроразрушения (вплоть до скачкообразных проявлений) даже при действии постоянных нагрузок [1,2]. Особенно это проявляется при вибрационных воздействиях [3]. Обобщности этих проявлений свидетельствуют многочисленные примеры инициирующего воздействия импульсных нагрузок на сход снежных лавин, обвалов, оползней, землетрясений [4,5], а также результаты специальных исследований влияния вибраций на ход деформационных процессов. Деформационные проявления вибросочувствительности горных пород исследовались в [6,7]. Было выявлено скачкообразное аномальное изменение величин деформаций и их скоростей во время действия вибраций на нагруженные образцы материалов естественного и искусственного происхождения, имеющих как аморфное, так и кристаллическое строение. Аномальность деформационного процесса заключалась в резком скачке деформации в начальный момент вибраций и обратном скачке после их прекращения. Во время вибровоздействий возрастала и скорость деформирования. Характеристики деформирования после прекращения вибраций оказывались такими, как если бы вибраций не было совсем [7]. В момент включения вибраций отмечалось существенное снижение уровня акустической эмиссии (АЭ) по сравнению с периодом деформирования образца без вибрации. После выключения вибраций с началом восстановления деформационных характеристик отмечалось увеличение числа акустических импульсов до прежнего уровня [7].

Импульсное воздействие (удары сосредоточенной нагрузкой) на процесс неустойчивого сдвига (stick-slip) исследовалось в [8,9]. В этих работах наблюдалась задержка реакции нагруженных моделей на ударные

нагрузки и вибрации. Задержка и последствие АЭ наблюдались также в наших работах [10]. Однако, как показал приведенный выше обзор литературы, вопрос об инициирующем воздействии слабых низкочастотных вибраций на процесс деформирования нагруженных геоматериалов в связи с задачами активного воздействия на очаги концентрации напряжений и оценкой устойчивости механических систем пока остается открытым.

В связи с этим в настоящей работе исследовался режим АЭ в образцах горных пород, находящихся в условиях одноосного сжатия постоянной нагрузкой, при наличии слабых низкочастотных вибраций и без таковых. Основное внимание уделялось изучению АЭ на начальной стадии вибросеанса, когда проявлялись триггерные эффекты вибровоздействий.

1. Методика эксперимента

Исследовались три разновидности горных пород, отобранных на месторождениях Киргизии: Каиндинский (К) и Сары-Джазский (СД) граниты и Чычканский мрамор (ЧМ). Образцы правильной цилиндрической формы высотой 60 мм и диаметром 30 мм подвергались одноосному сжатию на пружинном реологическом прессе, обеспечивающем постоянство нагрузки в течение длительного времени. Общая продолжительность испытаний одного образца составляла 25–40 суток. В настоящей работе представлены данные по трем образцам. Образец К нагружался ступенчато до разрушения. Фиксированные уровни нагрузки составляла 80, 100, 114, 136 и 143 МПа. Во время очередного увеличения нагрузки образец разрушился. Остальные образцы до разрушения не доводились. Уровни нагрузки для образ-

ца СД составляли 22, 29, 36 и 38 МПа, образцы ЧМ испытывались при 29, 43 и 57 МПа.

Продолжительность испытаний при каждом уровне нагрузки составляла несколько суток. В течение этого времени для изучения влияния вибраций проводилось несколько вибросеансов, которые чередовались с обычным нагружением образцов без вибровоздействий. Обычно вибросеансы проводились в дневное время суток, а ночью эксперимент продолжался без вибраций. Источником вибраций служил маломощный пятилопастный вентилятор с частотой вращения 2400 оборотов в минуту (40 Hz), расположенный на верхней траверзе прессы, через которую вибрации передавались образцу. Давление в воздушном потоке, создаваемом вентилятором, изменялось с частотой 200 Hz. Амплитуда вибраций была около $1 \mu\text{m}$.

