

**АКУСТИЧЕСКАЯ ЭМИССИЯ ПРИ РЕЛАКСАЦИИ ГОРНЫХ
ПОРОД В СЛАБОМ ВИБРАЦИОННОМ ПОЛЕ
ДО И ЗА ПРЕДЕЛОМ ПРОЧНОСТИ**

П.В. Ильичёв, Б.Ц. Манжиков

Исследовалась акустическая эмиссия (АЭ) при релаксации мрамора в условиях одноосного ступенчатого деформирования и слабых низкочастотных вибраций на жестком прессе. Регистрировались нагрузка, параметры макродеформации образца и волновые формы АЭ. Наблюдалось ускорение процесса релаксации напряжений в образцах мрамора под действием вибраций, объясняемое снижением внутреннего трения в зонах сочленения элементов диссипативной структуры.

Ключевые слова: акустическая эмиссия; внутреннее трение; вибровоздействие; релаксация напряжений; диссипативная структура.

Влияние вибровоздействий на процесс деформирования различных материалов в настоящее время не вызывает сомнений [1, 2]. В этом отношении показательна связь глобальной сейсмичности с подземными ядерными взрывами. С 1964 г., когда США и СССР стали систематически проводить испытания ядерных зарядов мощностью более трех мегатонн, число сильных землетрясений в мире резко сократилось [3]. Было установлено, что высокоэнергичные кратковременные воздействия на литосферу активизируют относительно слабые землетрясения и приводят к уменьшению числа катастрофических событий. Благодаря им стала очевидной идея уменьшения сейсмической опасности через активное воздействие на созревающий очаг землетрясения.

Принято считать, что землетрясения вызваны высвобождением упругой энергии вследствие внутреннего разрушения напряженного материала Земли. Основным источником энергии полагается непрерывное относительное

перемещение тектонических плит, происходящее за счет конвекционных потоков в мантии. Вязкость среды и стесненные условия создают определенное сопротивление этому движению, которое обуславливает в земной коре некоторый фоновый уровень тангенциальных напряжений. При этом большинство землетрясений приурочено к разломным зонам земной коры, что указывает на важную роль блочного строения земной коры и разломных зон в сейсмическом процессе [4, 5]. Накопление энергии в дискретной, блоковой среде, имеет характерные особенности. В частности, они связаны с относительно высокой подвижностью блоковой структуры, которая способствует выравниванию напряжений и тем самым препятствует их концентрации в очаговых зонах и накоплению там потенциальной энергии. Возникновение очаговых зон становится возможным в тех местах, где взаимное перемещение блоков по каким-либо причинам затруднено. Не уточняя конкретных механизмов блокировки, в таком случае можно говорить о

повышении эффективного коэффициента трения на контактах блоков [6, 7].

При наличии трения на контактах, скольжение блоков относительно друг друга происходит скачкообразно. Каждый из скачков воспринимается как землетрясение, сила которого зависит от амплитуды скачка и сброса напряжений. В свою очередь эти величины определяются контактными условиями на границах блоков и уровнем стесняющих сдвиг напряжений. Повышение последних приводит к увеличению упругой энергии, которую способен накопить материал за время между скачками.

Для того чтобы блоки сместились относительно друг друга должны быть выполнены определенные условия, в частности, напряжения на контактах должны достичь трения покоя или прочности ранее залеченного шва. Снижая каким-либо способом трение на контактах блоков можно добиться, чтобы смещение происходило более легко. В этом месте интенсивность диссипации упругой энергии должна возрасти за счет увеличения как частоты скачков, так и их амплитуды и энергии. Одновременно снижение трения при смещении блоков должно приводить к уменьшению их упругого деформирования и, соответственно, накапливаемой потенциальной энергии.

Очевидно, если в материале уже накоплена потенциальная энергия достаточная для возникновения землетрясения, то появляется опасность, что быстрое снижение трения покоя на контактах блоков может спровоцировать его немедленно. Этот случай имеет отношение больше к временному аспекту проблемы разрядки избыточных напряжений, представляющему отдельный интерес.

