



**ВЛИЯНИЕ ГОРНОГО ДАВЛЕНИЯ НА СПЕКТРАЛЬНЫЙ СОСТАВ МАЯТНИКОВЫХ ВОЛН,
ВОЗНИКАЮЩИХ В БЛОЧНЫХ СРЕДАХ ПРИ ИМПУЛЬСНОМ НАГРУЖЕНИИ**

Е. Н. Шер, А. Г. Черников

*Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, E-mail: ensher@gmail.com,
Красный проспект 54, г. Новосибирск 630091, Россия*

Представлено исследование влияния внешнего сжатия на параметры сейсмических волн в породном массиве, проведенное экспериментально на одномерных моделях блочных сред при их импульсном нагружении. Показано, что в результате дисперсии по мере распространения волны возмущения в ее головной части наблюдается выделение низкочастотной маятниковой волны. Параметры такой волны определяются массой блоков и податливостью контактных зон на их границах. Внешнее сжатие повышает жесткость указанных зон, приводит к увеличению скорости распространения волн и к изменению их спектрального состава. В модельных экспериментах рассмотрена возможность определения внешнего сжатия по параметрам спектрального состава маятниковых волн.

Блочные горные породы, горное давление, сейсмические волны, импульсное нагружение, экспериментальное моделирование, маятниковая волна, скорость волны, спектр

**INFLUENCE OF ROCK PRESSURE ON SPECTRAL COMPOSITION OF PENDULUM WAVES
IN BLOCK-STRUCTURED MEDIA UNDER PULSED LOADING**

E. N. Sher and A. G. Chernikov

*Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences,
E-mail: ensher@gmail.com, Krasny pr. 54, Novosibirsk 630091, Russia*

Effects of external compression on the parameters of seismic waves in rock mass were investigated. The study was carried out experimentally on one-dimensional models of block-structured media under pulsed loading. It is shown that as a result of dispersion prompted by propagation of perturbations, a low-frequency pendulum wave is observed in its head part. The parameters of such wave are determined by the mass of blocks and deformability of contact zones at their interfaces. External compression enhances the rigidity of such zones thereby causing acceleration in the wave propagation speed and a change in the spectral composition of waves. A possibility of determining external compression by the spectral composition parameters of pendulum waves was investigated in the model experiments.

Block rocks, rock pressure, seismic waves, pulsed loading, experimental modeling, pendulum wave, wave speed, spectrum

Согласно концепции, описанной в работе [1], породный массив представляет собой систему вложенных друг в друга блоков разного масштабного уровня, разделенных прослойками, которые часто имеют более слабую, трещиноватую структуру. Деформирование блочного массива как в статике, так и в динамике происходит в основном за счет деформации таких податливых прослоек, что приводит к выделению в сейсмическом отклике на импульсное воздействие низкочастотных волн маятникового типа [2, 3].

Выполнены теоретические и экспериментальные исследования волноводных свойств одномерных моделей блочных сред, представленных цепочкой упругих стержней, разделенных податливыми прослойками [4–6]. Показано, что для описания распространения волн в таких средах хорошим приближением является представление о движении блоков как недеформируемых тел. При этом достаточно точно описываются возникающие при импульсном воздействии низкочастотные составляющие волны.

Из сравнения расчетов по разработанным моделям с экспериментом следует, что скорость распространения маятниковых волн, их спектральный состав определяются массой блоков и существенно зависят от реологических свойств прослоек, которые в свою очередь зависят от внешнего горного давления. Наличие взаимосвязи величины горного давления и скорости распространения сейсмических волн открывает возможность контролировать горное давление по данным сейсмического каротажа [7, 8].

В настоящей работе приводятся результаты экспериментальных исследований влияния внешнего сжатия блочной среды на спектральный состав сейсмической волны, возникающей при ударном нагружении в блочной среде.

