АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Том XXVI 1980 Вып. 3

УДК 534.231.1:620.18:691.212

АКУСТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СТРУКТУРНЫХ ИЗМЕНЕНИЙ ГРАНИТА ПРИ ОСЕВОМ СЖАТИИ

И. Ю. Воронина, В. П. Епифанов

Получена экспериментальная зависимость скорости распространения ультразвуковых волн от величины осевой нагрузки. Оценен объем материала, в котором возникает дефект, и прослежена кинетика разрушения гранита.

Общеизвестно применение акустического метода исследования с целью получения информации о физико-механических свойствах [1—4] вещества и его структурных особенностях [5, 6]. Естественно ожидать, что этот метод позволит составить более полную картину структурных изменений в граните при осевом сжатии.

Сначала искалась зависимость скорости распространения продольной и сдвиговой волны от величины приложенной осевой нагрузки на образец. Были опробованы два варианта наблюдения. В первом случае волна пропускалась вдоль оси образца, во втором — перпендикулярно ей. Использовались цилиндрические образцы мелкозернистого карельского гранита [7] диаметром 30 мм и высотой около 60 мм.

В первом варианте образец ступенчато нагружался, выдерживался под нагрузкой 60 с, затем разгружался, измерялось время прохождения продольной волны через образец [8] в ненагруженном состоянии, затем образец снова нагружался и так до момента, когда при очередном увеличении нагрузки образец разрушался.

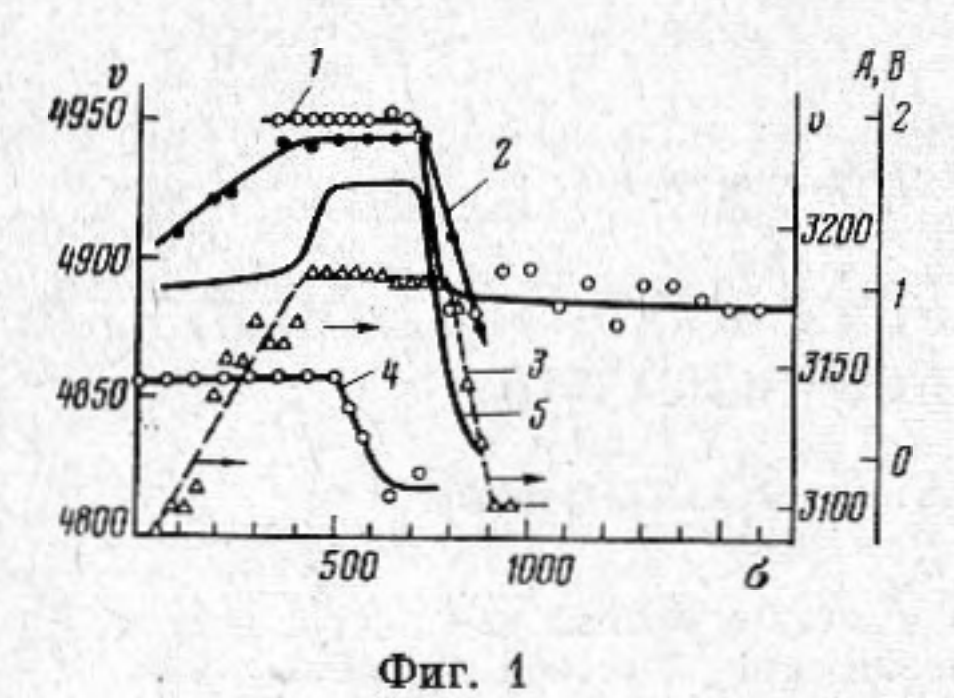
Во втором варианте образец также ступенчато нагружался, но давление не сбрасывалось, как в первом случае, и изменение скоростей сдвиговой и продольной волн оценивалось иммерсионным методом [8] в процессе нагружения. Образец перед помещением в воду покрывался тонким слоем вазелина.

В полученной экспериментальной зависимости (фиг. 1) можно выделить четыре характерные области [9].