Цель настоящей работы – обсуждение новых результатов, указывающих на повышенную чувствительность горных пород к вибрациям в запредельной области деформирования геоматериалов.

Методика. Объектом исследований служили образцы правильной цилиндрической формы Чычканского мрамора, практически целиком состоящего из зерен кальцита. Образцы для испытаний имели высоту 60 и диаметр 30 мм. В экспериментах использовались методы акустической эмиссии и тензометрии, позволяющие судить об уровне напряжений и интенсивности диссипации накопленной упругой энергии в нагруженном материале.

Ступенчатое одноосное деформирование образцов в условиях релаксации напряжений осу-

ществлялось в режиме задаваемых деформаций на жестком прессе 78У03 конструкции ВНИИ [8]. Пресс имел бесшумную конструкцию и обладал высокой жесткостью $\sim 2 \cdot 10^{10}$ Н/м. Это позволяло эффективно исследовать АЭ в процессе деформирования горных пород вблизи разрушающих нагрузок и за пределом прочности. Выдержка на каждой ступени деформирования продолжалась около одного месяца. Выбранный способ испытаний наилучшим образом отвечал условиям моделирования разрядки избыточных напряжений в земной коре.

Источником слабых низкочастотных вибраций служил малогабаритный электродинамический сейсмоприемник СВ-20, который использовался в режиме излучателя и закреплялся на стальном корпусе жесткого прессы. Возбуждение вибратора осуществлялось синусоидальным сигналом от генератора ГЗ-112. Принятая схема установки излучателя обеспечивала неизменность акустического контакта источника вибраций с образцом на протяжении всего эксперимента. Амплитуда вибраций выбиралась ниже порога чувствительности аппаратуры, благодаря чему не создавалось дополнительных помех при регистрации АЭ. В качестве приемника АЭ использовался датчик продольных волн [9] с активным элементом в виде демпфированного диска пьезокерамики ЦТС-19 диаметром 10 и толщиной 1 мм.

Регистрирующая аппаратура работала в ждущем режиме. Программный цикл регистрации очередного события запускался при аппаратном обнаружении сигнала, удовлетворяющего амплитудным условиям отбора. Выбранный порог амплитудной дискриминации обеспечивал надежную отстройку от помех. Параметры макродеформации образца, нагрузка и волновые формы АЭ регистрировались в цифровой форме с помощью персонального компьютера. Регистрация волновых форм АЭ осуществлялась при частоте дискретизации 2,5 МГц. Данные были организованы в виде кадров, содержащих 1024 8-разрядных отсчетов. Во избежание потерь начальной фазы волновых форм, первые 128 отсчетов в кадре отводились под предысторию, остальные под историю. По условиям регистрации в кадре могло присутствовать не менее одного события АЭ. Каждому кадру ставились в соответствие время относительно начала текущего экспериментального сеанса, величины нагрузки, продольной и поперечной деформации образца. Двоичные файлы данных сохранялись на жестком диске персонального компьютера.

