

## РАЗРУШЕНИЕ ГОРНЫХ ПОРОД

УДК 550.344.52

### СВЯЗЬ ЗАТУХАНИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОЛН С НАПРАВЛЕНИЕМ ИХ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПРИ ПОДЗЕМНЫХ ТОЛЧКАХ

П. Банка<sup>1</sup>, Э. Лиер<sup>2</sup>, М. М. Фернандез<sup>3</sup>, А. Чмиела<sup>4</sup>, З. Ф. Муниз<sup>5</sup>, А. Б. Санчез<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Силезский технологический университет,

E-mail: piotr.banka@polsl.pl, ул. Академика, 2А, 44-11, г. Гливице, Польша

<sup>2</sup>FAMUR S. A., E-mail: piotr.banka@polsl.pl,

ул. Армии Крайовы, 51, 40-698, г. Катовице, Польша

<sup>3</sup>Университет Леона, E-mail: marta.menendez@unileon.es, antonio.bernardo@unileon.es,

24071, Кампус де Вегазана, Испания

<sup>4</sup>Компания "Spółka Restrukturyzacji Kopalń",

E-mail: andrzej.chmiela1@gmail.com, г. Бытом, Польша

<sup>5</sup>Университет Овьедо,

E-mail: zulima@uniovi.es, 33005, Кампус де Ламаквик, Испания

Рассмотрены проблемы описания поля ускорения поверхностных колебаний, полученных на основе точечной регистрации, проводимой в угольных шахтах, подверженных сейсмической угрозе. Представлена простая модель, учитывающая эффект влияния направленности распространения сейсмической волны на ее затухание. Применение предложенной модели позволяет сократить среднеквадратичные ошибки по сравнению с результатами, полученными с помощью модели, основанной на методе статистической регрессии без учета направления распространения волн. Выявлено, что направленность затухания связана с ориентацией ближайших больших тектонических разломов.

*Вызванная сейсмическая активность, распространение колебаний на поверхности, анизотропия затухания*

DOI: 10.15372/FTPRPI20200210

Добыча каменного угля сопровождается повторяющимися неблагоприятными сейсмособытиями, влияющими на подземные выработки и дневную поверхность. В областях с высоким уровнем сейсмической опасности расширены сети поверхностных сейсмостанций, регистрирующих подземные колебания. Зарегистрированные данные используются для оценки действия колебаний, вызванных ведением горных работ. Определение параметров таких колебаний требует постоянных сейсмометрических наблюдений во всех строениях, находящихся в области динамического влияния горных работ. Оценка магнитуды колебаний в строениях, не находящихся в области наблюдения, возможна с помощью зависимостей, связывающих сей-

смическую энергию зарегистрированных толчков и эпицентральные или гипоцентральные их расстояния с параметрами колебаний на поверхности. Эти зависимости используются для расчета параметров поверхностных колебаний, сгенерированных толчками с предсказуемой энергией и встречающихся при запланированных горных работах. Для оценки параметров поверхностных колебаний применяется метод статистической регрессии, так как аналитическое описание данного явления практически невозможно из-за сложности проходящих в горной породе процессов от источника до поверхности.

Добыча каменного угля и медной руды в шахтах сопровождается толчками горной породы с высокой энергией. Это эпизодически приводит к горным ударам в выработках, но более часто такие толчки являются причиной заметных колебаний поверхности. Колебания не только вызывают беспокойство у жителей, но и в отдельных случаях могут быть причиной повреждения несущих элементов зданий.

