

УДК 622.011

**ХАРАКТЕРИСТИКИ ЗАТУХАНИЯ УПРУГИХ ВОЛН  
И ИХ ЗАВИСИМОСТЬ ОТ МИКРОСТРУКТУРЫ ГОРНЫХ ПОРОД**

**Кс. Л. Лиу, М. С. Хан, Кс. Б. Ли, Дж. Х. Чу, Ж. Лиу**

*Центральный южный университет, E-mail: lxenglish@163.com,  
410083, г. Чангша, провинция Хунань, Китай*

Исследованы характеристики затухания упругих волн с помощью системы измерения акустической эмиссии РС1-2. Для изучения затухания волн в горных породах применялся метод перелома графитового стержня карандаша, а в красном песчанике, ввиду того что изменение центроидной частоты отличается от других пород, — метод удара стальным шариком. Установлено, что амплитуда сигнала упругой волны уменьшается с увеличением расстояния распространения волны. При достижении определенного расстояния распространения упругой волны в красном песчанике центроидная частота возрастает. Показано, что на затухание упругой волны влияют упаковка породы минеральными частицами, наличие трещин и слоистая структура, т. е. более сложное внутреннее строение повышает коэффициент затухания. Рекомендованы датчики с широким диапазоном резонансных частот, располагаемыми на всем пути распространения упругой волны.

*Упругая волна, коэффициент затухания, частотные характеристики затухания, микроструктура горной породы*

DOI: 10.15372/FTPRPI20200208

Энергия упругих волн при распространении расходуется на геометрическое рассеивание, внутреннее трение и модальную конверсию. С увеличением расстояния распространения амплитуда и частота упругой волны уменьшаются (эффект затухания) [1]. При распространении волны в породе происходит трение по поверхностям частиц породы, приводящее к преобразованию механической энергии в тепло. Это основная причина снижения амплитуды и частоты при движении волны [2, 3]. Степень затухания упругой волны связана со средой, в которой распространяется волна, например в горных породах неравномерная внутренняя структура определяет характеристики затухания, используемый при оценке источников сейсмической активности.

Многие научные работы посвящены изучению характеристик затухания сейсмических волн в горной породе. Ключевые факторы, влияющие на затухание, — трение, течение жидкости, вязкость и диффузия [4]. Затухание амплитуды сейсмической волны связано с такими параметрами, как степень напластования, скорость распространения и частоты волн, коэффициенты затухания  $P$ - и  $S$ -волн [4–6]. Часто используется  $Q$ -фактор — обобщенный параметр для описа-

Работа выполнена при помощи Национальной исследовательской программы Китая (грант № 2016YFC0600706) и Фонда естественных наук провинции Хунань (грант № 2016JJ3148).

ния затухания упругой волны [7]. В [8–11] предложены варианты его определения. Выбор варианта расчета основывается на конкретных геологических условиях и целях исследования. В общем случае  $Q$ -фактор не связан с частотой упругой волн и зависит от давления и температуры, а также от механических свойств породы: проницаемости, степени уплотнения, пористости и упругости [12, 13].

Наряду с традиционными методами расчета  $Q$ -фактора разрабатываются томографические, которые применяются для одновременного расчета нескольких значений  $Q$ -фактора и показывают его распределение с помощью инверсии [14]. Исследования, посвященные затуханию упругих волн, часто направлены на экспериментальные испытания по определению изменения частотной зависимости упругих волн с помощью новых методов обработки сигналов. В [15] выполнены замеры влияния напряжений на затухания нормально падающей  $P$ -волны в образцах угля, продемонстрировавшие соответствие изменения давления с  $Q$ -фактором. В [16] изучены частотные характеристики микросейсмических сигналов с помощью вейвлет-преобразования и преобразования Фурье и установлено, что частота обладает четырьмя различными тенденциями к изменению, связанными с их амплитудой.

Регистрация акустической эмиссии используется в лабораторных испытаниях горных пород как эффективная методика обнаружения процессов формирования трещин и изучения нестационарных упругих волн, образованных скоротечным высвобождением энергии в небольших объемах породы. Поскольку исследования в области акустической эмиссии и сейсмологии связаны с возникновением и распространением упругих волн при различных масштабах и диапазонах частот, то параметры затухания сигналов акустической эмиссии в небольших образцах породы применяются для точной локализации трещин [17]. По форме сигналы делятся на непрерывные и затухающие. Сигналы, генерируемые трещинами от растяжения и сдвига, характеризуются собственной частотой [18–20]. Так как частотные компоненты сигналов акустической эмиссии зависят от параметров трещины, то параметры затухания таких сигналов различны [21, 22]. В [23–25] проанализирован процесс распространения волн акустической эмиссии и предложено уравнение, описывающее изменение их амплитуды.