Во время всех экспериментальных сеансов регистрировались АЭ и параметры макродеформации образца. Датчиком АЭ служил широкополосный демпфированный пьезоприемник с активным элементом из пьезокерамики ЦТС-19. Коэффициент усиления тракта АЭ составлял ~ 2000 , время задержки аппаратуры было $\sim 1 \text{ms}$. Для уменьшения помех отбор регистрируемых событий производился по амплитудному признаку. Порог амплитудной дискриминации выбирался выше уровня шумов и вибраций от вентилятора. Накопление и обработка экспериментальных данных осуществлялись с помощью компьютера. Аппаратура работала в ждущем режиме. Запуск программного цикла регистрации происходил по приходу очередного события АЭ, удовлетворяющего условиям отбора. Каждое событие описывалось шестью параметрами, включая текущее время от начала экспериментального сеанса. В одном сеансе регистрировалось от 10^2 до 10^5 акустических сигналов. Статистическая обработка данных производилась скользящей выборкой постоянного объема (32 события) со сдвигом в одно событие. Текущей выборке присваивалось время последнего события, входящего в данную выборку.

2. Результаты эксперимента

Всего было проведено 55 обычных экспериментальных сеансов и 57 вибросеансов. Выявленное ранее [10] отличие АЭ во время вибросеанса от АЭ, характерной для обычного режима деформирования, заключалось в увеличении числа сигналов с малыми амплитудами во время вибросеанса, возникновение которых происходило преимущественно синхронно вибровоздействию. Обычно активность АЭ во время вибросеанса в несколько раз превышает уровень активности в сеансе без вибраций. Однако наиболее существенные особенности режима АЭ обнаруживаются на начальной стадии вибросеансов. Если при обычном сеансе характер АЭ слабо меняется на протяжении всего сеанса, то в начале вибросеанса, как правило, наблюдается всплеск АЭ, за которым следует достаточно глубокий ее спад, после чего устанавливается фоновый режим АЭ, характерный

для остальной части вибросеанса. Типичные временные последовательности АЭ для обычного сеанса испытаний и вибросеанса показаны на рис. 1. Все вибросеансы условно можно подразделить на три группы, которым соответствовали различные сценарии начальной стадии. К первой группе относятся вибросеансы, начало которых проходило без заметной активизации АЭ. Их доля от общего числа составляет около 10%. Ко второй группе принадлежат вибросеансы, которые начинаются сразу с резкой активизации АЭ без какой-либо ее задержки. Таких сеансов обычно около 25% от общего числа. К третьей группе относится большинство вибросеансов, для которых начальная активизация АЭ происходила с некоторой временной задержкой относительно начала вибровоздействий. Параметры для второй и третьей групп показаны на рис. 2 и 3 в увеличенном масштабе.

3. Обсуждение

Всплеск АЭ в начале вибросеансов на представленных зависимостях обусловлен, скорее всего, триггерным эффектом вибровоздействий на напряженную среду. Видно, что начальный всплеск АЭ существенно превышает фоновый уровень АЭ, который характерен для остального времени вибросеанса. Аномальная активизация имеет довольно сложную структуру из нескольких чередующихся коротких активизаций и спадов активности АЭ, которые, вероятнее всего, обусловлены срабатыванием в образце отдельных участков, имеющих различную степень „готовности“ к началу вибровоздействий. Под степенью готовности локального объема будем понимать наличие в нем напряжений, сопоставимых с прочностью материала в данном месте, и относительно высокой концентрации дефектов, достаточной для образования дефектов более высокого структурного уровня, возникновение которых сопровождается излучением акустического сигнала с амплитудой, превышающей уровень шумов для надежной регистрации сигналов.

Действительно, согласно современным представлениям, наибольшей чувствительностью к слабым вибрациям обладают структурные элементы низших уровней. В вибрационном поле возрастает их подвижность, вследствие чего увеличивается вероятность возникновения точечных и линейных дефектов структуры. По мере накопления этих дефектов происходит их укрупнение и переход процесса разрушения на следующий структурный уровень по концентрационному механизму.

