

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РАЗРУШЕНИЯ
СТРУКТУРНЫХ БЛОКОВ НА ПАРАМЕТРЫ РАСПРОСТРАНЕНИЯ
ПРОДОЛЬНЫХ ВОЛН В ПОРОДНОМ МАССИВЕ

Ван Кайсин^{1,2}, У Бин², Пань Ишань², А. П. Хмелинин³, А. И. Чанышев³

¹Ляонинский технический университет, Ордосский исследовательский институт,
E-mail: kaixing_wang@163.com, просп. Нейменгу, 017000, г. Ордос, Китай

²Ляонинский технический университет, Факультет механики и инженерии,
123000, г. Фусинь, пров. Ляонин, Китай

³Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН,
E-mail: hmelinin@misd.ru, Красный проспект, 54, 630091, г. Новосибирск, Россия

Изучено распространение P -волн в блочном массиве горных пород, составленном из элементов с разрывными нарушениями в поперечном и продольном направлениях. Анализировались скорость продольной волны, ускорения блоков, кинетическая энергия, смещения и частотно-временные зависимости. Установлено, что при нарушениях блочной структуры скорость продольной волны уменьшается, время вступления отклика по ускорениям увеличивается, максимальное ускорение и кинетическая энергия снижаются. При поперечном разрушении блоков их ускорение и кинетическая энергия уменьшаются в окрестности зоны разрушения в большей степени, чем при продольном. При поперечном разрушении доминантная частота ускорения и кинетическая энергия в окрестности зоны разрушения имеют пониженные значения, доминантная частота смещения — повышенное. При продольном разрушении наблюдается задержка во времени вступления доминантных частот отклика блочной модели среды на динамические воздействия в зоне, удаленной от места нарушения структуры.

Блочная структура, нарушения структуры, влияние видов нарушений на распространение продольных волн в блочной модели среды, частотно-временной анализ

DOI: 10.15372/FTPRPI20240203

EDN: QRYZFT

Для оценки рисков, связанных с разработкой полезных ископаемых, требуется исследовать характеристики распространения волн в горном массиве, являющимся блочным из-за многочисленных дефектов в виде трещин [1 – 3]. Структурная иерархия массива пород представлена

Работа выполнена при поддержке Национального фонда естественных наук Китая (проект № 51874163), Программы возрождения талантов Ляонина (проект № XLYC2007021), проекта фундаментальных исследований Департамента образования провинции Ляонин (№ JYTMS20230809), совместного проекта Ордосского научно-исследовательского института и Ляонинского технического университета (№ YJY-XD-2023-026), а также Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (номер гос. регистрации № 124020700085-5).

совокупностью блоков различных размеров, для описания которого используются разные геомеханические инварианты [4, 5]. Иерархия со сложным генезисом породного массива проанализирована в [6]. Открыты нелинейные динамические эффекты в поведении горных пород на больших глубинах при подземных взрывных работах, их описание представлено в виде кинематических законов [7]. Характер распространения волн в блочном массиве пород обусловлен физическими свойствами слоев между блоками [8 – 10]. С помощью экспериментов по динамическому нагружению массива пород исследованы спектральные характеристики движения волн в самонапряженной блочной среде [11], установлена связь между напряженным состоянием пород и нелинейным динамическим откликом в виде аномально низкого трения [12]. В [13] для построения динамических уравнений двумерной блочной модели среды введены вязкоупругие прослойки между блоками, результаты расчетов подтверждены экспериментально. Общее представление о структурных параметрах блочной модели среды с описанием динамических явлений и механизмов деформирования массивов горных пород на больших глубинах дано в [14]. Многоцелевая тестовая система для исследования динамических характеристик глубокозалегающих массивов пород предложена в [15].

Волновые характеристики одномерной модели блочной среды с учетом свойств материала блоков, их размеров, межблочного пространства изучены в [16]. В [17] проанализированы законы распространения волн в массивах, состоящих из гранитных блоков и резиновых прослойек. В [18 – 20] приведены характеристики распространения волн и определен закон неустойчивого скольжения в блочных системах, предложен критерий устойчивости массивов пород, основанный на энергетических показателях. В [21] создана блочная модель из гранитных блоков массива с центральной цилиндрической полостью и исследован закон поля смещений гранитных блоков над полостью при горизонтальном возмущении. Экспериментально определен динамический отклик блочного массива пород с нарушениями в виде трещин [22], получены характеристики динамического распространения волн в этих условиях. В [23] на основе одномерной блочной модели из гранита получен частотный спектр и амплитудные характеристики распространения волн в условиях ударной вибрации.

Блочная модель массива пород широко распространена, и значительное внимание в ней уделено изучению структурных характеристик и динамических откликов. Результаты исследований в виде законов распространения волн в блочном массиве пород важны при анализе проявлений горного давления (горные удары, внезапные выбросы газа и угля). Однако указанные законы нуждаются в дальнейшем изучении и доработке. Главная особенность в этом направлении — учет разрушения блоков при нагружениях на характер распространения волн, что необходимо для динамического мониторинга массива горных пород.