Микроструктурный состав различных горных пород имеет широкий диапазон параметров, определяющий их макросвойства. Затухание упругих волн связано с внутренней структурой и составом породы. Методы перелома графитового стержня карандаша и удара стальным шариком применяют для проверки эффективности измерений акустической эмиссии системой после установки датчиков и соединения их с оборудованием, так как сигналы, генерируемые такими методами, устойчивы, повторяемы и просты. В настоящей работе использовался метод перелома графитового стержня карандаша для исследования характеристик затухания упругих волн в граните, мраморе, песчанике и известняке, а также метод удара стальным шариком для красного песчаника, так как изменение центроидной частоты у него отличается от образцов других горных пород. Взаимосвязь между затуханием упругих волн и микроструктурой различных пород проанализирована с помощью исследования их микроструктуры оптическим методом на основе определения показателя преломления.

#### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКИ ЭКСПЕРИМЕНТА

Для регистрации сигналов применялись система акустической эмиссии PCI-2 и датчик NANO30 (США) с резонансной частотой 140 кГц. Сигналы усиливались до 40 дБ. Пороговое значение сигнала 40 дБ, частота дискретизации для PCI-2 1 млн выборок в секунду. Гранит, мрамор, песчаник и известняк разрезали на прямоугольные стержни длиной 2000, 1960, 1810 и 1300 мм, шириной и высотой 40 мм. В таблице приведены размеры образцов, плотности по-

род и скорости распространения в них продольной волны. В связи с различной длиной образцов породы параметры затухания в граните, мраморе и красном песчанике измерялись на расстоянии 1700 мм, в известняке — 1250 мм.

Плотность, скорость распространения волны и размеры образцов пород

| Горная порода    | Параметры, мм |        |        | Скорость Р-волны, м/с | Объемная плотность, г/см <sup>3</sup> |
|------------------|---------------|--------|--------|-----------------------|---------------------------------------|
|                  | длина         | ширина | высота |                       |                                       |
| Гранит           | 2000          | 40     | 40     | 4201.3                | 2.620                                 |
| Мрамор           | 1960          |        |        | 6597.5                | 2.605                                 |
| Красный песчаник | 1810          |        |        | 3164.3                | 2.352                                 |
| Известняк        | 1330          |        |        | 6197.6                | 2.711                                 |

Источником упругих волн служил перелом графитового стержня карандаша. Из-за различной длины образцов пород и для предотвращения регистрации сигнала отраженных волн датчик закреплялся от края гранитного и мраморного образцов на расстоянии 50 мм, от края известнякового образца — 40 и от края песчаного образца — 30 мм. Интервал между точками перелома графитового стержня карандаша составлял 50 мм. Для четкого отличия каждого сигнала перелом осуществляли через 5 с по шесть раз. Расположение точек перелома графитового стержня карандаша и датчика акустической эмиссии показано на рис. 1.

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Метод перелома графитового стержня карандаша применяется для проверки эффективности системы акустической эмиссии после установки датчика и подключения оборудования и обеспечивает необходимую информацию по характеристикам акустической эмиссии в упругих материалах. Сигналы от перелома стержня устойчивы, повторяемы и просты. Временные диаграммы сигналов в точке установки датчика и на расстоянии 1200 мм от нее показаны на рис. 2.