Известно, что в блочных средах распространение волн возможно в определенных частотных диапазонах [9–11]. В простейшей модели блочной среды — одномерной цепочке масс m , соединенных с периодом l линейными пружинами с жесткостью k , — полоса пропускания волн ограничивается сверху величиной резонансной частоты. При этом из-за дисперсии скорость распространения зависит от длины волны. С максимальной скоростью распространяются бесконечно длинные волны. Резонансная частота цепочки масс с пружинами (индекс c) и максимальная скорость распространения волн в ней рассчитываются с помощью выражений:

$$\omega_0^c = 2\sqrt{k/m}, \quad c_g^c = l\sqrt{k/m}. \quad (1)$$

В работе [4] для модели блочной среды, представленной цепочкой упругих стержней, соединенных пружинами, определены также зоны пропускания. Оказалось, что кроме низкочастотной зоны, описывающей распространение длинных волн в диапазоне частот $[0-\omega_0]$, имеется бесконечное число зон более коротких волн, распространяющихся внутри стержней.

Применительно к цепочке упругих стержней длиной l , сечением F , массой m , соединенных пружинами жесткостью k , оказалось:

$$\omega_0 = 2\sqrt{\frac{k}{m(1+\beta/3)}}, \quad \omega_1 = \frac{\pi c}{l}, \quad \omega_2 = \frac{\pi c}{l} \left(1 + \frac{4\beta}{\pi^2 + 4\beta} \right).$$

Здесь $\beta = kl/(FE)$; E — модуль Юнга; c — скорость звука в стержнях.

Вычислены максимальные групповые скорости распространения низкочастотных волн первой зоны:

$$c_g = l\sqrt{\frac{k}{m(1+\beta)}}. \quad (2)$$

Значения резонансной частоты и групповые скорости распространения низкочастотных волн близки к найденным для цепочки масс при малых значениях β , соответствующих случаю прослоек с малой жесткостью.

В работе [4] проведены расчеты спектров волн возмущения цепочки стальных стержней, соединенных пружинами, возникающих при импульсном нагружении. Пример расчета спектральной плотности деформаций стержней показан на рис. 1. Более жирная линия соответствует численным расчетам уравнений, описывающих распространение возмущения по цепочке упругих стержней, тонкая линия в диапазоне низких частот $[0-\omega_0]$ — их аналитическому решению. Видно, что волна, порождаемая ударной нагрузкой в модели блочной среды “упругие стержни–пружины” состоит из высокочастотных резонансных колебаний отдельных блоков и низкочастотных колебаний их коллективного движения.

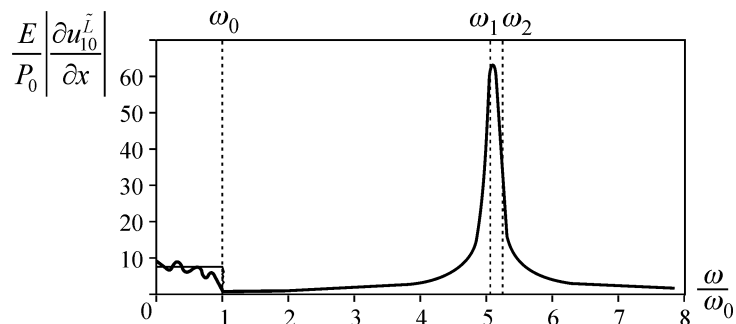


Рис. 1. Спектральная плотность деформации 10-го стержня в его центре, отнесенная к амплитуде нагружающего напряжения P_0

Задача экспериментального исследования — зафиксировать распространение возмущений по блочной модели при импульсном нагружении, найти скорость распространения низкочастотной волны и параметры ее спектра при различных значениях внешнего сжатия.

В качестве модели блочной среды использована вертикально расположенная одномерная сборка пяти блоков из мрамора массой $m = 9.5$ кг с размерами $150 \times 150 \times 150$ мм, размещенная в гидравлическом прессе. На блоках установлены акселерометры KD91. Крепление акселерометров выполнялось с помощью пластилина. Все сборки приводились в сжатое состояние при помощи гидравлического пресса, что создавало в них сжатие до 60 или 2670 кПа из расчета на площадь грани блока. На верхний блок усилие передавалось через муфту, внутри которой располагался ударник, с закрепленным на нем акселерометром 8309 фирмы Brüel&Kjær для фиксации интенсивности удара. Все акселерометры подключены через усилители заряда 2635 фирмы Brüel&Kjær к АЦП Е-1440 и далее — к компьютеру, на котором осуществлялась запись сигнала и хранение данных.