Цель настоящей работы — экспериментальное изучение, анализ влияния разных видов нарушения блоков (трещина в поперечном и продольном направлении) на динамический отклик массива горных пород в процессе распространения P -волн. Получены различные характеристики движения волны в блочной среде при разных нарушениях блочной структуры.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ

Эксперименты проводились на блочных моделях массива пород с помощью ударно-нагружающего устройства и измерительной техники (рис. 1). Основа и методика исследований описаны в [22], где рассматривались аналогичные модели однородных блочных сред и иссле-

довался эффект распространения P -волн. В данной работе модель среды представляет собой 12 расположенных вертикально гранитных кубиков размером $100 \times 100 \times 100$ мм. Ударное устройство — свободно падающее тело в виде стального шара и неподвижной треноги. Масса шарика 0.3 кг, высота падения может меняться в широком диапазоне (в экспериментах она равна 200 мм). Для измерения ускорений применялась станция сбора данных TST-5915 и два трехкоординатных датчика ускорений. Рабочая частота отсчетов станции 100 кГц, чувствительность датчиков ускорений 1 мВ/г, диапазон измерений $\pm 5000g$ с полосой частот до 5 кГц, Z-направление датчиков акселерометра соответствовало распространению P -волны.

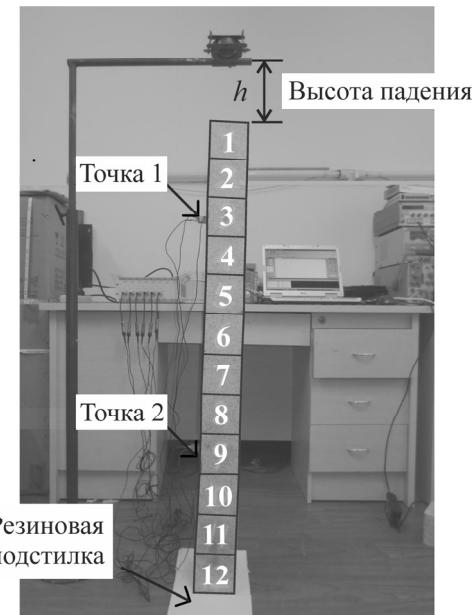


Рис. 1. Ударно-нагружающее устройство и измерительная техника

В блочной модели среды в качестве основного взят блок 2. В нем имитировалось локальное разрушение с применением составных частей блока (плоскость разделя частей совпадала с направлением движения волны и располагалась перпендикулярно). Для разных нарушений структуры блока 2 изучалось распространение P -волны. Первый датчик ускорений устанавливался в блоке 3 рядом с зоной разрушения (точка 1), второй — в блоке 9, вдали от зоны разрушения (точка 2). Под разрушением блока понимается его разбиение на два подблока. Для каждого вида разрушений эксперименты по распространению волны в блочном массиве повторялись трижды. Кривые ускорений блоков без разрушения, с поперечными и продольными разрушениями получены с применением указанной аппаратуры.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Кривые изменения ускорений от времени t для неразрушенного блока 2 по данным измерений в точках 1, 2 показаны на рис. 2 a , продольное и поперечное разрушения — на рис. 2 b , c . Во время распространения продольной волны в качестве времени указан начальный момент для отсчета ускорений в точке 2, при этом $t=0$ соответствует моменту, когда точка наблюдения 1 получает сигнал ускорений.