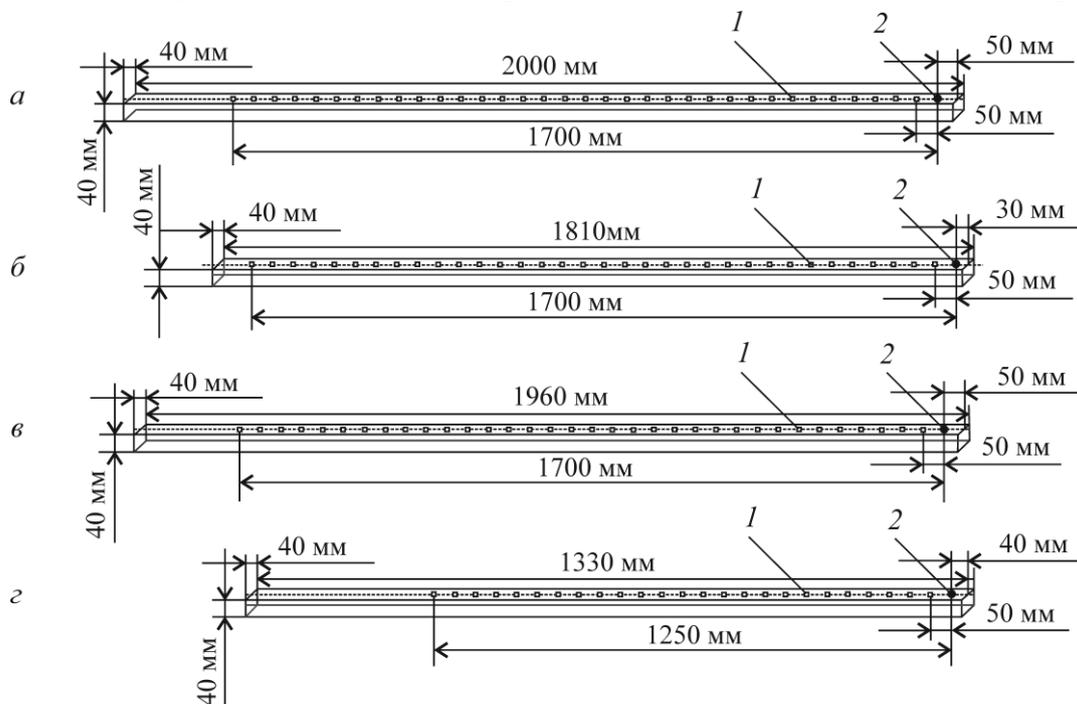


Рис. 1. Расположение точек перелома графитового стержня карандаша и датчика акустической эмиссии для гранита (а), красного песчаника (б), мрамора (в) и известняка (г): 1 — расположения точки перелома графитового стержня карандаша; 2 — датчик акустической эмиссии

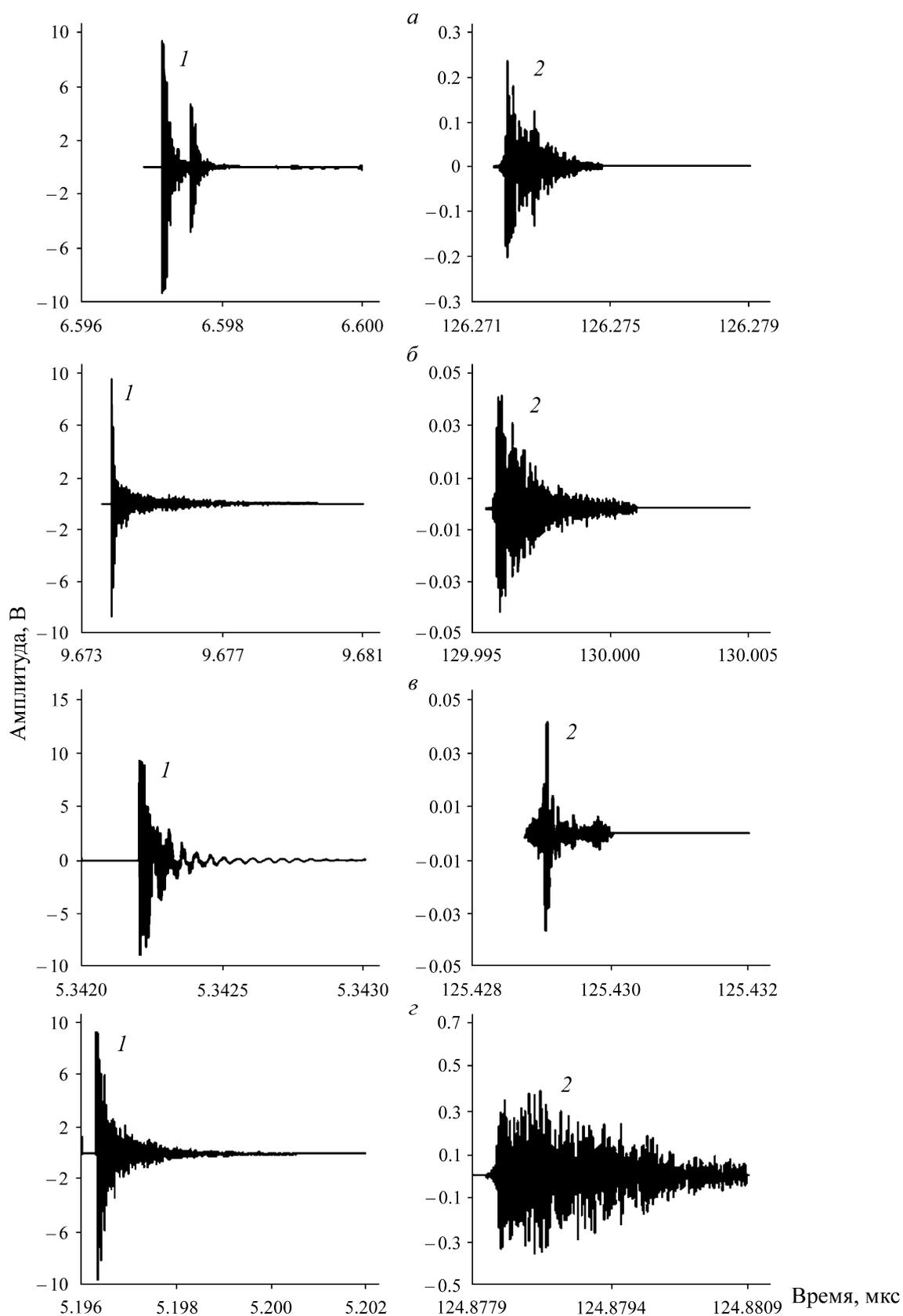


Рис. 2. Временные диаграммы сигнала перелома графитового стержня карандаша для гранита (а), мрамора (б), красного песчаника (в) и известняка (г) в точке установки датчика (1) и на расстоянии 1200 мм от него (2)