Исследования выполнялись при естественном контакте блоков, полученных в результате выпиливания алмазной пилой, без введения дополнительных прослоек. Пример записи ускорений колебаний 1, 3 и 5-го мраморных блоков в сборке при разной степени ее продольного сжатия представлен на рис. 2.

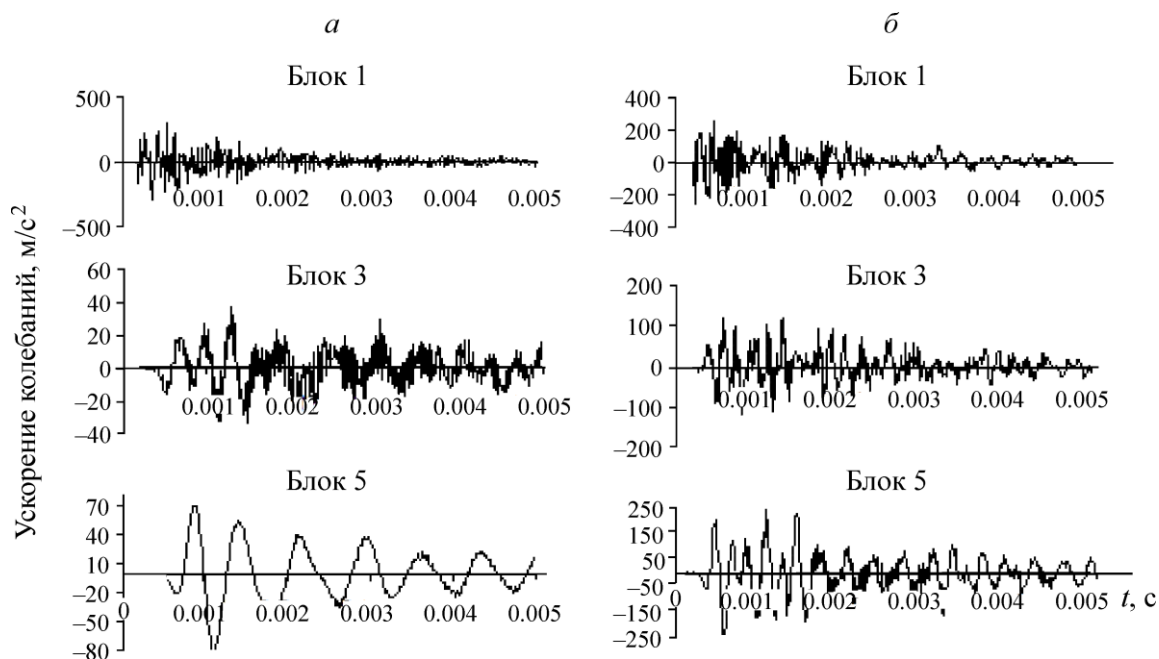


Рис. 2. Осциллограммы ускорений колебаний 1, 3, 5-го мраморных блоков в сборке, сжатой давлением 78 кПа (а) и 2600 кПа (б), при ударном нагружении

Для движения блоков вблизи точки приложения импульсного нагружения характерно возбуждение их собственных колебаний. По мере распространения волны возмущения по сборке такие колебания затухают, и тем быстрее, чем больше их частота. Как видно на рис. 2, дальность распространения высокочастотных колебаний увеличивается с ростом сжатия сборки. Вдали от точки удара в головной части волны выявляется ее низкочастотная составляющая маятникового типа, обусловленная взаимодействием блоков через податливые прослойки. В результате обработки осциллограмм ускорений блоков определялась скорость распространения волн вдоль сборки.