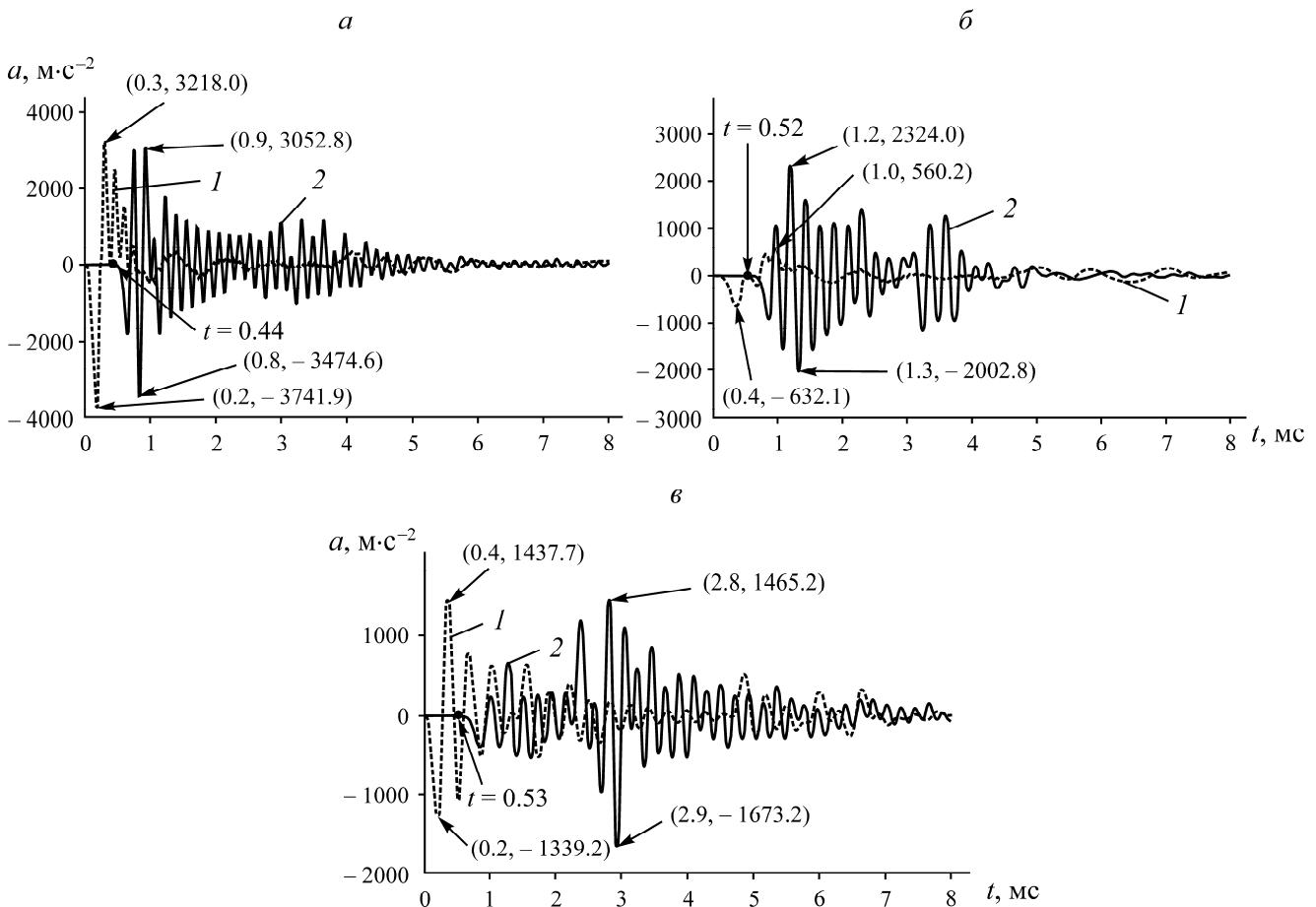


Рис. 2. Зависимости ускорений от времени для блочной модели среды в точках 1 (1), 2 (2):
 a — без разрушения блока 2; \bar{b} , \bar{c} — при поперечном и продольном разрушении блока 2

В табл. 1 приведены характеристики скорости распространения P -волны, когда в блоке 2 происходит разрушение. Разница во времени — временной промежуток между приходами сигналов ускорений в точках 1, 2. Расстояние между точками наблюдений 600 мм. Выявлено, что скорость продольной волны уменьшается с разрушением блока 2.

ТАБЛИЦА 1. Скорость P -волны в блочной модели среды

Вид разрушения	Временное отличие, мс	Скорость распространения, $\text{м}\cdot\text{с}^{-1}$
Без разрушения	0.44	1363.6
Поперечное	0.52	1153.8
Продольное	0.53	1132.1

Выразим временную длительность ускорений σ_t с помощью аналитической формулы, отражающей длительность колебания блока во времени [24]:

$$\sigma_t = \left[\int (t - \langle t \rangle)^2 |a(t)|^2 dt \right]^{1/2}, \quad \langle t \rangle = \int t |a(t)|^2 dt.$$

Параметры ускорений для точек 1, 2 блочной модели среды представлены в табл. 2, где a_{\max} , a_{\min} — максимальное и минимальное ускорения соответственно. Отношения минимального и максимального ускорений, когда горные породы разрушаются, сравнивались

со случаем без разрушения ($\eta_{a_{\max}}$, $\eta_{a_{\min}}$). Видно, что при разрушении горной породы временной интервал колебаний блоков увеличивается. При поперечном разрушении ускорение блоков значительно уменьшается около зоны разрушения (точка 1).