Характер затухания упругих волн в исследуемых образцах представлен на рис. 3а. Изменение амплитуды четырех типов горной породы показывает одинаковую тенденцию, отличаясь степенью изменения. Амплитуда первого сигнала перелома графитового стержня карандаша возле датчика акустической эмиссии у всех типов пород составляет 99 дБ, затем по мере удаления точки перелома графитового стержня карандаша от датчика уменьшается у мрамора до 83 дБ, известняка — 72 дБ, гранита — 67 дБ и песчаника — 40 дБ. На малых расстояниях амплитуда быстро уменьшается, затем изменение приобретает умеренный характер.

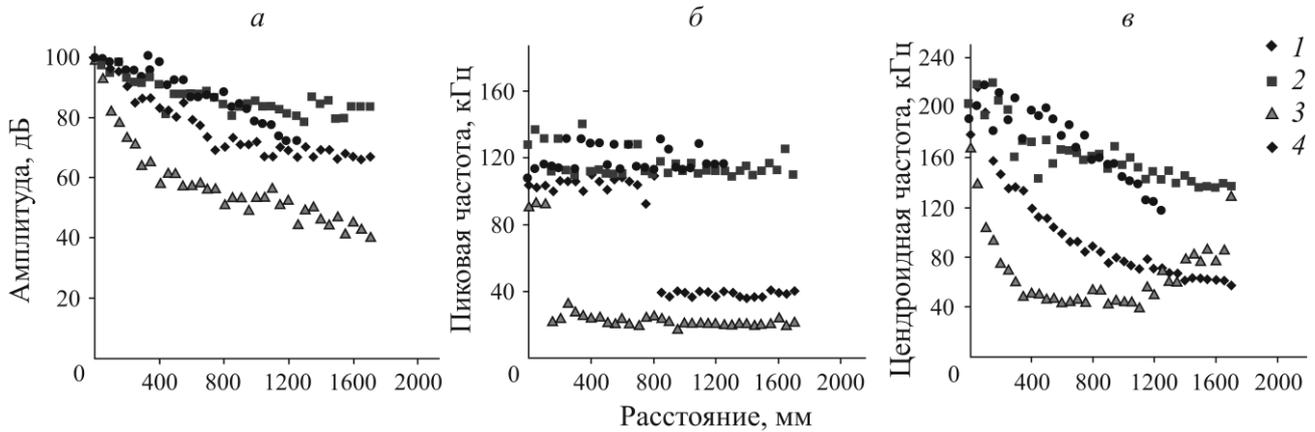


Рис. 3. Изменение амплитуды (а), пиковой (б) и центроидной (в) частоты в зависимости от расстояния распространения волны: 1 — гранит; 2 — мрамор; 3 — красный песчаник; 4 — известняк

Пиковая частота относится к частоте с максимальным значением в энергетическом спектре и применяется для анализа спектральных характеристик заданного сигнала. При оценке сейсмического источника пиковая частота принимается главной частотой сигнала и используется для обнаружения источника. На рис. 3б показано изменение пиковой частоты для четырех типов породы: уменьшение с 90 до 40 кГц после прохождения сигнала от перелома графитового стержня карандаша расстояния 800 мм для гранита и 100 мм для песчаника, у мрамора и известняка остается на уровне ~ 120 кГц.

На рис. 3в представлено изменение центроидной частоты сигнала от перелома графитового стержня карандаша в соответствии с пройденным расстоянием. Тенденция снижения изменения у гранита, мрамора и известняка схожа, но у красного песчаника она достигает минимума на расстоянии ~ 800 мм, а затем повышается. Причинами такого явления служат реакция датчика, сопряжение датчика и образца, аномальность образца или микроструктура песчаника.

Характеристики затухания упругой волны описываются коэффициентом затухания:

$$\alpha = \frac{1}{\Delta x} \ln \frac{A_1}{A_2},$$

где  $\Delta x$  — расстояние распространения волны;  $A_1$  — амплитуда упругой волны в заданный момент времени;  $A_2$  — амплитуда упругой волны, распространенной на расстояние  $\Delta x$  от точки  $A_1$  [12, 13]. Коэффициент затухания для гранита составил  $3.01 \cdot 10^{-4}$ , мрамора —  $1.67 \cdot 10^{-4}$ , красного песчаника —  $5.37 \cdot 10^{-4}$  и известняка —  $2.65 \cdot 10^{-4}$  ( $\Delta x = 1200$  мм).