Скорость низкочастотной маятниковой волны, которая является максимальной групповой скоростью распространения волн в блочной среде c_g , вычислялась по моментам времени, при которых достигается максимальное значение первого пика ускорения. Такая методика следует из расчетов по простой модели блочной среды — цепочке масс, соединенных пружинами, согласно которым распространение маятниковой волны при больших временах описывается функцией Эри. Для этой функции показано, что распространение первого пика ускорения перемещения происходит со скоростью квазифронта маятниковой волны. Зависимость скорости маятниковой волны от сжатия p экспериментальной сборки приведена на рис. 3 (кривая 1).

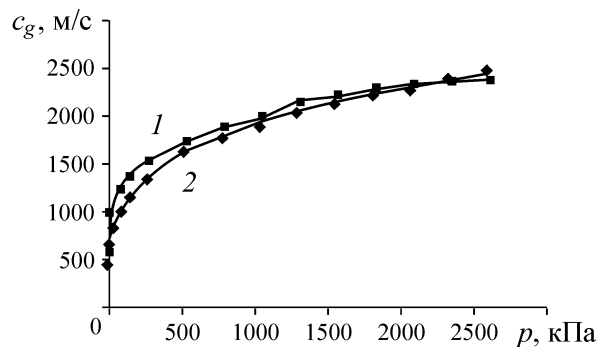


Рис. 3. Зависимость скорости распространения маятниковой волны по сборке блоков из мрамора от разной степени ее сжатия при ударном нагружении (кривая 1); кривая 2 соответствует интерполяционной зависимости (4)

Видно, что в эксперименте скорость распространения низкочастотной маятниковой волны быстро увеличивается на начальном этапе роста внешнего сжатия до ~ 1000 кПа. При последующем повышении сжатия увеличение скорости распространения волн замедляется. Одно из объяснений этого эффекта дано в работе [12], где из анализа нескольких экспериментов с блоками, отличающимися качеством обработки граней, делается вывод, что увеличение сжатия на начальном этапе приводит к быстрому увеличению площади контактов между соседними блоками, что в свою очередь повышает общую жесткость зоны контактов между блоками и приводит, в соответствии с (1), к росту скорости низкочастотной маятниковой волны. Зависимость скорости распространения низкочастотных волн от сжатия может использоваться для контроля за изменением внешнего сжатия, обусловленного горным давлением.

Из формул (1), определенных для модельной блочной среды “массы – пружины”, следует, что скорость распространения низкочастотных волн в такой среде связана с граничной частотой пропускания ν_g^c соотношением:

$$c_g^c = l\omega_g^c / 2 = \pi l \nu_g^c. \quad (3)$$

Согласно (3) для контроля за изменением внешнего сжатия кроме скорости распространения низкочастотных волн можно использовать данные о граничной частоте их спектра. Спектральный анализ данных эксперимента подтвердил это заключение. Для примера на рис. 4а приведена зависимость спектральной плотности S ускорения от частоты ν 3-го блока сборки, полученное при ее сжатии давлением 520 кПа. Видно, что волна возмущения, распространяю-

щаяся по сборке мраморных блоков, состоит из группы низкочастотных волн (до 8 кГц) маятниковой волны и высокочастотных (начиная с 10 кГц), соответствующих собственным колебаниям блоков, эти колебания представлены множеством пиков.

Изменение граничной частоты спектра маятниковой волны v_g с ростом внешнего сжатия показано на рис. 4б (кривая 1). Вид этой кривой очень похож на зависимость скорости маятниковой волны от степени сжатия (рис. 3). Значения v_g , полученные в эксперименте, также могут быть использованы для контроля за величиной напряжений горного давления.