ТАБЛИЦА 2. Характеристики ускорений точек наблюдений 1, 2 в неразрушенной и разрушенной блочной модели среды

Вид разрушения	Точка 1			Точка 2		
	σ_t , мс	a_{\max} / a_{\min} , $\text{м} \cdot \text{с}^{-2}$	$\eta_{a_{\max}} / \eta_{a_{\min}}$, %	σ_t , мс	a_{\max} / a_{\min} , $\text{м} \cdot \text{с}^{-2}$	$\eta_{a_{\max}} / \eta_{a_{\min}}$, %
Без разрушения	0.9	3218.0 / -3741.9	—	1.1	3052.8 / -3474.6	—
Поперечное	2.0	560.2 / -632.1	82.6 / 83.1	0.9	2324.0 / -2002.8	23.9 / 42.4
Продольное	1.7	1437.7 / -1339.2	55.3 / 64.2	1.1	1465.2 / -1673.2	52.0 / 51.8

Скорости смещений найдем численным интегрированием ускорений с помощью сплайн-интерполяционной функции. Так как $E = mv^2 / 2$ (m — масса блока), получим выражение кинетической энергии в зависимости от времени t . На рис. 3 показаны кривые изменения кинетической энергии в точках 1, 2 в процессе распространения P -волны при разных вариантах разрушения блочной среды, что отражено в табл. 3 (E_{\max} — максимальная кинетическая энергия в точках наблюдений; $\eta_{E_{\max}}$ — отношение максимальной кинетической энергии к соответствующим значениям этой энергии для случаев без разрушения; Δt — разность во времени между максимальными кинетическими энергиями в точках 1, 2).

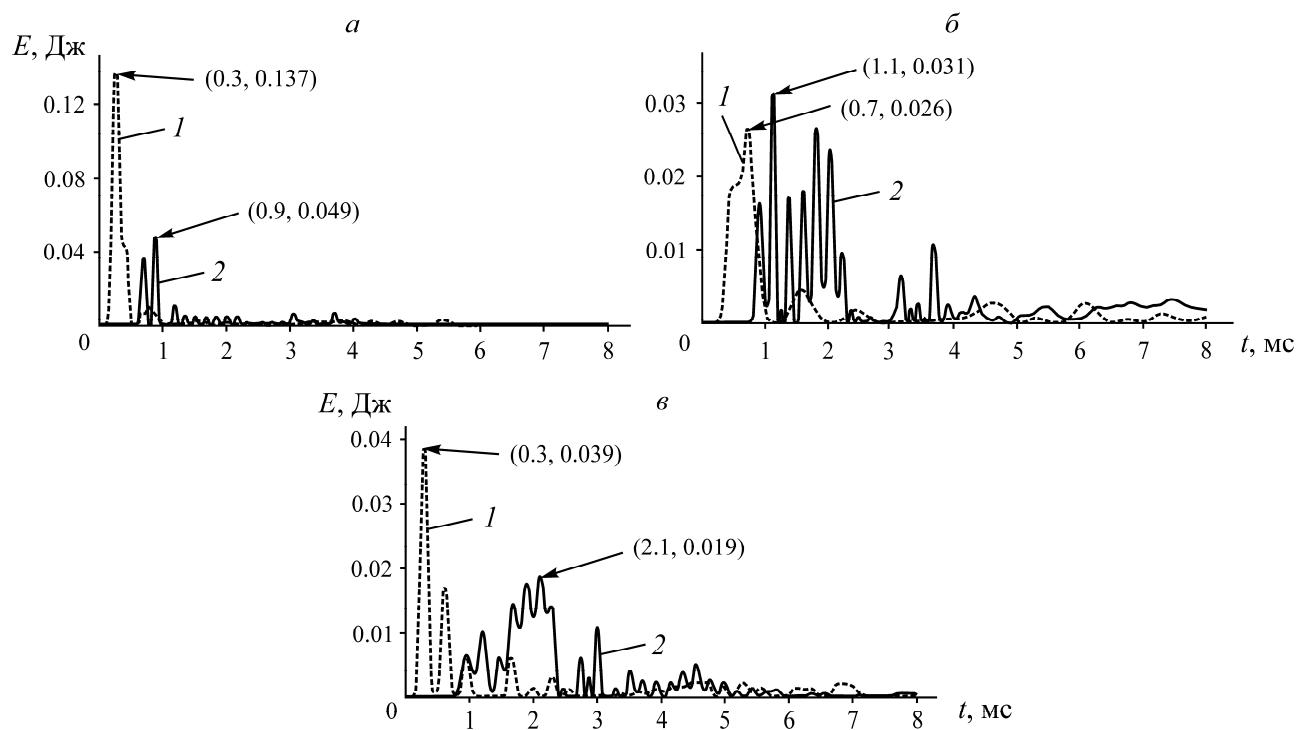


Рис. 3. Изменение кинетической энергии от времени в точках 1 (1), 2 (2): *а* — без разрушения блочной модели среды; *б*, *в* — при поперечном и продольном разрушении блочной модели среды

ТАБЛИЦА 3. Параметры кинетической энергии в точках 1, 2

Вид разрушения	Точка 1		Точка 2		Δt , мс
	E_{\max} , Дж	$\eta_{E_{\max}}$, %	E_{\max} , Дж	$\eta_{E_{\max}}$, %	
Без разрушения	0.137	—	0.049	—	0.6
Поперечное	0.026	81.0	0.031	36.7	0.4
Продольное	0.039	71.5	0.019	61.2	1.8

Установлено, что при разрушении блока 2 кинетическая энергия блочной модели среды уменьшается. Для случая поперечного разрушения блока 2 кинетическая энергия уменьшается значительно вблизи точки 1. Выполняя двойное численное интегрирование ускорений, имеем смещения в направлении распространения P -волны в блочной среде.