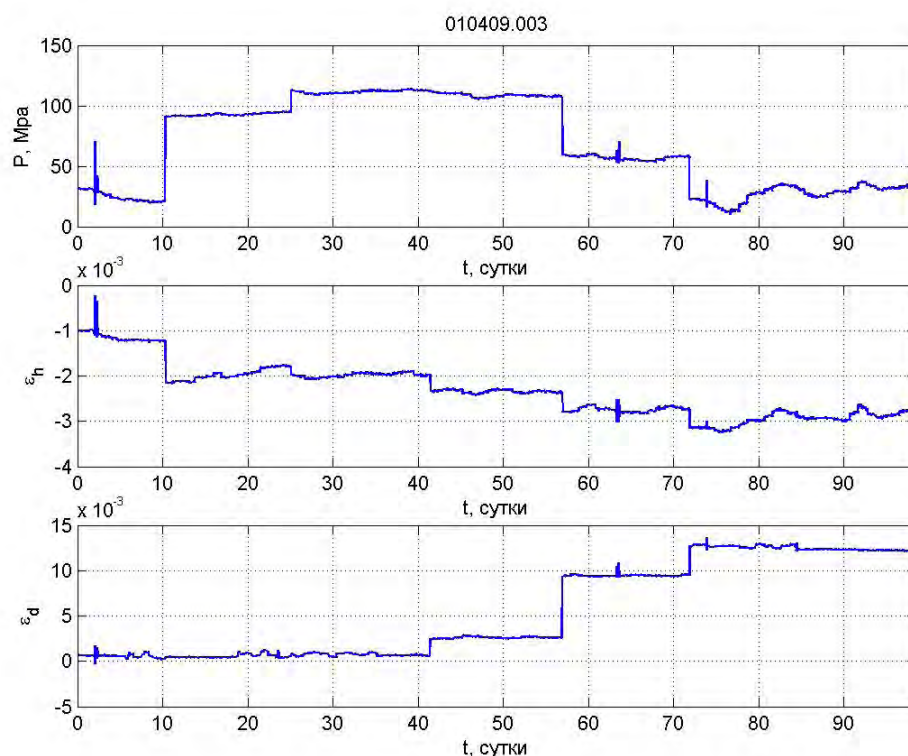


Рис. 1. Временные диаграммы нагружения и деформирования мраморного образца.

Общее временное разрешение регистрирующей аппаратуры составляло 1 миллисекунду.

С целью минимизации влияния помех эксперименты проводились в автоматическом режиме в нерабочее время с 19 до 7 часов. В указанное время проводилось три экспериментальных сеанса по 4 часа. Источник вибраций работал во время второго сеанса, в течение первого и третьего сеансов регистрировалась фоновая АЭ в отсутствии вибровоздействий. Пригрузка образца производилась в начале рабочего дня, чтобы к очередному экспериментальному сеансу в образце успевал бы завершиться переходной процесс, вызванный пригрузкой, и активность АЭ снижалась до фонового уровня. Благодаря принятым мерам влияние пригрузки на результатах регистрации АЭ было минимальным.

Экспериментальные результаты. Во время проведения эксперимента, который продолжался более полугода, было выполнено 7 пригрузок образца, из них 4 на допредельной области деформирования и 3 за пределом прочности. Благодаря высокой жесткости пресса образец

деформировался в контролируемом режиме на всех стадиях деформирования, включая предельные нагрузки и запредельную область. В данной работе представлены результаты испытаний, начиная со 2 пригрузки, представляющие наибольший интерес. Временные зависимости нагрузки, продольной и поперечной деформаций образца, приведены на рис. 1. На временной оси этих графиков отложено чистое время эксперимента, которое примерно вдвое короче общего времени, в течение которого образец находился под нагрузкой, поскольку эксперимент продолжался только 12 часов в сутки.

Как можно видеть, после 4 пригрузки напряжения в образце достигли предельных значений. В этом состоянии образец находился около месяца, и после очередной пригрузки перешел в запредельную область деформирования.

Переход в запредельную область, почти незаметный на графике изменения нагрузки, надежно фиксируется по изменениям продольной и поперечной деформаций в виде характерной ступеньки на 42 часе эксперимента.