Для установления зависимости между коэффициентом затухания и микроструктурой породы выполнены эксперименты по определению показателя преломления (рис. 4). Из-за меньшей объемной плотности и свободного расположения минеральных частиц энергия распространения упругой волны в красном песчанике снижается в более высокой степени (рис. 4а). Значительная часть механической энергии преобразуется в тепловую, что приводит к наибольшему коэффициенту затухания среди исследуемых пород. Мрамор имеет меньшие и более упакованные частицы и обладает наименьшим коэффициентом затухания (рис. 4б). Известняк, подобно песчанику, относится к осадочным породам, его хорошая целостность и близкое расположение частиц определяет малый коэффициент затухания. В результате развития трещин в известняке происходит модальная конверсия, так как прохождение упругой волны через трещины обуславливает потерю энергии и больший коэффициент затухания, чем у мрамора (рис. 4в). Гранит обладает наибольшей объемной плотностью и размером частиц, но сцементированная или свободная граница между частицами становится причиной быстрого затухания упругих волн (рис. 4г).

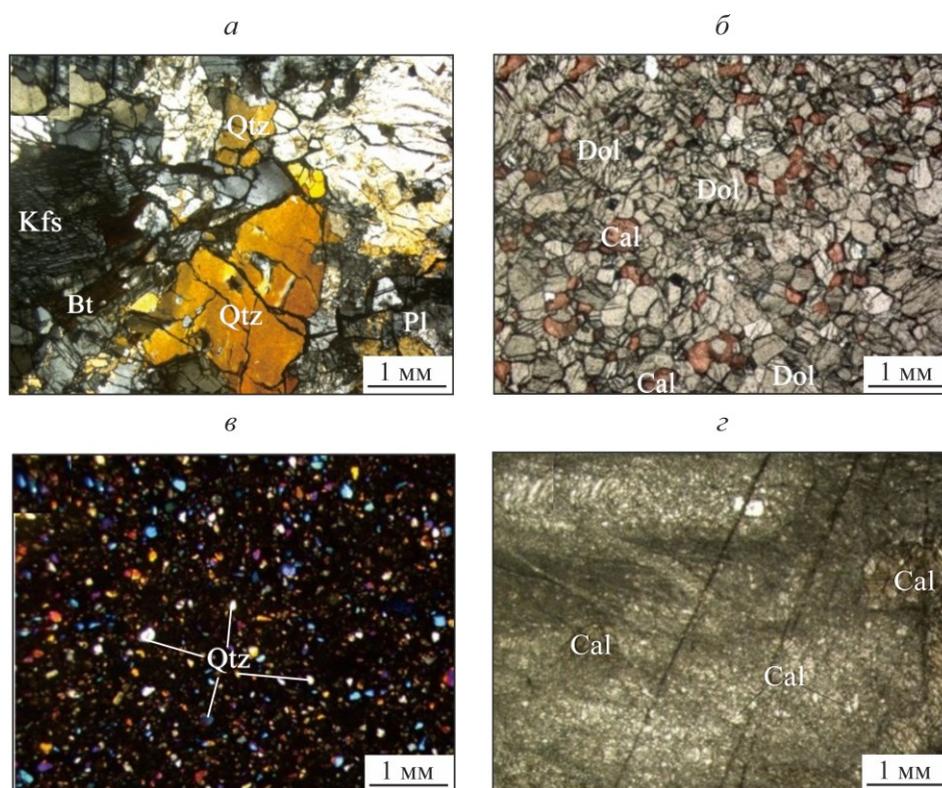


Рис. 4. Микроструктура гранита (а), мрамора (б), красного песчаника (в) и известняка (з) в экспериментах определения показателя преломления

Основной фактор, влияющий на затухание упругой волны, — плотность минеральных частиц в породе. Менее упакованная порода обладает большими коэффициентами затухания. Второй фактор — структурное строение породы (присутствие трещин и слоистости): чем более сложную структуру имеет порода, тем затухание в ней происходит эффективнее.

Изменение центроидной частоты в образцах красного песчаника отличается от других пород. Так как частота упругих волн, генерируемых ударом стальным шариком, меньше и энергия поступающего удара может контролироваться диаметром шарика, дальнейшее изучение изменения центроидной частоты, амплитуды и пиковой частоты в образцах красного песчаника про-

ведено с помощью удара стальным шариком. В данном испытании образец красного песчаника не отличается от испытания с переломом графитового стержня карандаша. В ударных экспериментах использовались стальные шарики диаметром 11.5, 15, 18 и 22 мм, которые закреплялись подвесом на стальном штативе и отпускались из горизонтального положения для перпендикулярного удара по торцу стержня из песчаника. Этот процесс повторялся шесть раз. Одиннадцать датчиков NANO30 прикреплялись к стержню на следующих расстояниях:

Расположение датчиков, мм 0 100 200 400 600 800 1000 1200 1400 1600 1700

Изменение центроидной частоты, амплитуды, пиковой частоты от расстояния распространения упругих волн, сгенерированных ударами четырех шариков с разным диаметром по образцу красного песчаника, представлено на рис. 5. Видно, что изменение этих значений не зависит от диаметра стального шарика.