Зависимости смещений от времени t для точек 1, 2 представлены на рис. 4. В табл. 4 определены смещения для данных точек 1, 2 (S_{\max} — максимальные смещения в точках 1, 2 при прохождении продольной волны, $\eta_{S_{\max}}$ — отношения максимальных смещений в точках 1, 2 для случаев с разрушением и без него).

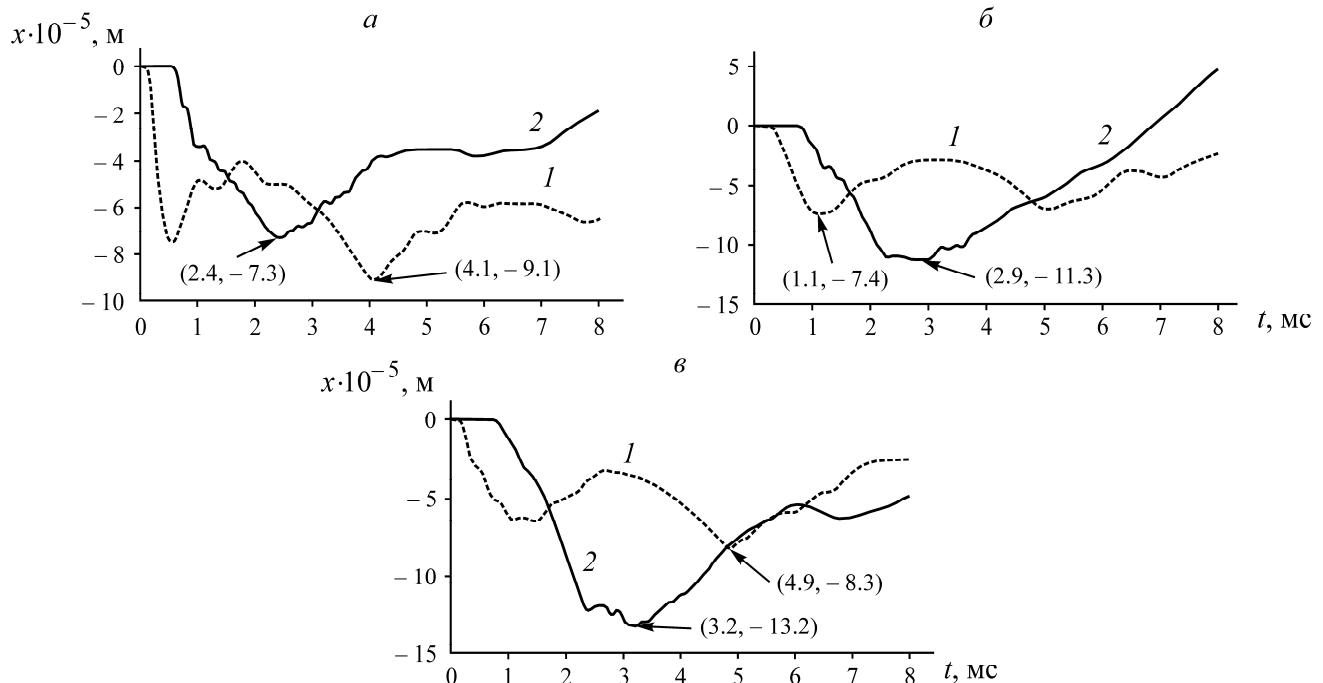


Рис. 4. Смещения в точках 1, 2 при прохождении продольной волны: *а* — без разрушения блочной модели среды; *б*, *в* — при поперечном и продольном разрушении блока 2

Из табл. 4 следует, что при разрушении блока 2 блочной модели среды смещения уменьшаются в точке 1. В то же время они увеличиваются вдали от зоны разрушения (в точке 2).

ТАБЛИЦА 4. Смещения в точках 1, 2

Вид разрушения	Точка 1		Точка 2	
	S_{\max} , мм	$\eta_{S_{\max}}$	S_{\max} , мм	$\eta_{S_{\max}}$
Без разрушения	0.091	—	0.073	—
Поперечное	0.074	18.7	0.113	-54.7
Продольное	0.083	8.8	0.132	-80.8

С помощью частотно-временного анализа установлены характеристики распространения P -волны блочной модели среды с разрушением. Данный анализ применен для описания спектра сигналов в разные времена и преобразует одномерные сигналы в двумерные частотно-временные образы, расширяя представление о содержимом фиксируемых сигналов. Распределение Вигнера – Вилля при частотно-временном анализе не требует временных окон, его высокое разрешение можно получить для временных и частотных областей. Эти результаты нужны для анализа экспериментальных данных в случае распространения продольной волны в блочной модели среды как при разрушении блока 2, так и без него. Для вещественных сигналов $s(t)$ после преобразования Гильберта указанное распределение примет вид функции $\hat{s}(t)$ [25]:

$$\hat{s}(t) = \lim_{\delta \rightarrow 0} \left[\int_{-\infty}^{\delta} \frac{s(t-\tau)}{\tau} d\tau + \int_{\delta}^{\infty} \frac{s(t-\tau)}{\tau} d\tau \right] = \frac{1}{\pi} Vp \int_{-\infty}^{\infty} \frac{s(\tau)}{t-\tau} d\tau,$$

где t, τ — вещественные переменные; Vp — главное значение интеграла.