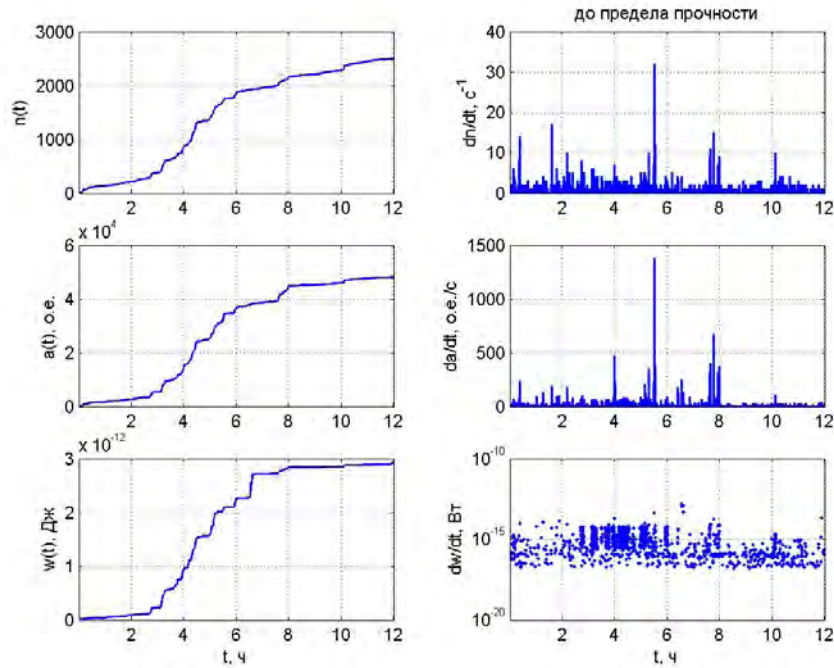


Рис. 2. Изменения интегральных и дифференциальных характеристик АЭ на допредельной области деформирования мрамора.

Влияние вибровоздействий на процесс диссипации упругой энергии в нагруженном материале проявилось в характерных изменениях АЭ. На рис. 2–4 приведены интегральные (слева) и дифференциальные (справа) характеристики статистических потоков АЭ: числа событий, их амплитуд и энергии. Графики представлены порознь для допредельной области деформирования (рис. 2), предельных нагрузок (рис. 3), и за пределом прочности (рис. 4).

Зависимости представляют результаты синхронного накопления данных в 12-часовых интервалах за весь соответствующий период деформирования. Напомним, что в течение первых 4 часов эксперимента регистрировалась фоновая АЭ, предшествующая вибросеансу, в течение 5–8 часа регистрировалась АЭ во время вибровоздействий и, в течение 9–12 часа регистрировалась фоновая АЭ после вибросеанса.

Кумулятивные зависимости, приведенные на рисунках слева, позволяют по изменению АЭ составить общее представление о влиянии вибровоздействий на процесс диссипации упругой энергии на всех этапах деформирования породного образца. Судя по результатам, приведенным

на рис. 2, влияние вибраций практически отсутствует на допредельной стадии деформирования. Явно, в виде скачкообразного изменения крутизны всех кумулятивных зависимостей, оно проявилось вблизи предельных нагрузок (рис. 3), и в запредельной области деформирования (рис. 4). На этих зависимостях резкое возрастание активности и интенсивности статистических потоков АЭ совпадает с началом вибровоздействий. Но в запредельной области характер АЭ реакции мрамора на вибрации несколько изменился по сравнению с предельными нагрузками. Как можно видеть на рис. 4, во время вибросеансов в запредельной области резкий рост накопления числа событий АЭ и их параметров отмечается дважды, в начале вибросеанса и, особенно заметно, в заключительной его четверти. В последнем случае отставание АЭ реакции материала относительно начала вибровоздействия на 2,5–3 часа объясняется ее задержкой [10]. Аналогичная задержка ответной реакции нагруженного материала на начало вибрации вблизи предельных нагрузок менее выражена (рис. 3).