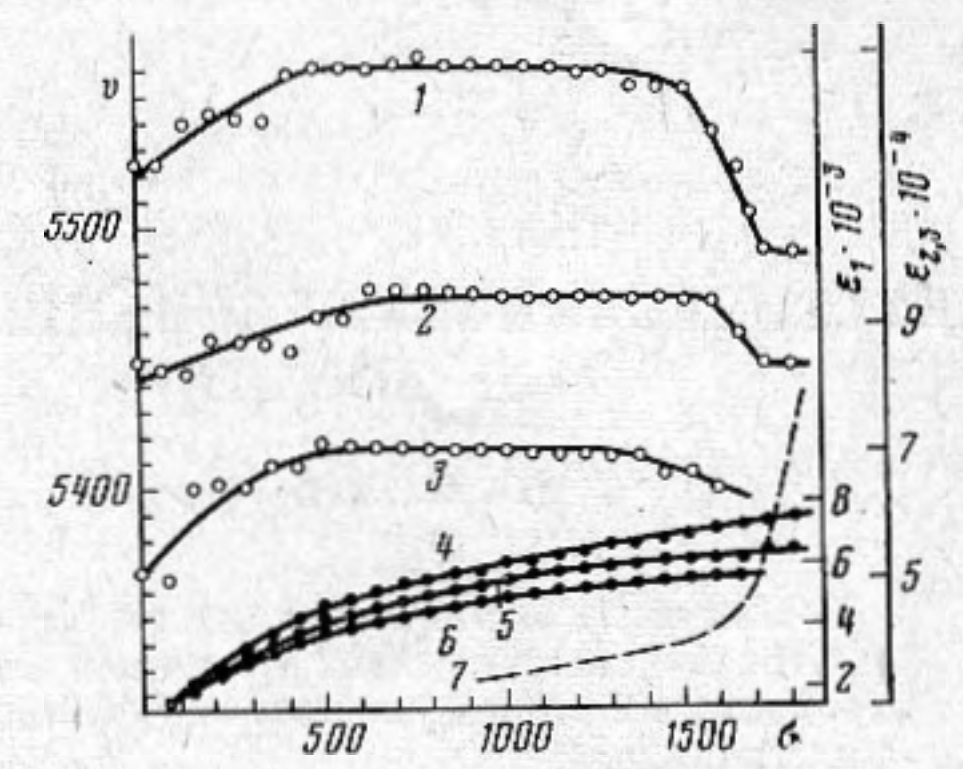
В первой области наблюдается увеличение скорости с возрастанием нагрузки (линии *2*, *3*). Контроль скорости звука для луча, направленного вдоль образца (линии *1*, *4*), выполнялся в разгруженном состоянии. В этих условиях зависимость скорости от величины осевого сжатия не наблюдалась вплоть до значительных напряжений. Этот факт свидетельствует об обратимом характере изменения свойств в первой области.

Во второй области скорость заметно не меняется под нагрузкой до определенного предела, индивидуального для каждого образца. Дальнейшее увеличение нагрузки сопровождается резким уменьшением скорости (третья область). Она может заканчиваться «взрывом», т. е. внезапным разрушением образца; при этом большая его часть превращалась из монолита в мелкую щебенку (кривая *2*). Возможен, однако, переход в четвертую область (кривые *1*, *3*, *4*), для которой характерны нестабильные значения скорости и потрескивание образца. Заканчивается эта область разрушением.

Факт изменения скорости при увеличении осевого сжатия (первая область) можно объяснить [10] возрастанием модуля $E=\partial\sigma/\partial\varepsilon$. Частично увеличение скорости и уменьшение затухания сигнала на этом участке кривой, несомненно, должны быть обусловлены сокращением объема пустот и лучшим контактом отдельных зерен гранита друг с другом. Такое объяснение