Преобразование Гильберта позволяет представить вещественный цифровой сигнал как комплексный (аналитический сигнал). Если $x(t)$ — непрерывная во времени комплексная функция, то распределение Вигнера – Вилля этого сигнала запишется как [25]:

$$WVD_x(t, \omega) = \int_{-\infty}^{\infty} x\left(t + \frac{\tau}{2}\right) x^*\left(t - \frac{\tau}{2}\right) e^{-j\omega\tau} d\tau.$$

Отсюда можно получить частотно-временной отклик в виде зависимостей частоты от времени для осцилограмм ускорений, изменений кинетической энергии, смещений (рис. 3, 4). Для примера на рис. 5 изображены диаграммы частотно-временного отклика для ускорения без разрушения блока 2, зафиксированного в точках 1, 2. По таким диаграммам можно определить доминантную частоту f_d , время ее фиксации t_d и соответствующий ей спектральный пик A_{\max} (отмечены на рис. 5 стрелками).

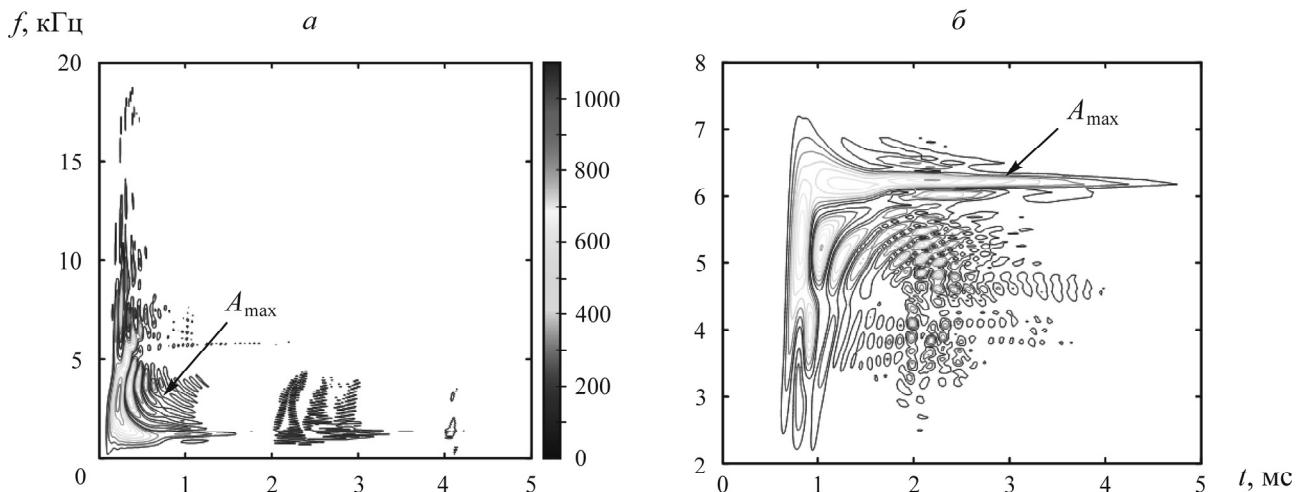


Рис. 5. Диаграммы частотно-временного отклика для ускорения без разрушения блока 2 в точках 1 (а) и 2 (б)

В табл. 5 представлены частотно-временные характеристики ускорений в точках 1, 2 при распространении P -волны для разных вариантов разрушения блочной модели среды и без него. Они получены из частотно-временных зависимостей отклика ускорения. Частотно-временные характеристики, включая доминантную частоту, время ее фиксации и соответствующий ей

спектральный пик, выражаются как f_d , t_d и A_{\max} . Когда происходит разрушение блока 2 блочной модели среды, спектральный пик отклика на ускорение уменьшается в точке 1 и увеличивается в блоке, расположенном вдали от зоны разрушения (в точке 2). При поперечном разрушении доминантная частота отклика на ускорение переходит на более низкий уровень вблизи зоны разрушения (в точке 1), при продольном разрушении это изменение более значимо в блоке, находящемся вдали от зоны разрушения (в точке 2).