Интенсивность поверхностных колебаний, вызванных горными толчками, зависит от следующих факторов: сейсмической энергии толчка, глубины фокуса и эпицентрального расстояния до точки наблюдения, механизма источника толчка, центральной геологической структуры, в особенности локального состояния поверхности в точке наблюдения, т. е. типа, толщины, обводнения рыхлых налегающих пород и топографических особенностей района [1]. Непрерывная модернизация сейсмологического оборудования и развитие методов интерпретации данных способны достаточно точно определить локализацию эпицентров, энергию толчков и их влияние на магнитуду рассматриваемых поверхностных колебаний [2]. Цифровое сейсмологическое оборудование позволяет установить механизм возникновения толчков, благодаря чему появляется возможность анализа влияния данного фактора на интенсивность поверхностных колебаний [3]. Влияние структуры налегающих пород на магнитуду поверхностных колебаний — предмет многих исследований, в результате которых разработан перспективный HVSR-метод [4, 5]. Он заключается в определении отношения горизонтального и вертикального компонент спектра ускорения поверхностных колебаний. Это отношение применяют для расчета коэффициента усиления колебаний, вызванных горными толчками [6, 7].

В районах с высоким уровнем динамического влияния горных толчков располагаются развитые сети станций мониторинга поверхности. Регистрация параметров поверхностных колебаний позволяет оценить их максимальные скорости и амплитуды ускорений. Определение параметров поверхностных колебаний, вызванных горными толчками, требует постоянных сейсмометрических наблюдений во всем районе, где проводится добыча полезных ископаемых. Поскольку концентрация станций сейсмического мониторинга невозможна по техническим, организационным и экономическим причинам, используется точечная регистрация поверхностных колебаний. Параметры поверхностных колебаний на весь район рассчитываются на основе зависимостей, связывающих сейсмическую энергию зарегистрированных толчков и их эпицентральные или гипоцентральные расстояния с максимальной амплитудой ускорения или скорости колебаний. Обычно зависимости затухания находятся методами статистической регрессии.

В научной литературе представлено большое количество примеров применения различных форм зависимостей затуханий от выбранного параметра колебаний [8–10]. В [11] описаны примеры комплексных форм зависимостей затухания, основанных на результатах наблюдений, проведенных в различных регионах.

После появления толчков, вызванных ведением горных работ, на отдельных станциях мониторинга отмечалось существенное различие в зарегистрированных значениях максимальных амплитуд ускорения и скорости поверхностных колебаний. На станциях, расположенных бли-

же к эпицентру толчка, регистрировались меньшие по значению максимальные амплитуды колебаний, чем на станциях, расположенных далеко от эпицентра (табл. 1). Это особенно характерно для станций мониторинга, находящихся в одном и том же районе, где не предполагается большое различие в коэффициенте усиления колебаний. В общем случае данные наблюдения можно объяснить тем, что сейсмическое затухание имеет направленную зависимость составляющую [12, 13]. Поверхностные колебания распространяются более эффективно по направлению разрыва. Несмотря на указанный факт, эффект направленности не учитывается в зависимостях сейсмического затухания.

ТАБЛИЦА 1. Расположение станций сейсмического мониторинга и наблюдаемые максимальные амплитуды ускорения поверхностных колебаний, вызванных толчками

Станция	Координаты, м		Эпицентральное расстояние, м	Максимальная амплитуда ускорения поверхностных колебаний, м/с <sup>2</sup>
	X	Y		
Регион 1				
(дата толчка 21.04.2011 г., его энергия $1 \cdot 10^8$ Дж, координаты эпицентра $X=32597$ , $Y=38968$ )				
R1 Ст. 1	29 830	38 720	2778	0.1036
R1 Ст. 2	33 175	38 855	589	1.0864
R1 Ст. 3	31 940	39 415	795	0.3015
R1 Ст. 4	31 460	36 575	2649	0.5181
R1 Ст. 5	30 865	40 530	2332	0.0748
Регион 2				
(дата толчка 15.12.2014 г., его энергия $3 \cdot 10^7$ Дж, координаты эпицентра $X=24386$ , $Y=-34656$ )				
R2 Ст. 1	21 870	-37 450	3760	0.0193
R2 Ст. 2	28 050	-34 070	3711	0.0634
R2 Ст. 3	23 082	-33 272	3497	0.0183
R2 Ст. 4	25 610	-37 932	1902	0.4046
R2 Ст. 5	19 310	-34 900	5082	0.0322
Регион 3				
(дата толчка 26.05.2014 г., его энергия $8 \cdot 10^8$ Дж, координаты эпицентра $X=2140$ , $Y=-20890$ )				
R3 Ст. 1	8030	-18 750	3096	0.1330
R3 Ст. 2	-3745	-22 530	1626	0.9270
R3 Ст. 3	3575	-20 125	2108	1.5270
R3 Ст. 4	4200	-20 440	6109	0.1380
R3 Ст. 5	3725	-18 230	4121	0.1870
R3 Ст. 6	-1485	-18 930	2369	0.1310
R3 Ст. 7	780	-18 950	6266	0.0450