Наличие задержки АЭ свидетельствует о кумулятивном характере влияния вибровоздей-

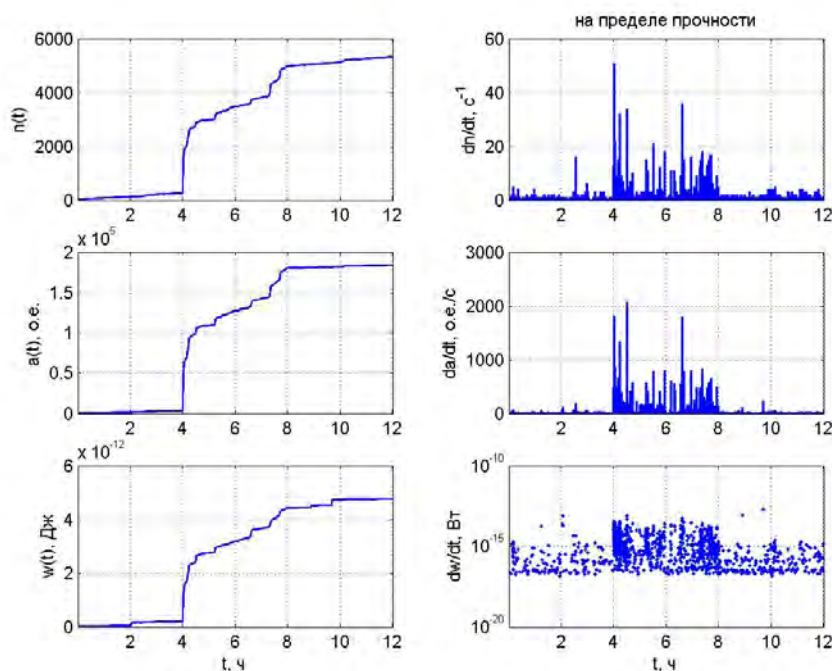


Рис. 3. Изменения интегральных и дифференциальных характеристик АЭ при деформировании мрамора на предельных нагрузках.

ствий. Как мы отметили, задержка становится заметной около предельных нагрузок. В это время в результате локализации пластической деформации в материале начинает формироваться диссипативная структура. В запредельной области деформирования по мере формирования диссипативной структуры проявление задержки усиливается. Можно предположить, что величина задержки зависит не только от интенсивности вибровоздействия, но и связана определенным образом с характерными размерами элементов структуры материала.

При интерпретации результатов нужно иметь в виду, что метод АЭ обладает конечной чувствительностью, т.е. регистрации поддаются далеко не все сигналы, а только те, амплитуда которых превысит уровень шумов и порог амплитудной дискриминации, не говоря о более сложных алгоритмах отбора. Следовательно, дефект, который породил зарегистрированное событие АЭ, “долго” готовился, начиная с низших структурных уровней [11]. Несомненно, что влиянию слабых вибраций наиболее подвержены именно эти структурные уровни. В связи с этим, уместно вспомнить дислокационный механизм сдвига в

кристаллах. Чтобы осуществить сдвиг в кристалле за счет напряжений много меньших сдвиговой прочности материала, необходимо протолкнуть дислокацию через весь кристалл, на что необходимо определенное время. Этот процесс существенно облегчается при высоких температурах с повышением подвижности дислокаций. Очевидно, в нашем случае роль температуры, понижающей внутреннее трение, дополняют вибрации.

Отмеченные особенности временного проявления реакции материала на начало вибровоздействия скорее всего связано с наличием в материале двух структурных уровней, ответственных за диссипацию упругой энергии. По-видимому, один из них, которому соответствуют короткие времена задержек, присутствует в образце изначально в виде исходной гетерогенности геоматериала, другой же связан с формированием диссипативной структуры [12–14] в результате пластического деформирования материала вблизи предельных нагрузок и за пределом прочности. Дополнительную ясность по этому вопросу могли бы внести результаты наблюдений изменений структуры материала по мере его нагружения с помощью прямых методов анализа.