Фиг. 1

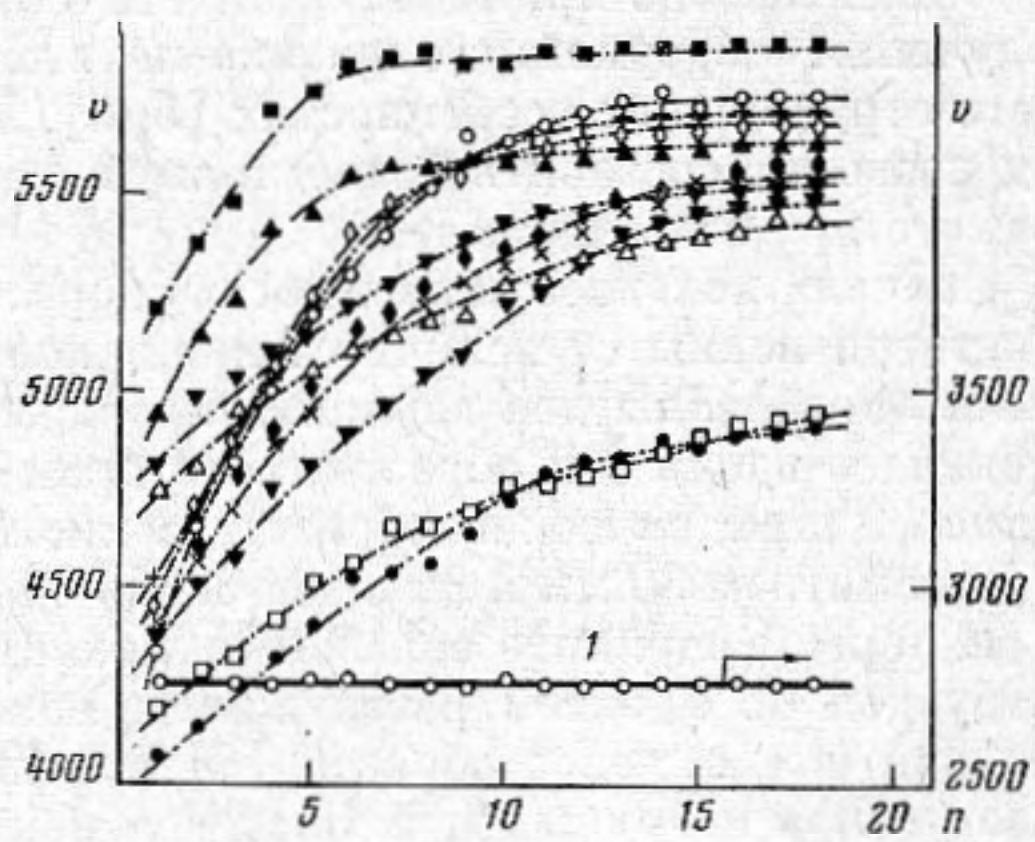


Фиг. 2

Фиг. 1. Зависимость скорости продольной v_l, мс$^{-1}$ (линии *1*, *2*, *4*) и сдвиговой v_t, мс$^{-1}$ (*3*) волн от величины нормального напряжения σ (кГ·см$^{-2}$); *1*, *4* – звуковой луч направлен вдоль оси; *3*, *5* – поперек образца, *5* – изменение амплитуды *A*, *B* проходящего сигнала продольной волны от σ (кГ·см$^{-2}$), $f=1{,}25$ МГц

Фиг. 2. Изменение скорости v_l (мс$^{-1}$) продольной волны (линии *1*, *2*, *3*) и относительной продольной деформации ε_1 (линии *4*, *5*, *6*), $\varepsilon_{2,3}$ (линия *7*) от величины нормального напряжения σ (кГ·см$^{-2}$)

Фиг. 3. Зависимость скорости распространения продольной акустической волны в граните *v*, мс$^{-1}$ (линия *1* – в оргстекле) от времени *n* (сутки)



Фиг. 3

качественно правильно предсказывает изменение величины скорости, что подтверждается сопоставлением расчетных и экспериментальных значений v_l и v_t:

$$v_l=[E(1-\mu)/\rho(1+\mu)(1-2\mu)]^{1/2};\quad v_t=[E/2\rho(1+\mu)]^{1/2},$$

где μ – коэффициент Пуассона, ρ – плотность.

Существование второй области также может быть объяснено из зависимости $\varepsilon=f(\sigma)$. Близкая к прямолинейной зависимость ε от σ при значительных σ дает $\partial\sigma/\partial\varepsilon=\text{const}$, т. е. участок, параллельный оси абсцисс.