ТАБЛИЦА 5. Характеристики частотно-временного отклика для ускорений

Вид разрушения	Точка 1			Точка 2		
	t_d , мс	f_d , кГц	A_{\max}	t_d , мс	f_d , кГц	A_{\max}
Без разрушения	0.23	3.06	964.5	2.2	6.24	819.9
Поперечное	0.64	0.75	821.3	1.7	4.49	1007.7
Продольное	0.41	3.00	876.8	2.9	3.75	1074.9

Характеристики частотно-временного отклика при разных кинетических энергиях в точках 1, 2 во время распространения P -волны при разрушении блока 2 блочной модели среды приведены в табл. 6. Доминантная частота кинетической энергии наступает с задержкой во времени при разрушении блочной модели породы. При поперечном разрушении она значительно снижается в блоке вблизи зоны разрушения (в точке 1). При продольном разрушении пик спектра кинетической энергии уменьшается и доминантная частота кинетической энергии также значительно уменьшается в блоке, находящемся вдали от зоны разрушения (в точке 2).

ТАБЛИЦА 6. Частотно-временные отклики при разных кинетических энергиях

Вид разрушения	Точка 1			Точка 2		
	t_d , мс	f_d , кГц	A_{\max}	t_d , мс	f_d , кГц	A_{\max}
Без разрушения	0.28	1.44	1262.3	0.8	3.18	1128.7
Поперечное	0.65	0.69	1344.7	1.6	2.37	989.7
Продольное	0.29	2.12	1135.2	1.7	0.25	956.9

Из диаграмм частотно-временного отклика для осцилограмм смещений (рис. 5) можно получить частотно-временные характеристики смещения в точках 1, 2 в процессе распространения P -волны при разрушении блочной среды, отмеченные в табл. 7. При поперечном разрушении блока пиковые значения спектра смещений увеличиваются и доминантная частота смещения также увеличивается в блоке вблизи зоны разрушения (в точке 1). При продольном разрушении пиковые значения спектра смещений уменьшаются в блоке, удаленном от зоны разрушения (в точке 2).

ТАБЛИЦА 7. Частотно-временные отклики в виде смещений

Вид разрушения	Точка 1			Точка 2		
	t_d , мс	f_d , кГц	A_{\max}	t_d , мс	f_d , кГц	A_{\max}
Без разрушения	4.1	0.18	968.1	2.0	0.19	1262.6
Поперечное	4.0	0.25	1176.5	4.0	0.12	1471.2
Продольное	4.0	0.25	1360.8	2.3	0.19	1239.8

Таким образом, различные виды разрушений блочной среды приводят к различным откликам в этих характеристиках. Скорость, ускорения, кинетическая энергия P -волн уменьшаются для разрушенной блочной модели среды, а длительность ускорения увеличивается. Влияние поперечного разрушения блочной модели среды вблизи зоны разрушения более значимо [26]. На распространение P -волн влияет число блоков и характеристики структурной неоднородности самих блоков. Эти моменты нуждаются в дальнейших исследованиях.

ВЫВОДЫ

При наличии разрушения блока в блочной модели среды скорость распространения P -волн уменьшается, длительность отклика блока на ускорения увеличивается, максимальное ускорение, кинетическая энергия и колебания блоков уменьшаются в окрестности зоны разрушения, колебания смещений увеличиваются вдали от нее. Поперечное разрушение блока имеет значительное влияние на ускорение и изменение кинетической энергии блока вблизи зоны разрушения, продольное разрушение — более значимый фактор, влияющий на изменения смещений блоков вдали от этой области.

При поперечном разрушении блочной модели среды доминантные частоты зависимостей ускорения блоков и их кинетической энергии от времени уменьшаются, что проявляется в блоке вблизи зоны разрушения, при этом доминантная частота зависимости смещений от времени увеличивается. При продольном разрушении блока задержка времени наступления доминантной частоты отклика блока происходит вдали от зоны разрушения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Miao X. H., Jiang F. X., Wang C. W., et al.** Mechanism of microseism-inducdrock burst revealed by microseismic monitoring, Chinese J. Geotech. Eng., 2011, Vol. 33, No. 6. — P. 971–976.
2. **Liu S. H., Mao D. B., Qi Q. X., et al.** Under static loading stress wave propagation mechanism and energy dissipation in compound coal-rock, J. China Coal Society, 2014, Vol. 39, No. S1. — P. 15–22.
3. **Dou L. M., Jiang Y. D., Cao A., et al.** Monitoring and pre-warning of rock burst hazard with technology of stress field and wave field in underground coalmines, Chinese J. Rock Mech. Eng., 2017, Vol. 36, No. 4. — P. 803–811.
4. **Sadovsky M. A.** Natural lumpiness of a rock, Dokl. Akad. Nauk SSSR, 1979, Vol. 247, No. 4. — P. 829–831.
5. **Kurlenya M. V., Oparin V. N., and Eremenko A. A.** Relation of linear block dimensions of rock to crack opening in the structural hierarchy of masses, J. Min. Sci., 1993, Vol. 29, No. 3. — P. 197–203.
6. **Qi C. Z., Qian Q. H., Wang M. Y., et al.** Structural hierarchy of rock massif and mechanism of its formation, Chin. J. Rock Mech. Eng., 2005, Vol. 24, No. 16. — P. 2838–2846.
7. **Kurlenya M. V., Oparin V. N., and Vostrikov V. I.** Pendulum-type waves. Part I: State of the problem and measuring instrument and computer complexes, J. Min. Sci., 1996, Vol. 32, No. 3. — P. 159–163.
8. **Aleksandrova N. I. and Sher E. N.** Modeling of wave propagation in block media, J. Min. Sci., 2004, Vol. 40, No. 6. — P. 579–587.
9. **Aleksandrova N. I.** The propagation of transient waves in two-dimensional square lattices, Int. J. Solids Structures, 2022, Vol. 18. — P. 234–235.
10. **Aleksandrova N. I.** Model of block media taking into account internal friction, Mech. Solids, 2022, Vol. 57, No. 3. — P. 496–507.