Согласно концентрационному критерию укрупнения трещин [11], переход процесса разрушения на следующий структурный уровень происходит при достижении в нагруженном материале некоторой критической концентрации дефектов N , которая зависит от размеров образующихся дефектов l_i ,

$$R = N^{-1/3},$$

$$K = R/l_i = N^{-1/3}/l_i,$$

где R — среднее расстояние между трещинами i -го ранга, K — безразмерный параметр, характеризующий сред-

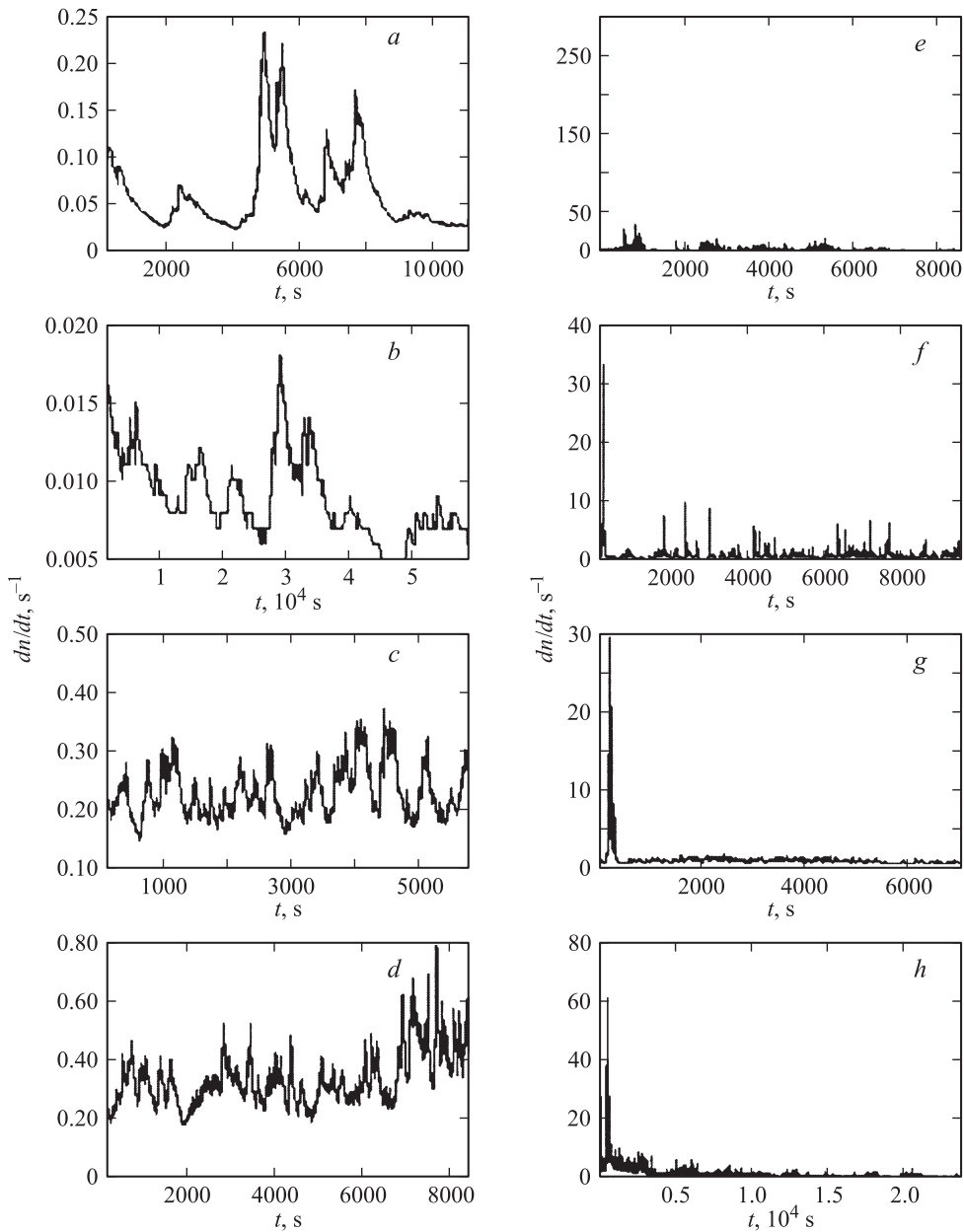


Рис. 1. Активность АЭ в сеансе без вибраций (*a–d*) и во время вибросеанса (*e–h*). *a, e* — образец К под нагрузкой 80 МПа; *b, f* — образец К, 143 МПа; *c, g* — образец СД, 29 МПа; *d, h* — образец ЧМ, 29 МПа.