Уменьшение скорости (область *3*) при увеличении осевого сжатия может быть, по-видимому, связано с увеличением числа дефектов и их развитием [11–13]. В пользу этого предположения свидетельствует экспериментальный факт увеличения коэффициента затухания. Известна работа [14], где найдена зависимость скорости продольной волны от величины внутреннего дефекта, т. е. поры. Есть основания предполагать, что и в нашем случае уменьшение скорости от величины осевого сжатия связано с возникновением и развитием дефектов. Поскольку микротрещины ориентируются параллельно оси наибольшего сжатия и раскрываются в направлении наименьшего сжатия, то увеличение объема при образовании трещин [15] должно вносить существенный вклад в $\varepsilon_{2,3}$.

Сопоставление скорости продольной волны и относительного сжатия от величины приложенной нагрузки приведено на фиг. 2. Кривые *1—4*, *2—5*, *3*, *6*, *7* соответствуют трем последним циклам нагружения образца перед разрушением. Прослеживается корреляция между относительным сжатием и скоростью распространения продольной волны $\varepsilon=f(\sigma)$. Можно отметить, что скорость звука чувствительна к изменению состояния образца при сжатии и к остаточным структурным изменениям при циклических нагружениях.

Для того чтобы оценить количество пустот в исходном образце был проделан следующий эксперимент. Его идея состояла в использовании различия скоростей распространения звука в безграничной v_1 и ограниченной v_2 среде:

$$v_1=v_l, \quad v_2=(E/\rho)^{1/2}.$$

Известно, что исходные образцы гранита имели преимущественную ориентацию микротрещин вдоль оси. Поэтому выбирались такие соотношения диаметра излучателя и образца, для которых возможен переход от одного типа волны к другому при заполнении трещины более плотной средой.

На торцевую поверхность образца перед измерениями наносилось приблизительно одинаковое количество масла (типа МВП) вместо обычно применявшегося каучука СКН-18. Каждое последующее измерение выполнялось через сутки, чтобы масло успело впитаться в образец. Для сравнения измерялась скорость продольной волны в образце полиметилметакрилата (кривая *1* фиг. 3). Зная массу впитавшегося масла, его плотность и объем образца, можно оценить суммарный объем пор. Расчетная величина пористости составляет около 1%.

Для отдельных образцов были получены также кривые десорбции. Десорбция осуществлялась в токе насыщенного водяного пара [16]. После десорбции образец сушился до постоянного веса. Насыщение образца маслом достигалось помещением его в масляную ванну при температуре 110° С с последующей выдержкой в ней в течение 2—3 суток при комнатной температуре.

Из приведенной экспериментальной зависимости (фиг. 3) следует, что скорость продольной волны возрастает при заполнении пустот маслом. Замена модели ограниченной среды на неограниченную дает хорошее качественное согласие с экспериментом.

Изменение скорости индивидуально для каждого образца, что может быть связано с различным расположением трещин в образце и разной их величиной. Наблюдая процесс сорбции, можно получить представление о характере трещиноватости образца.