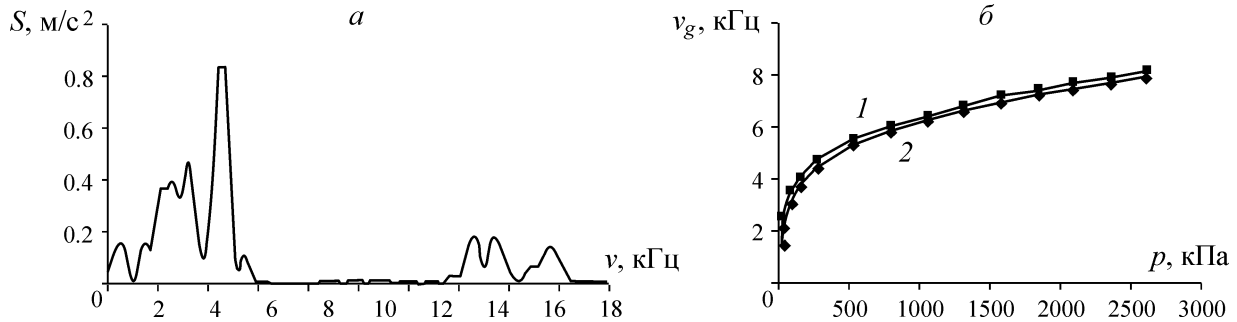


Рис. 4. Изменение спектральной плотности ускорения 3-го блока сборки при сжатии 520 кПа (а) и зависимость граничной частоты спектра маятниковой волны от величины сжимающего сборку напряжения (б) (кривая 1), кривая 2 — интерполяционная зависимость (5)

В работе [12] показано, что для экспериментальныхборок блоков из разных материалов жесткость прослоек увеличивается с ростом сжатия пропорционально квадратному корню из напряжения сжатия. Примем $k = k_0 \sqrt{\sigma}$, где σ — напряжение внешнего сжатия. Значение k_0 можно найти из выражения (1), приняв, что оно выполняется при максимальном напряжении сжатия $\sigma_{\max} = 2.6$ МПа сборки мраморных блоков. В этом случае скорость маятниковой волны $c_g(\sigma_{\max}) = 2400$ м/с и $k_0 = 1.49 \cdot 10^6$ Н^{1/2}. Подставляя это значение в (1), получаем выражение для скорости маятниковой волны при разном сжатии экспериментальной сборки:

$$c_g = l \sqrt{k_0 / m} \sigma^{1/4} = 59.3 \sigma^{1/4} \text{ м/с.} \quad (4)$$

Здесь $l = 0.15$ м, $m = 9.5$. На рис. 3 рассчитанные таким образом значения нанесены ромбиками (кривая 2). Видно хорошее соответствие со значениями скорости маятниковой волны, определенной по осциллограммам ускорений блоков.

Аналогичным образом из (1) построена интерполяционная зависимость для граничной частоты спектра колебаний маятниковой волны

$$v_g = \omega / 2\pi = \frac{1.57}{\pi} \sqrt{\frac{k_0}{m}} \sigma^{1/4} = 197.8 \sigma^{1/4}, \quad (5)$$

которая приведена на рис. 4б (кривая 2). Сравнение экспериментальных зависимостей скорости маятниковых волн и граничной частоты спектра от степени сжатия сборки блоков с интерполяционными зависимостями (4), (5) показывает их удовлетворительное количественное соответствие.

ВЫВОДЫ

Спектр возмущений в блочной среде, возникающих при импульсном нагружении, определяется частотами собственных колебаний отдельных блоков и частотным спектром их коллективных движений. По мере распространения возмущений по сборке собственные колебания затухают тем быстрее, чем больше их частота. Вдали от точки удара в колебаниях блоков выявляется низкочастотная волна маятникового типа, определяемая их взаимодействием через податливые прослойки.