ние расстояния между дефектами в единицах размеров дефектов.

В такой форме концентрационный критерий представляется для материалов, не содержащих дефекты до начала нагружения. В „нарушенных“ же средах, таких как горные породы, всегда содержится некоторое количество дефектов N_0 , образовавшихся ранее. С учетом этого текущая концентрация будет определяться как

$$N = N_0 + \dot{N}t,$$

$$K = \frac{(N_0 + \dot{N}t)^{-1/3}}{l_i},$$

где \dot{N} — скорость изменения концентрации дефектов.

Отсюда видно, что для перехода процесса разрушения, протекающего со скоростью накопления дефектов \dot{N} , на следующий структурный уровень требуется некоторое время. В зависимости от параметров вибрации, в частности от ее амплитуды, непосредственному влиянию вибраций подвержены лишь сравнительно низкие структурные уровни нагруженного материала, с которых это влияние распространяется на более высокие благодаря ускоренному накоплению дефектов. Ввиду конечной чувствительности аппаратуры и присутствия шумов влияние вибраций выше этого структурного уровня может быть обнаружено лишь спустя некоторое время, необходимое для соответствующего накопления дефектов и дости-

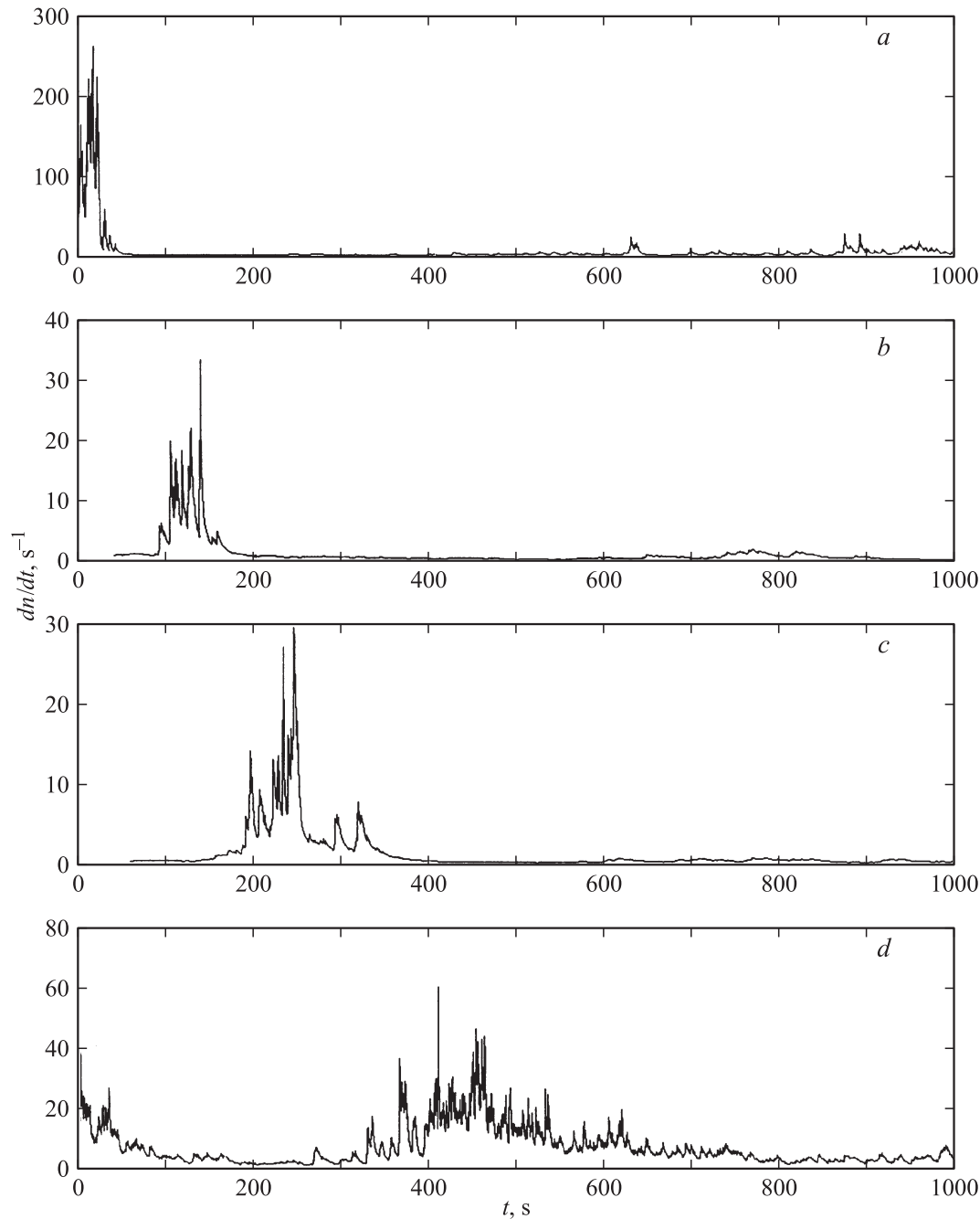


Рис. 2. Активность АЭ на начальной стадии вибросеансов. *a* — образец СД, нагрузка 29 МПа; *b* — образец К, 143 МПа; *c* — образец К, 80 МПа; *d* — образец ЧМ, 29 МПа.