11. **Oparin V. N., Balmashnova E. G., and Vostrikov V. I.** On Dynamic behavior of “Self-Stressed” block media. Part II: Comparison of theoretical and experimental data, *J. Min. Sci.*, 2001, Vol. 37, No. 5. — P. 455–461.
12. **Saraikin V. A., Chernikov A. G., and She E. N.** Wave propagation in two-dimensional block media with viscoelastic layers (Theory and experiment), *J. Appl. Mech. Tech. Phys.*, 2015, Vol. 56, No. 4.
13. **Шер Е. Н., Черников А. Г.** Об оценке параметров структуры блочных сред на модельном примере сейсмического зондирования кирпичной стены // *ФТПРПИ*. — 2020. — № 4. — С. 11–17.
14. **Qian Q. H.** Key scientific problems in the development of deep underground space, *Academician Proc. Of Qian Qi-hu. Beijing, Chinese Society Rock Mech. Eng.*, 2007. — P. 549–568.
15. **Wang D. R., Lu Y. S., Feng S. F., et al.** Development of multipurpose test system for dynamic behaviors of deep rock masses, *Chin. J. Rock Mech. Eng.*, 2008, Vol. 27, No. 3. — P. 601–606.
16. **Wu H., Fang Q., Zhang Y. D., et al.** Propagation properties of stress waves in one-dimensional geo-block medium, *Chin. J. Geotech. Eng.*, 2010, Vol. 32, No. 4. — P. 600–611.
17. **Jia B. X., Chen Y., Pan Y. S., et al.** Experimental research on propagation characteristics of block-rock mass pendulum-type wave under shock load, *Rock Soil Mech.*, 2015, Vol. 36, No. 11. — P. 3071–3076.
18. **Li J., Zhou Y. C., Jiang H. M., et al.** State of the nonlinear pendulum-type waves problems and development of the test equipment, *Nat. Sci. J. Xiangtan Univ.*, 2017, Vol. 39, No. 4. — P. 22–28.
19. **Li J., Wang M. Y., Jiang H. M., et al.** Nonlinear mechanical problems in rock explosion and shock. Part I: Experimental research on properties of one-dimensional wave propagation in block rock masses, *Chin. J. Rock Mech. Eng.*, 2018, Vol. 37, No. 1. — P. 38–50.
20. **Li J., Jiang H. M., Wang M. Y., et al.** Nonlinear mechanical problems in rock explosion and shock. Part II: Physical model test on sliding of block rocks triggered by external disturbance, *Chin. J. Rock Mech. Eng.*, 2018, Vol. 37, No. 2. — P. 291–301.
21. **He M. C., Wang Y., Liu D. Q., et al.** Experimental study on ultra-low friction effect of granite block based on two-dimensional digital image correlation technique, *J. China Coal Soc.*, 2018, Vol. 43, No. 10. — P. 2732–2740.
22. **Wang K. X., Dou L. M., Pan Y. S., et al.** Experimental study of incompatible dynamic response feature of block rock mass, *Rock Soil Mech.*, 2020, Vol. 41, No. 4. — P. 1227–1234.
23. **Jiang H. M., Li J., and Wang M. Y.** Development of a test system for dynamic characteristics of blocky rock mass and its application, *J. Vibration Shock.*, 2018, Vol. 37, No. 21. — P. 29–34.
24. **Liu B. Y.** An introduction to nonstationary signal analysis, Beijing, National Defense Industry Press, 2006.
25. **Ge Z. X. and Chen Z. S.** Matlab time-frequency analysis technology and its applications, Beijing, The People's Posts and Telecommunications Press, 2006.
26. **Tian Z. N., Li S. H., Xiao N., et al.** Experimental studies and numerical simulation of stress wave propagation in one-dimensional rock mass, *Chin. J. Rock Mech. Eng.*, 2008, Vol. 27, No. S1. — P. 2687–2693.

Поступила в редакцию 06/II 2024
После доработки 09/III 2024
Принята к публикации 14/III 2024