Внешнее сжатие блочной среды оказывает большое влияние на скорости распространения волн и их спектральный состав, что объясняется увеличением с ростом сжатия числа работающих контактов на границах блоков и их суммарной площади. Данные о скорости волн и значении граничной частоты спектра маятниковой волны могут быть использованы для контроля за изменениями внешнего сжатия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. **Sadovskiy M. A.** Natural lumpiness of rock, Proceedings of the Academy of Sciences, 1979, vol. 247, no. 4, pp. 829–832 (in Russian) [**Садовский М. А.** Естественная кусковатость горной породы // ДАН СССР. — 1979. — Т. 247. — № 4. — С. 829–832.]
2. **Kurlenya M. V., Oparin V. N., and Vostrikov V. I.** On the formation of elastic wave packets with pulsed excitation of block media. Waves of the pendulum type, Proceedings of the Academy of Sciences, 1993, vol. 333, no. 4, pp. 3–13 (in Russian) [**Курленя М. В., Опарин В. Н., Востриков В. И.** О формировании упругих волновых пакетов при импульсном возбуждении блочных сред. Волны маятникового типа U_μ // ДАН СССР. — 1993. — Т. 333. — № 4. — С. 3–13.]
3. **Kurlenya M. V., Oparin V. N., and Vostrikov V. I.** Waves of the pendulum type. Part II: Experimental Methods and Main Results of Physical Modeling, Journal of Mining Science, 1996, no. 4, pp. 3–38 [**Курленя М. В., Опарин В. Н., Востриков В. И.** Волны маятникового типа. Ч. II: Методика экспериментов и основные результаты физического моделирования // ФТПРПИ. — 1996. — № 4. — С. 3–38.]
4. **Alexandrova N. I.** On the Propagation of Elastic Waves in a Block Medium under Pulsed Loading, Journal of Mining Science, 2003, no. 6, pp. 38–47 [**Александрова Н. И.** О распространении упругих волн в блочной среде при импульсном нагружении // ФТПРПИ. — 2003. — № 6. — С. 38–47.]
5. **Aleksandrova N. I. and She E. N.** Modeling the process of wave propagation in block media, Journal of Mining Science, 2004, no. 6, pp. 49–57 [**Александрова Н. И., Шер Е. Н.** Моделирование процесса распространения волн в блочных средах // ФТПРПИ. — 2004. — № 6. — С. 49–57.]
6. **Aleksandrova N. I., Chernikov A. G., and Sher E. N.** On the Attenuation of Pendulum Waves in a Block Rock Array, Journal of Mining Science, 2006, no. 5, pp. 67–74 [**Александрова Н. И., Черников А. Г., Шер Е. Н.** О затухании маятниковых волн в блочном массиве горных пород // ФТПРПИ. — 2006. — № 5. — С. 67–74.]
7. **Mashinskii E. I.** Nonlinear amplitude-frequency characteristics of attenuation in rock under pressure, Journal of Geophysics and Engineering, 2006, no. 3.
8. **Kolesnikov Yu. I., Fedin K. V., and Yemanov A. F.** On the detailed study of the resonance properties of the upper part of the section for microseisms: data of physical modeling, Seismic technology, 2013, no. 3, pp. 52–63 (in Russian) [**Колесников Ю. И., Федин К. В., Еманов А. Ф.** О детальном изучении резонансных свойств верхней части разреза по микросейсам: данные физического моделирования // Технология сейсморазведки. — 2013. — № 3. — С. 52–63.]
9. **Slepyan L. I.** Nonstationary elastic waves, Leningrad, Sudostroenie, 1972, 376 pp. (in Russian) [**Слепян Л. И.** Нестационарные упругие волны. — Л.: Судостроение, 1972. — 376 с.]
10. **Slepyan L. I. and Yakovlev Yu. S.** Integral Transforms in Nonstationary Problems of Mechanics, Leningrad, Sudostroenie, 1980, 344 pp. (in Russian) [**Слепян Л. И., Яковлев Ю. С.** Интегральные преобразования в нестационарных задачах механики. — Л.: Судостроение, 1980. — 344 с.]
11. **Slepyan L. I.** Models and Phenomena in Fracture Mechanics, Springer, 2002.
12. **Sher E. N. and Chernikov A. G.** Simulation of the propagation of pendulum waves in block rocks under conditions of external compression, Interexpo GEO-Siberia, Subsoil use. Mining. Directions and technologies of prospecting, exploration and development of mineral deposits. Geo-ecology, Sat. material, XIV International scientific conf., 2018, vol. 5, Novosibirsk, SSGA, pp. 231–238 (in Russian) [**Шер Е. Н., Черников А. Г.** Моделирование распространения маятниковых волн в блочных горных породах в условиях внешнего сжатия // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Геоэкология: сб. трудов XIV Междунар. науч. конф. — Новосибирск: СГГА, 2018. — Т. 5. — С. 231–238.]