жения процессом разрушения данного структурного уровня по концентрационной схеме. Начиная с этого момента приближенные оценки скорости накопления дефектов можно получить методом АЭ. Разумеется, нужно иметь в виду, что при этом часть дефектов, акустические сигналы которых не превышают уровня шумов и чувствительности аппаратуры, не может быть учтена.

Возникновение триггерного эффекта слабых вибраций в гетерогенных материалах можно объяснить из следующих соображений, основанных на представлениях о

локальной (дифференциальной) прочности и долговечности структурных элементов, образующих материал. Предположим также, что распределение структурных элементов по прочности близко к экспоненциальному, как показано на рис. 3, *a*. При заданной нагрузке в процессе разрушения могут принять участие те структурные элементы, прочность которых не превышает σ_0 . Наличие вибраций вовлекает в этот процесс дополнительное число структурных элементов (область между σ_0 и σ_b на рис. 3, *a*), что эквивалентно увеличению нагрузки.

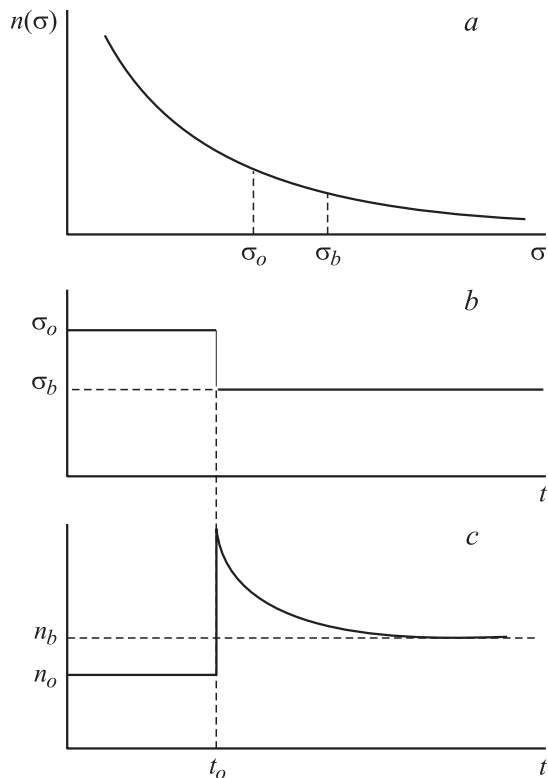


Рис. 3. Гипотетическое распределение структурных элементов по прочности (*a*), предполагаемое кажущееся снижение прочности при включении вибраций (*b*), изменение активности АЭ при включении вибраций (*c*).