Наиболее сильные поверхностные колебания произошли в первом регионе 21.04.2011 г. после толчка с энергией  $1 \cdot 10^8$  Дж, во втором — 15.12.2014 г. после толчка с энергией  $3 \cdot 10^7$  Дж, в третьем — 26.05.2014 г. после толчка с энергией  $8 \cdot 10^8$  Дж. Данные толчки вызвали поверхностные колебания, максимальные амплитуды ускорения которых представлены в табл. 1.

Зависимость направленного затухания может использоваться для описания результатов наблюдений максимальных амплитуд ускорения и скорости поверхностных колебаний. В предлагаемой модели контуры пиковых ускорений и скоростей образуют форму эллипса. Она характеризуется небольшим количеством параметров, что важно ввиду небольшого числа станций мониторинга, расположенных в районах горных работ.

## ЗАВИСИМОСТЬ НАБЛЮДАЕМЫХ УСКОРЕНИЙ ПОВЕРХНОСТНЫХ КОЛЕБАНИЙ ОТ ЭНЕРГИИ И ЭПИЦЕНТРАЛЬНЫХ РАССТОЯНИЙ ТОЛЧКОВ

Данные наблюдений поверхностных колебаний позволяют определить параметры модели статистической регрессии ускорения и скорости колебаний относительно сейсмической энергии и эпицентральных (гипоцентральных) расстояний толчков, вызванных горными работами. Логарифм максимальной амплитуды виброускорения записывается как

$$\log a = b_1 \log E + b_2 R + b_3 \log R + b_4 + \varepsilon, \quad (1)$$

где  $a$  — максимальная амплитуда виброускорения,  $\text{м}/\text{с}^2$ ;  $E$  — сейсмическая энергия толчка, Дж;  $R$  — эпицентральный расстояние, м;  $b_i$  — параметры модели статистической регрессии;  $\varepsilon$  — случайный компонент [10].

Эпицентральный расстояние можно заменить гипоцентральный  $D = \sqrt{R^2 + h^2}$  ( $h$  — глубина толчка). Глубина толчков, определяемая при их локализации, обычно не учитывается из-за наличия большой ошибки. В расчетах учитывается средняя глубина толчков (в условиях функционирования польских каменноугольных шахт она принимается равной 500 м).

Модель 1 недостаточно точно отражает фактическое распределение колебаний. Анализ зарегистрированных данных показывает значительное различие в максимальных амплитудах ускорения и скорости в зависимости от направления расположения станций мониторинга относительно эпицентра толчков. Чтобы учесть направленность затухания поверхностных колебаний, вызванных горными толчками, предлагается модификация модели [14]. Предлагаемая модель имеет следующую форму:

$$\log a = b_1 \log E + b_2 R_D + b_3 \log R + b_4 + \varepsilon, \quad (2)$$

где

$$R_D = \sqrt{l^2 + m^2}, \quad l = p[(x_w - x_{st}) \cos q + (y_w - y_{st}) \sin q], \quad (3)$$

$$m = (x_{st} - x_w) \sin q + (y_w - y_{st}) \cos q. \quad (4)$$

Здесь  $x_w, y_w$  — координаты толчка;  $x_{st}, y_{st}$  — координаты станции мониторинга;  $p > 0$ ,  $q \in (0, 2\pi)$ .