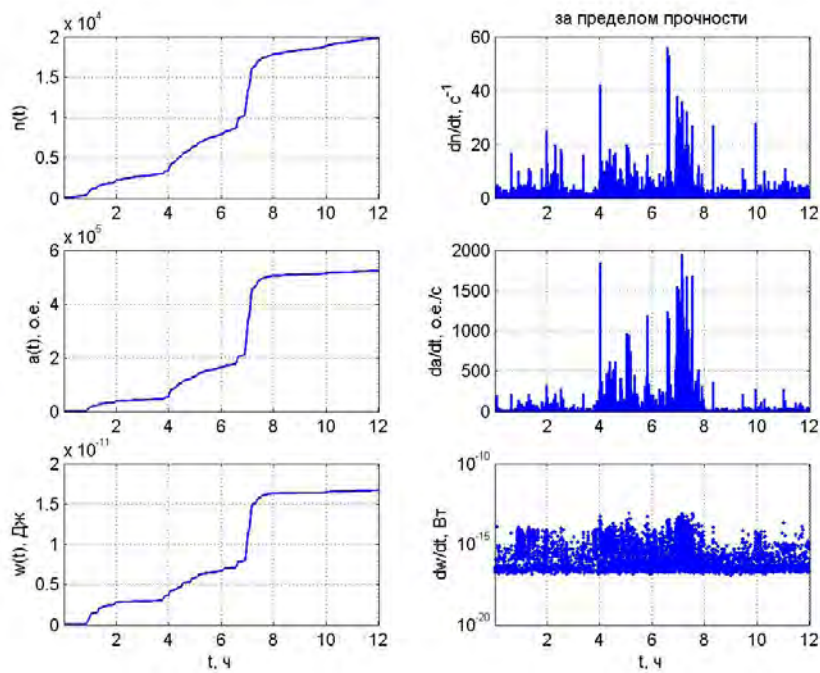


Рис. 4. Изменения характеристик АЭ при деформировании мрамора за пределом прочности.

Область деформ.	Сеанс, час	Число событ./вероят.	Активн. dn/dt , c^{-1}	Средняя амплит. \bar{a} , о.е.	da/dt , о.е./с	Средняя длит. b , мкс	db/dt , мкс/с	Энергия w , Дж	Мощность dw/dt , Вт
До предела	1-4	845 (0,34)	0,059	16,70	0,98	181,21	10,63	$1,09 \cdot 10^{-15}$	$6,40 \cdot 10^{-17}$
	5-8	1319 (0,53)	0,092	23,30	2,13	156,06	14,29	$1,45 \cdot 10^{-15}$	$1,33 \cdot 10^{-16}$
	9-12	334 (0,13)	0,023	9,93	0,23	37,84	0,88	$2,29 \cdot 10^{-16}$	$5,30 \cdot 10^{-18}$
На пределе	1-4	251 (0,05)	0,017	11,49	0,20	32,43	0,57	$7,55 \cdot 10^{-16}$	$1,32 \cdot 10^{-17}$
	5-8	4733 (0,89)	0,329	37,46	12,31	17,73	5,83	$8,96 \cdot 10^{-16}$	$2,94 \cdot 10^{-16}$
	9-12	341 (0,06)	0,024	10,62	0,25	38,35	0,91	$9,92 \cdot 10^{-16}$	$2,35 \cdot 10^{-17}$
За пределом	1-4	3392 (0,17)	0,236	15,66	3,69	172,45	40,62	$1,07 \cdot 10^{-15}$	$2,53 \cdot 10^{-16}$
	5-8	14462 (0,73)	1,004	31,26	31,40	31,29	31,43	$8,76 \cdot 10^{-16}$	$8,80 \cdot 10^{-16}$
	9-12	2031 (0,10)	0,141	9,14	1,29	30,67	4,33	$1,89 \cdot 10^{-16}$	$2,67 \cdot 10^{-17}$