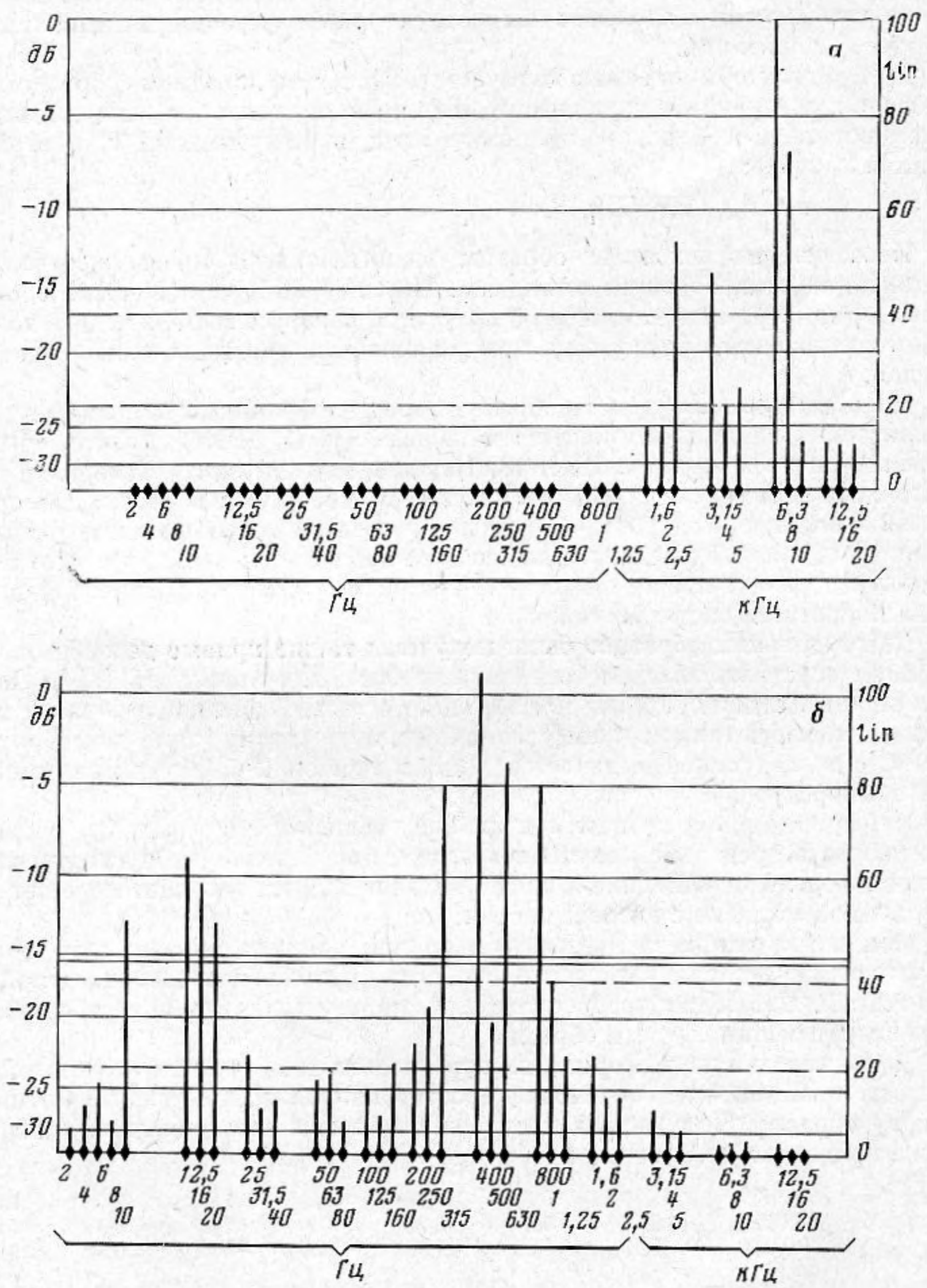
Дополнительную информацию о расположении трещин можно получить из сопоставления величин скорости, направленной вдоль $v_\parallel$ и поперек $v_\perp$ образца. Для восьми произвольно выбранных образцов гранита ниже приведены $v_\parallel$, а также min и max

$v_\parallel$, км/с	5,62	5,70	5,65	5,84	5,68	5,54	5,92	5,16
$v_\perp$, км/с	5,11	5,40	5,60	5,29	5,49	5,29	5,99	5,10
	−5,40	−5,49	−5,98	−5,81	−5,55	−5,37	±0,02	±0,02

значения $v_\perp$, полученные при вращении образца ($\Delta v=\pm 10$ мс$^{-1}$). В большинстве случаев $v_\parallel>v_\perp$. При осевом вращении образца значение скорости $v_\perp$ и амплитуда проходящего сигнала меняются. Эти факты можно рассматривать как подтверждение анизотропии материала, связанной с преимущественной ориентацией трещин вдоль оси образца.

Сопоставление модуля Юнга и коэффициента Пуассона, рассчитанных по данным акустических измерений и из зависимости $\varepsilon_{1,2}=f(\sigma)$, для любого произвольно выбранного образца дает приемлемое совпадение, например, $E=6{,}6\cdot 10^{10}$ Н/м^2, $\mu=0{,}28$.