Эта модель рассматривает направленное затухание при условии, что контуры пиковых ускорений и скоростей образуют форму эллипса, которая поворачивается относительно оси  $z$  на угол  $q$ . Компонент  $b_2 R_D$  в модели описывает влияние направленного неупругого затухания ( $R_D$  — зависящая от направления составляющая). Геометрическое распределение (результат рассеяния энергии) одинаково рассчитывается во всех направлениях, подобно зависимости (1), за это отвечает компонент  $b_3 \log R$ .

При разработке модели использовались формулы для изменения системы координат:

— изменение масштаба по оси  $x$ :

$$x_{\text{new}} = p x_{\text{old}}, \quad y_{\text{new}} = y_{\text{old}}, \quad (5)$$

— поворот на угол  $q$  вокруг оси  $z$ :

$$x_{\text{new}} = x \cos q + y \sin q, \quad y_{\text{new}} = -x \sin q + y \cos q, \quad (6)$$

$(x_{\text{old}}, y_{\text{old}})$ ,  $(x_{\text{new}}, y_{\text{new}})$  — координаты в изначальной и новой системе координат;  $p$  — масштабный коэффициент по оси  $x$ ;  $q$  — угол поворота системы координат [15].

Расчеты выполнялись на основе выбранных наиболее сильных поверхностных колебаний, произошедших в рассматриваемых областях. Компонент, связанный с энергией толчка ( $b_1 \log E$ ), удален из уравнений (1) и (2), так как в случае сильных толчков, происходящих отдельно друг от друга, он принимается постоянным. В конечном итоге модели имеют вид:

$$\text{модель 1} \quad \log a = b_1 R + b_2 \log R + b_3 + \varepsilon, \quad (7)$$

$$\text{модель 2} \quad \log a = b_1 R_D + b_2 \log R + b_3 + \varepsilon. \quad (8)$$

Параметры модели 1 можно оценить методом статистической регрессии. С помощью данной операции определяются параметры  $b_1$  или  $b_2$ , которые часто больше нуля. Это означает, что амплитуды поверхностных колебаний увеличиваются с ростом эпицентрального расстояния. Это противоречит принципу сохранения энергии, но не означает, что рассчитанная таким образом зависимость затухания не может применяться для нахождения магнитуды поверхностных колебаний. Проблемы от положительных значений параметров  $b_1$  или  $b_2$  могут появиться только в случае, когда эпицентральное расстояние будет больше, чем обоснованные значения параметров модели. Наиболее точные результаты оценки виброускорения предполагается получить в середине диапазона изменения эпицентрального расстояния, принятого для параметров модели. Некорректные результаты будут соответствовать крайним значениям диапазона. Следует ожидать низкую точность для значений эпицентрального расстояния и сейсмической энергии, недоступных при оценке параметров модели [16]. В случае модели 2, ввиду того, что  $R_D$  — нелинейная функция  $p$  и  $q$ , невозможно применить метод статистической регрессии для расчета параметров модели.

Учитывая данные условия, задача определения параметров модели 1 и 2 представлена в виде задачи линейного программирования для случая (1) и нелинейной модели с линейными ограничениями для случая (2). Целевая функция приобретает вид

$$f_c = \left( \sum_{i=1}^{n_{\text{obs}}} (A_{\text{obs}_i} - A_{\text{pred}_i})^2 \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (9)$$

где  $n_{\text{obs}}$  — количество наблюдений;  $A_{\text{obs}_i}$ ,  $A_{\text{pred}_i}$  — наблюдаемые и предполагаемые максимальные амплитуды виброускорений на  $i$ -й станции мониторинга.