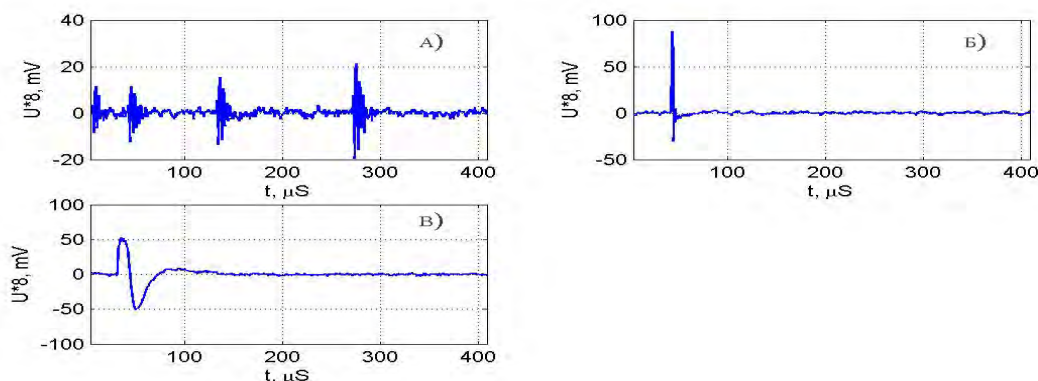


Рис. 5. Волновые формы сигналов АЭ при деформировании без вибрации (слева) и с вибрацией (справа).

В численном виде рассмотренные выше величины приведены в таблице, где даются также средние скорости изменения амплитуды, длительности и энергии АЭ в секунду, имеющие смысл средней интенсивности соответствующих статистических потоков. По данным таблицы, как и из приведенных выше графиков видно, что вибрации оказывают влияние на процесс диссипации упругой энергии в виде АЭ в различной степени на всех этапах деформирования мрамора. Оно выражается в увеличении вероятности появления АЭ событий (значения в скобках) при вибровоздействии относительно фоновых значений, а также возрастании средних амплитуд и энергий сигналов. Аналогичные изменения отмечаются для значений активности, мощности и интенсивности статистических потоков параметров АЭ.

Наиболее ощутимо влияние вибровоздействий становится вблизи предельных нагрузок и за пределом прочности материала по мере формирования в нем диссипативной структуры.

Как следует из данных таблицы, при вибровоздействии увеличение амплитуд и энергий сигналов АЭ сопровождается уменьшением их длительности. Это позволяет предположить, что вибровоздействие должно заметным образом отразиться на форме регистрируемых сигналов АЭ. Действительно, визуальный контроль показал, что форма сигналов АЭ во время вибровоздействий и без него существенно отличается друг от друга. На рис. 5 приведены примеры наиболее часто регистрируемых волновых форм сигналов АЭ при фоновом деформировании мрамора без вибровоздействий (слева) и во время вибросеансов (справа).

АЭ сигналы, регистрируемые во время деформирования мрамора без вибровоздействий, обычно представляют собой более или менее продолжительный дуг затухающих колебаний одной–двух преобладающих частот длительностью от нескольких микросекунд до нескольких миллисекунд [15]. Амплитуда в цуге достигается в начале колебаний. Нередко в кадре данных присутствуют несколько сигналов. Пример такой последовательности сигналов приведен на рис. 5А.

Во время вибросеансов на допредельной стадии деформирования мрамора среди сигналов начинают появляться сигналы другого типа, очень короткие, представляющие собой фактически однопериодное колебание длительностью 2–5 микросекунд (рис. 5Б). Средняя амплитуда таких сигналов заметно больше, чем амплитуда сигналов, регистрируемых без вибраций. Число сигналов второго типа возрастает с увеличением нагрузки и становится подавляющим вблизи предельных нагрузок и на запредельной стадии деформирования. Это позволяет предположить, что подобные сигналы генерируются сравнительно мелкими подвижками в местах формирования будущих плоскостей макросдвига. Величину подвижек можно оценить по формуле [14]:

$$L=c/2f,$$

где $c=2000$ м/с, скорость поперечных волн; $f=500$ кГц, мода спектральной плотности колебаний. Расчет дает вполне разумный результат $L=2$ мм.

Во время четвертой ступени деформирования вблизи предельных нагрузок было зарегистрировано небольшое число сигналов напо-

минающих по форме сигналы второго типа, но более низкочастотных (20 кГц) (рис. 5В). Вероятнее всего, эти сигналы связаны с макросдвигами в материале по плоскостям локализованной деформации (линии Чернова–Людерса), являющихся границами элементов диссипативной структуры. Оценка характерных размеров элементов диссипативной структуры по приведенной формуле дает значение $L=5$ см.