Как уже отмечалось выше, непосредственно перед разрушением в материале образца генерируются акустические сигналы. Спектрограмма такого импульса приведена на фиг. 4, *а*. В зависимости от условий нагружения и предыстории образца можно наблюдать несколько таких сигналов длительностью 0,04—0,06 с, частотой около 6—8 кГц. Образец при



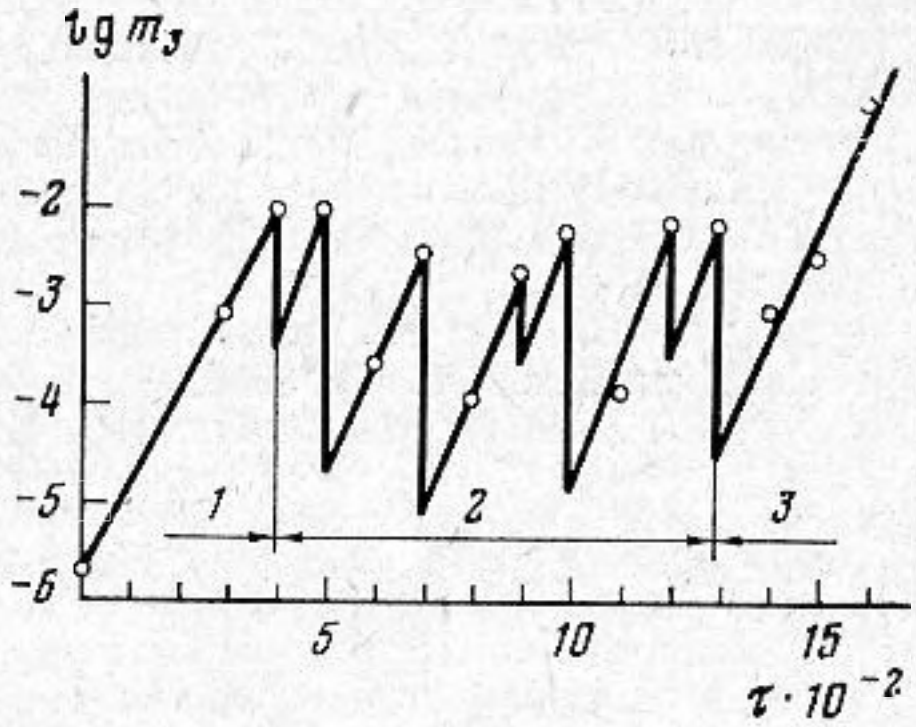
Фиг. 4. Спектрограмма характерного треска: *а* — предшествующего разрушению гранита, *б* — в момент разрушения

этом не претерпевает видимых изменений. Аналогичные импульсы в сходной ситуации наблюдались и в других материалах [17, 18].

Если генерирование акустических импульсов средой [19] считать подобным излучению элементарного осциллятора частотой $f=(^1/_2\pi)\sqrt{a/m}$, где a — коэффициент упругости, m — масса осциллятора, то можно оценить характерный размер среды, в котором происходит разрушение.

Полагая для упрощения, что закон Гука оправдывается вплоть до разрушения образца $\sigma=a\Delta l$, где Δl — смещение ($\Delta l=r_{00}-r_0$), и принимая для ионной решетки $r_0=2$ Å, $r_\infty=10$ Å, $\sigma=6\cdot10^{-5}$ дин на связь, определим массу и характерный объем гранита, в котором генерируются сигналы акустической эмиссии. Соответственные величины будут иметь значение $m_э=5\cdot10^{-7}$ г и $V_э=6\cdot10^{-4}$ мм^3. Такой упрощенный расчет позволяет выявить объем, в котором происходит процесс элементарного разрушения.

Продолжительность разрушения составляет 0,08—0,18 с, при этом изменяется частота сигналов эмиссии. Вначале она имеет значение 6—8 кГц (максимальное значение), и уменьшается к концу разрушения до десятков герц. Используя модельные представления гармонического осциллятора, можно (фиг. 5) проследить механизм процесса разрушения гранита. Возникшая трещина растет со скоростью упругого возмущения до того момента, когда ее развитие будет ограничено другой трещиной. Однако процесс разрушения на этом не локализуется. Видимо, в плоскости будущего скола развиваются сразу несколько трещин (в пользу этого предположения свидетельствует наличие в спектрограмме по крайней мере одновременно двух импульсов: высокой и низкой частот (фиг. 4, *б*)), и большинство из них заканчивает свой рост на имеющихся в образце микротрещинах. Этот процесс (участок *2*) продолжается до тех пор, пока в сечении будущего разрушения не накопится достаточное количество дефектов и не станет возможным развитие магистральной микротрещины (участок *3* фиг. 5).