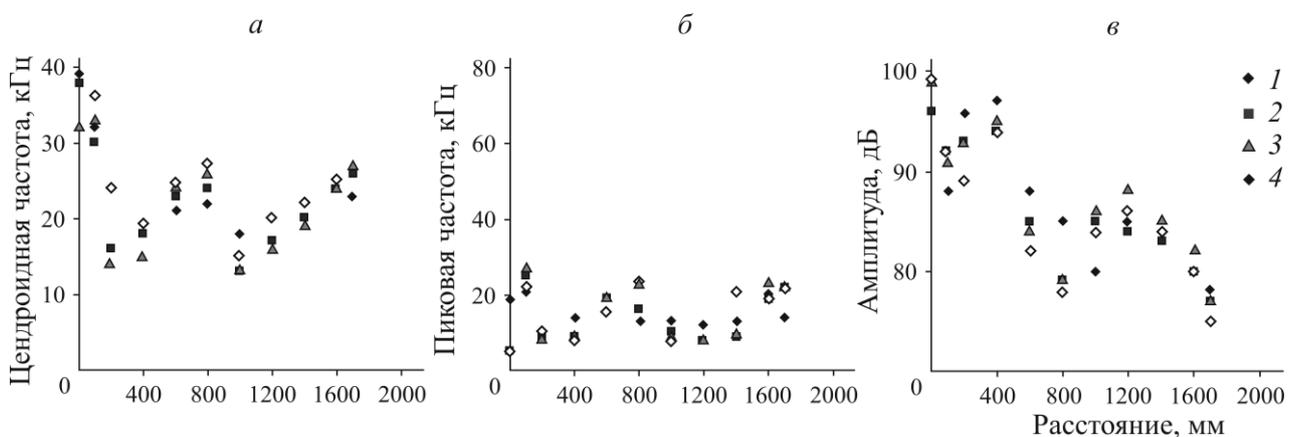


Рис. 5. Изменение центроидной (а), пиковой (б) частоты и амплитуды (в) при ударе стальным шариком диаметром 11.5 (1), 15 (2), 18 (3) и 22 мм (4) по красному песчанику

Для изучения характеристик затухания в песчанике использовались два типа упругих волн, вызванные переломом графитового стержня карандаша и ударом стальным шариком. Тенденция роста центроидной частоты упругой волны после прохождения определенного расстояния не зависит от источника упругих волн. Все испытания выполнены с достаточной точностью, поэтому данная тенденция не связана с ошибками системы мониторинга. Предположим, что данная тенденция связана с типом породы. Центроидная частота сигналов представляет собой геометрический центр энергетического спектра, отражающий характеристики распределения энергетического сигнала в зависимости от их частоты. Возрастание центроидной частоты показывает, что геометрический центр спектра энергетического сигнала смещается к более высоким частотам, вследствие чего увеличивается энергетическая доля высокочастотных составляющих.

Песчаник обладает наибольшим коэффициентом затухания среди исследуемых пород, особенно быстро затухают высокочастотные составляющие. Каждый датчик имеет собственную резонансную частоту (у датчика NANO30 она равна 140 кГц). Он хорошо реагирует на сигналы с частотами между 125 и 750 кГц, а на сигналы с частотами ниже 100 и 40 кГц — плохо. Основная составляющая частоты сигналов, генерируемых переломом графитового стержня карандаша и ударами стального шарика, — 92 и 20 кГц соответственно (рис. 6а, б).

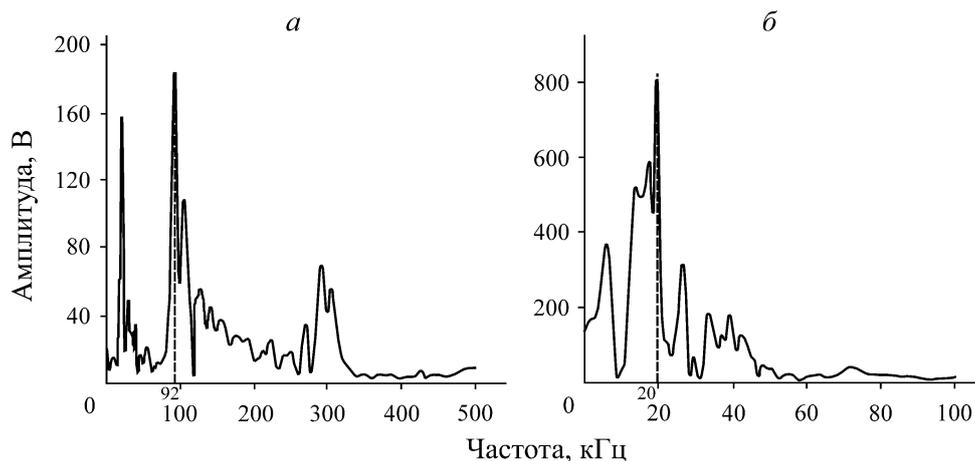


Рис. 6. Частотный спектр сигналов, сгенерированных при переломе графитового стержня карандаша (а) и ударе стальным шариком (б)