Выводы. Вибрации оказывают влияние на процесс диссипации упругой энергии в различной степени на всех этапах деформирования мрамора, что проявляется на характеристиках АЭ. Наибольшая виброчувствительность нагруженного материала отмечается вблизи предельных нагрузок (область бифуркации состояний) и в запредельной области деформирования. Это позволяет предположить, что вибрации оказывают влияние главным образом на контактные зоны между элементами диссипативной структуры мрамора, которая в силу процессов самоорганизации материала формируется при его пластическом дилатансионном деформировании. Наиболее вероятным механизмом влияния вибраций представляется снижение внутреннего трения в зонах сочленения элементов диссипативной структуры, где материал по своим свойствам приближается к дискретным средам.

Выявленные особенности вибровоздействий могут проявиться и в натуральных условиях породного массива. Можно ожидать, что наиболее виброчувствительными окажутся разломные зоны и участки повышенной трещиноватости земной коры.

Литература

1. Садовский М.А., Мирзоев К.М., Негматуллаев С.Х., Саломов Н.Г. Влияние механических микроколебаний на характер пластических деформаций материалов // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1981. №6. С.32–42.
2. Мирзоев К.М., Негматуллаев С.Х., Виноградов С.Д., Дастури Т.Ю., Старков В.И. Влияние механических вибраций на пластические деформации и сейсмичность // Модельные и натурные исследования очагов землетрясений. М.: Наука, 1991. С. 143–150.
3. Савин М.Г. Лечу землетрясения. Услуги платные // Химия и жизнь. 2005. № 11.
4. Садовский М.А. О естественной кусковатости горных пород // ДАН СССР. 1979. Т. 247. №4. С. 829–832.
5. Садовский М.А., Писаренко В.Ф. Сейсмический процесс в блоковой среде. М.: Наука, 1991. 96 с.
6. Добровольский И.П. Теория подготовки тектонического землетрясения. М.: ИФЗ АН СССР, 1991. 217 с.
7. Logan J.M. Creep, Stable-Sliding and Premonitory Slip // Proc. of Conf.2 Experimental Studies of Rock Friction with Application to Earthquake Prediction. Menlo Park, California, 1977. P. 205–217.
8. Ставрогин А.Н., Протосеня А.Г. Прочность горных пород и устойчивость выработок на больших глубинах. М.: Недра, 1985. 271 с.
9. Акустическая эмиссия и ее применение для неразрушающего контроля в ядерной энергетике / Под ред. К.Б. Вакара. М.: Атомиздат, 1980. 216 с.
10. Куксенко В.С., Манжиков Б.Ц., Тилегенов К., Шатемиров Д.К., Эмильбеков Б.Э. Триггерный эффект слабых вибраций в твердых телах (горных породах) // ФГТ. 2003. Т. 45. Вып. 12. С. 2182–2186.
11. Журков С.Н., Куксенко В.С., Петров В.А., Савельев В.Н., Султанов У.О. О прогнозировании разрушения горных пород // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1977. №6. С.11–18.
12. Пригожин И., Стенгерс И. Порядок из хаоса. М.: Прогресс, 1986.
13. Родионов В.Н. Диссипативные структуры в геомеханике // Экспериментальная сейсмология. М.: Наука, 1983. С. 5–17.
14. Родионов В.Н., Сизов И.А., Цветков В.М. Основы геомеханики. М.: Недра, 1986. 321 с.
15. Манжиков Б.Ц., Ильичев П.В., Бобровский В.В. О соотношении сдвиг-отрыв при релаксации квазипластичных горных пород // Геодинамика и геоэкология высокогорных регионов в 21 веке. Вып.3. Москва–Бишкек, 2008. С. 187–191.