Согласно имеющимся представлениям, в вибрационном поле повышается подвижность структурных элементов, вследствие чего уменьшается внутреннее трение, увеличивается вероятность возникновения дефектов и происходит кажущееся снижение прочности и долговечности материала. Возрастание числа образующихся дефектов с началом вибраций сопровождается увеличением активности АЭ и поэтому надежно фиксируется. Схематически эти изменения показаны на рис. 3, *b* и *c*. Началу вибраций на этих рисунках соответствует момент времени t_0 . В этот момент материал из состояния с кажущейся прочностью σ_0 скачком переходит в новое состояние с характерной прочностью σ_b . Смена условий нагружения происходит скачкообразно в момент включения вибраций, и поэтому часть структурных элементов (область между σ_0 и σ_b на рис. 3, *a*) оказывается в новом (предразрывном) состоянии. Разрушение таких элементов происходит достаточно быстро, что проявляется в виде триггерного увеличения активности АЭ. Однако, как уже указывалось выше, при недостаточной силе вибраций этот эффект может быть обнаружен с некоторой задержкой во времени, необходимой для выхода процесса разрушения на сравнительно более высокий структурный уровень, обеспечивающий его экспериментальное обнаружение.

Следующая особенность начальной фазы некоторых вибросеансов — наличие глубокого, достаточно продолжительного участка спада АЭ после начального триггерного скачка (рис. 2). Вероятно, он обусловлен интенсивной разгрузкой большинства областей механической неустойчивости вследствие лавинного срабатывания во время начальной активизации процесса разрушения после включения вибраций. В некоторых случаях (особенно для мрамора) после спада АЭ может наблюдаться вторичный скачок АЭ, что очень напоминает развитие переходного процесса при малом затухании в системе.

Таким образом, выявлено инициирующее воздействие слабых низкочастотных вибраций на процесс упругого энерговыделения в нагруженных геоматериалах, выражающееся в резком увеличении активности АЭ в начале вибросеансов. Всплеск активности может происходить с задержкой. Высокая активность АЭ в начале вибросеанса сохраняется сравнительно короткое время (100–200 с), после чего следует резкий спад активности в течение примерно такого же промежутка времени, а затем устанавливается повышенный уровень активности АЭ, превышающий фоновый уровень в обычном сеансе без вибраций.

Величина временной задержки проявления вибровоздействий обусловлена, по всей видимости, концентрационным механизмом развития процесса разрушения и зависит от параметров внешних вибраций, степени механической нарушенности материала, а также от условий регистрации и чувствительности аппаратуры.

Список литературы

- [1] Н.Н. Песчанская, П.Н. Якушев. ФТТ **30**, 7, 1299 (1988).
- [2] В.И. Николаев, В.В. Шпейзман. ФТТ **39**, 4, 647 (1997).
- [3] А.Б. Лебедев, С.Б. Кустов, Б.К. Кардашев. ФТТ **24**, 3169 (1982).
- [4] Б.А. Болт, У.Л. Хорн, Г.А. Макдональд, Р.Ф. Скотт. Геологические стихии. Мир, М. (1978). 440 с.
- [5] К.М. Мирзоев, С.Х. Негматулаев. Прогноз землетрясений. Дониш (1983). В. 4. С. 365.
- [6] М.А. Садовский, К.М. Мирзоев, С.Х. Негматулаев, Н.Г. Саломов. Изв. АН СССР. Физика Земли **6**, 32 (1981).
- [7] К.М. Мирзоев, С.Х. Негматулаев, С.Д. Виноградов, Т.Ю. Дастури, В.И. Старков. Модельные и натурные исследования очагов землетрясений. Наука, М. (1991). С. 143.
- [8] Г.А. Соболев, А.В. Пономарев. Вулканология и сейсмология **6**, 51 (1997).
- [9] Г.А. Соболев, А.В. Пономарев, А.В. Кольцов. Изв. АН СССР. Физика Земли **12**, 72 (1995).
- [10] L.M. Bogomolov, B. Manjиков, V.N. Syshev, T.E. Tullis. Trans. AGU Full Meeting Supl. **81**, 1082 (2000).
- [11] С.Н. Журков, В.С. Куксенко, В.А. Петров, В.Н. Савельев, У. Султанов. Изв. АН СССР. Физика Земли **6**, 8 (1977).