На рис. 7 приведена осциллограмма колебаний при испытании ударом стальным шариком с диаметром 11.5 мм. Сильное затухание высокочастотных колебаний в песчанике связано с тем, что пиковая частота сигнала при переломе графитового стержня карандаша резко опускается до 20 кГц. Благодаря низкой чувствительности датчика к низкочастотным составляющим колебаний энергетическая доля высокочастотных составляющих в энергетическом спектре может возрасти после того, как упругая волна пройдет определенное расстояние (рис. 3б).

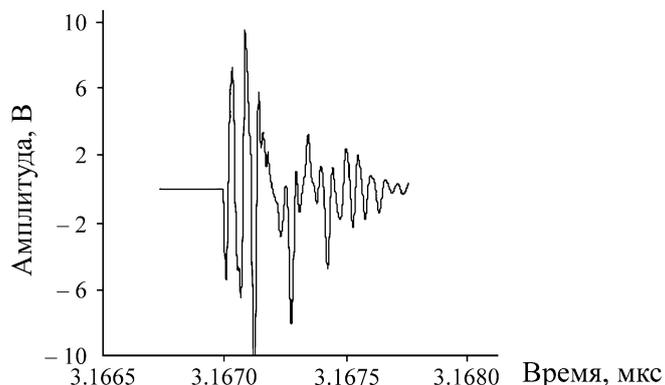


Рис. 7. Исходная временная диаграмма сигнала от удара стальным шариком диаметром 11.5 мм

Сигнал от перелома графитового стержня карандаша обладает более высокой пиковой частотой, чем сигнал от удара шариком (рис. 5). Так как высокочастотные составляющие упругой волны затухают быстрее, то и общее затухание волн при переломе графитового стержня карандаша происходит быстрее, чем при ударе стальным шариком. Для образцов красного песчаника при диаметре стального шарика 11.5 мм коэффициенты затухания составляют  $1.27 \cdot 10^{-4}$ , 15 мм —  $1.11 \cdot 10^{-4}$ , 18 мм —  $9.82 \cdot 10^{-5}$ , а 22 мм —  $1.17 \cdot 10^{-4}$  ( $\Delta x = 1200$  мм). Для песчаника коэффициент затухания при переломе графитового стержня карандаша выше, чем при ударе шарика.

## ВЫВОДЫ

При увеличении расстояния распространения упругих волн их амплитуды и частоты снижаются до разных величин и соответствуют различным параметрам затухания в зависимости от типа горной породы. Основные факторы, влияющие на затухание упругой волны, — состоя-

ние упаковки частиц минерала в породе, а также наличие трещин и слоистости. Характеристики затухания определяются пиковой частотой. В образцах гранита, песчаника после некоторого расстояния пиковая частота резко уменьшается, затем остается стабильной. Эти породы обладают наибольшими коэффициентами затухания, поэтому изменение пиковой частоты можно использовать для обнаружения источника. Затухание в красном песчанике зависит не только от дальности распространения, но и от спектрального состава упругих волн: источник волн с более высокой частотой приводит к большему коэффициенту затухания.