Фиг. 5. Изменение эффективной массы гранита $m_э$(г) в объеме разрушения от времени τ (с)

Таким образом, акустические исследования материала под нагрузкой могут вестись по двум направлениям. В первом случае исследования зависимостей α, $v=f(\sigma)$ позволяют получать информацию о структурных особенностях (наличии трещин, пор, их преимущественной ориентации). Это направление можно определить как активный акустический контроль. Во-вторых, анализ спектрограмм сигналов акустической эмиссии до и в процессе разрушения интересен для изучения прочностных свойств и кинетики разрушения.

Практическую ценность оба направления могут иметь для прогнозирования возникновения критической ситуации в напряженных конструкциях.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Matsushima S.* Compressional and shear wave velocities of volcanic rocks and glasses to 900° C at 20 kbar. High-Pressure Sci and Technol. Proc. 6th AIRAPT Conf., Boulder, Colo, 1977, New York — London, 1979, *2*, 216–222.
2. Физические свойства горных пород и минералов при высоких давлениях и температурах. Сб. под ред. Любимова Е. А. М., «Наука», 1978, 254.
3. *Bonner B. P.* Shear wave birefringence in dilating granite. Geophys. Res. Lett., 1974, *1*, 5, 217–220.
4. *Николаевский В. Н., Лившиц Л .Д., Сизов И. А.* Механические свойства горных пород. Деформации и разрушение. «Механика деформируемого твердого тела (Итоги науки и техники)». М., ВИНИТИ, 1978, 123–250.
5. *Труэлл Р., Эльбаум Ч., Чик Б.* Ультразвуковые методы в физике твердого тела. М., «Мир», 1972, 149–180.
6. *Рикитаке Т.* Предсказание землетрясений. М., «Мир», 1979, 272–278.
7. Справочник (кадастр) физических свойств горных пород под ред. акад. Мельникова Н. В. М., «Недра», 1975.
8. *Мак-Скимин Г.* Физическая акустика под ред. Мэзона У., часть А, т. 1. М., «Мир», 1966, 357–361.

9. *Matsushima S.* Variation of the elastic wave velocities of rocks in the process of deformation and fracture under high pressure, Bull. Disas. Prev. Res. Inst., Kyoto Univ., 1960, 32, 2–63.
10. *Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М.* Механика сплошных сред. М., Гостехтеориздат, 1954.
11. *Scholz C. H.* Microfracturing of Rock in Compression, Thesis, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge Mass., 1967.
12. *Scholz C. H.* Experimental study of the fracturing process in brittle rock. J. Geophys. Res., 1968, *73*, 1447.
13. *Brace W. F.* Current laboratory studies pertaining to earthquake prediction. Tectonophysics, 1968, *6*, 75.
14. *Ranachowski J.* Propagation of ultrasonic waves in porous ceramics. Ultrasonics, 1975, *13*, 5, 203–207.
15. *Brace W. F., Paulding (Jr) B. W., Scholz C. H.* Dilatancy in the fracture of crystalline rocks. J. Geophys. Res., 1966, *71*, 3939.
16. *Kempter G.* Organisch — chemisches practikum fur das Grundstudium. Veb. Deutscher Verlag der Wissenschaften, Berlin, 1971, 55–60.
17. *Mogi K.* Study of the elastic shocks caused by the fracture of heterogencons materials and its relation to earthquake phenomena. Bull. Earthquake Res. Inst. Univ. Tokyo, 1962, *40*, 125.
18. *Byerlee J. D.* Frictional characteristics of granite under high confining pressure. J. Geophys. Res., 1967, *72*, 3639.
19. *Кобеко П. П.* Аморфные вещества. М.– Л., Изд-во АН СССР, 1952, 8–9, 212–232.

Институт проблем механики
Академии наук СССР

Поступила
12 июля 1979 г.