Повышение центроидной частоты в красном песчанике при затухании не связано с источником упругих волн. Песчаник обладает наибольшим коэффициентом затухания среди исследуемых пород, поэтому упругие волны быстро затухают при распространении, особенно высокочастотные составляющие. Пиковая частота сигналов в песчанике резко опускается до 20 кГц. Из-за плохого отклика высокочастотного датчика NANO30 на данную низкочастотную составляющую энергетическая доля высокочастотных составляющих сигнала энергетического спектра повышается после того, как упругая волна пройдет определенное расстояние. Так как датчики обладают собственными резонансными частотами, по-разному реагирующими на различные частотные составляющие, необходимо точно определить тип датчика для измерения затухания. Рекомендуется использовать датчики, способные регистрировать колебания в широком диапазоне частот на всем пути распространения упругой волны.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Hardy J. H. R.** Acoustic emission/microseismic activity, USA, A. A. Balkema Publishers, 2003.
2. **An Y., Mu Y. G., and Fang C. L.** Relationship between attenuation, velocity of sedimentary rocks and petro physical property, *J. Oil Geoph. Prosp.*, 2006, Vol. 41, No. 2. — P. 188–192.
3. **Bai X. Y.** The study on method of layer absorbing parameters extraction based on the theory of seismic wave attenuation, China University of Petroleum, 2008.
4. **Toksoz M. N., Johnston D. H., and Timur A.** Attenuation of seismic waves in dry and saturated rocks: I. Laboratory measurements, *J. Geoph.*, 1979, Vol. 44, No. 4. — P. 681–690.
5. **Futterman W. I.** Dispersive body waves, *J. Geoph. Res.*, 1962, Vol. 67, No. 13. — P. 5279–5291.
6. **White J. E.** Comuted seismic speeds and attenuation in rocks with partial saturation, *Geoph.*, 1975, Vol. 40, No. 2. — P. 224–232.
7. **Knopoff L. and Macdonald G. L.**, Attenuation of small amplitude stress waves in solids, *Rev. of Modern Phys.*, 1958, Vol. 30, No. 4. — P. 1178–1192.
8. **Biot M. A.** Theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solid-low frequency range, *J. of the Acoustical Society of America*, 1956, Vol. 28, No. 2. — P. 168–178.
9. **Engelhard L.** Determination of seismic-wave attenuation by complex trace analysis, *J. Geoph.*, 1996, Vol. 125, No. 2. — P. 608–622.
10. **Parra J. O.** The transversely isotropic poroelastic wave equation including the Biot and the squirt mechanisms theory and application, *J. Geoph.*, 1997, Vol. 62. — P. 309–318.
11. **Parra J. O.** Poroelastic model to relate seismic wave attenuation and dispersion to permeability anisotropy, *J. Geoph.*, 2000, Vol. 65, No. 1. — P. 202–210.
12. **Tonn R.** The determination of the seismic quality factor  $Q$  from VSP data: A comparison of different computational methods, *J. Geoph.*, 1991, Vol. 39, No. 1. — P. 1–27.
13. **Shi X. J., Lu Z. G., and Xu H. M.** The attenuation characteristic of rock's non-linear fracture, *Chinese J. Geoph.*, 1996, Vol. 39, No. Z. — P. 231–237.

14. **Jin Z. Q. and Sun Z. D.** Attenuated travel time tomography method for estimation of seismic attenuation, *J. Appl. Geoph.*, 2017, Vol. 139. — P. 73–78.
15. **Feng J. J., Wang E. Y., Chen L., Li X. L., Xu Z. Y., and Li G. A.** Experimental study of the stress effect on attenuation of normally incident *P*-wave through coal, *J. Appl. Geoph.*, 2016, Vol. 132. — P. 25–32.
16. **Li Z. M., Gou X. T., Jin W. D., Qin N., and Liu J. B.** Frequency features of microseismic signals, *Chinese J. Geotech. Eng.*, 2008, Vol. 30, No. 6. — P. 830–834.
17. **Lockner D.** The role of acoustic emission in the study of rock fracture, *J. Rock Mech. and Min. Sci. and Geomech. Abstracts*, 1993, Vol. 30, No. 7. — P. 883–899.
18. **Vinogradov S. D.** Acoustic observations in collieries of the Kizelsk coal basin, *Bulletin, Izvestiya, Academy of Sci. of the USSR, Geoph. Series*, 1957, No. 6.
19. **Vinogradov S. D.** Experimental study of the distribution of fractures in respect to the energy liberated by the destruction of rocks, *Bulletin, Izvestiya, Academy of Sci. of the USSR, Geoph. Series*, 1962. — P. 171–180.
20. **Buchheim W. W.** Geophysical methods for the study of rock pressure in coal and potash salt mining, Leipzig, *Int. Strata Control Congress*, 1958.
21. **Winkler K. W. and Nur A.** Effects of pore fluids and frictional sliding on seismic attenuation, *J. Geoph.*, 1982, Vol. 47, No. 1. — P. 1–12.
22. **Ma A. J. and Liu Y.** A summary of research on seismic attenuation, *J. Progress in Geoph.*, 2005, Vol. 20, No. 4. — P. 1074–1082.
23. **Zou Y. H., Wen G. C., Hu Q. T., and Xu J. P.** Theory analysis and experimental study of the spread and attenuation of acoustic emission in rock body, *J. China Coal Society*, 2004, Vol. 29, No. 6. — P. 663–667.
24. **Li H. B., Zhao W. Z., Cao H. F., Yao C., and Shao L. Y.** Characteristic of seismic attenuation of gas reservoirs in wavelet domain, *Chinese J. Geoph.*, 2004, Vol. 47, No. 5. — P. 892–898.
25. **Liu W. G., Wang J. M., Gu H. B., Yu R. G., and Pang B. J.** Attenuation of acoustic emission signals from hypervelocity impact on al paltes, *Nondestructive Testing*, 2012, Vol. 34, No. 12. — P. 41–45.

*Поступила в редакцию 04/VI 2019*  
*После доработки 25/VI 2019*  
*Принята к публикации 10/IV 2020*