Норма  $L_2$  целевой функции была минимизирована. Она чувствительна к нетипичным выпадающим наблюдениям, которые отклоняются от основного набора, и расширяет их решение [17]. В данном исследовании рассматривается модель, которая характеризуется корректно измеренными максимальными виброускорениями. Приняты следующие ограничения изменения параметров модели:

$$\begin{aligned} -1 \leq b_1 \leq 0, \quad -10 \leq b_2 \leq 0, \quad -100 \leq b_3 \leq 100, \\ 0 \leq p \leq 10, \quad 0 \leq q \leq 2\pi. \end{aligned} \quad (10)$$

Параметры определены с помощью эволюционной модели. Ее алгоритм реализован в дополнении Solver-Add для Microsoft Office Excel. При расчете виброускорений с помощью моделей 1 и 2 значения эпицентральных расстояний ограничены до значений, доступных при оценке параметров модели.

**ОПИСАНИЕ ПОЛЯ УСКОРЕНИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ КОЛЕБАНИЙ,  
ВЫЗВАННЫХ ГОРНЫМИ ТОЛЧКАМИ**

Учитывая данные наблюдений из табл. 1, для моделей 1 и 2 определены параметры виброускорений в зависимости от сейсмической энергии и эпицентрального расстояния рассматриваемых толчков. В табл. 2 представлены результаты оценки параметров модели 1. В случае определения параметров модели 1 на основе наблюдений виброускорений, вызванных толчками 21.04.2011 г., 15.12.2014 г., 26.05.2014 г., получены интерполирующие результаты, характеризующиеся значительной ошибкой и высокими значениями среднеквадратичного отклонения (рис. 1). Коэффициент детерминации  $R^2$  составил для первого региона 0.60, для второго — 0.98, для третьего — 0.52. Имеющиеся уравнения позволяют объяснить 60, 98 и 52 % наблюдаемой изменчивости максимальных амплитуд ускорения поверхностных колебаний.

ТАБЛИЦА 2. Результаты оценки параметров модели 1

Параметр	Значение
Регион 1 ( $R = 0.776, R^2 = 0.60$ )	
$b_1$	0.00000
$b_2$	-1.35836
$b_3$	3.72648
Регион 2 ( $R = 0.990, R^2 = 0.98$ )	
$b_1$	-0.00023
$b_2$	-2.27385
$b_3$	10.50907
Регион 3 ( $R = 0.723, R^2 = 0.52$ )	
$b_1$	-0.00036
$b_2$	0.00000
$b_3$	0.64660

Использование модели 2, которая учитывает эффект направленности сейсмического затухания, позволило более точно описать зарегистрированное поле поверхностных виброускорений с относительно небольшим отличием рассчитанных значений в сравнении с результатами наблюдений. Результаты оценки параметров модели 2 приведены в табл. 3, результаты использования рассматриваемых моделей — в табл. 4. Для облегчения оценки полученных результатов максимальные амплитуды ускорений поверхностных колебаний продублированы.

Результаты интерполяционной модели 2 получены по небольшому количеству зарегистрированных данных, учтенных при расчете параметров модели. Отметим, что рассматриваемая модель позволила относительно точно описать наблюдаемые максимальные амплитуды ускорения поверхностных колебаний (рис. 2). Среднеквадратичная ошибка зарегистрированных данных в первом регионе уменьшилась в 4 раза, по сравнению с данными модели 1, и составила  $0.0570 \text{ м/с}^2$ . Для второго региона среднеквадратичная ошибка оценки уменьшилась в 5 раз, по сравнению с моделью 1, и стала равной  $0.0078 \text{ м/с}^2$ . В третьем регионе отмечается значительное повышение точности оценки максимальной амплитуды виброускорения — среднеквадратичная ошибка уменьшилась в 9 раз, по сравнению с моделью 1, и составила  $0.0418 \text{ м/с}^2$ .

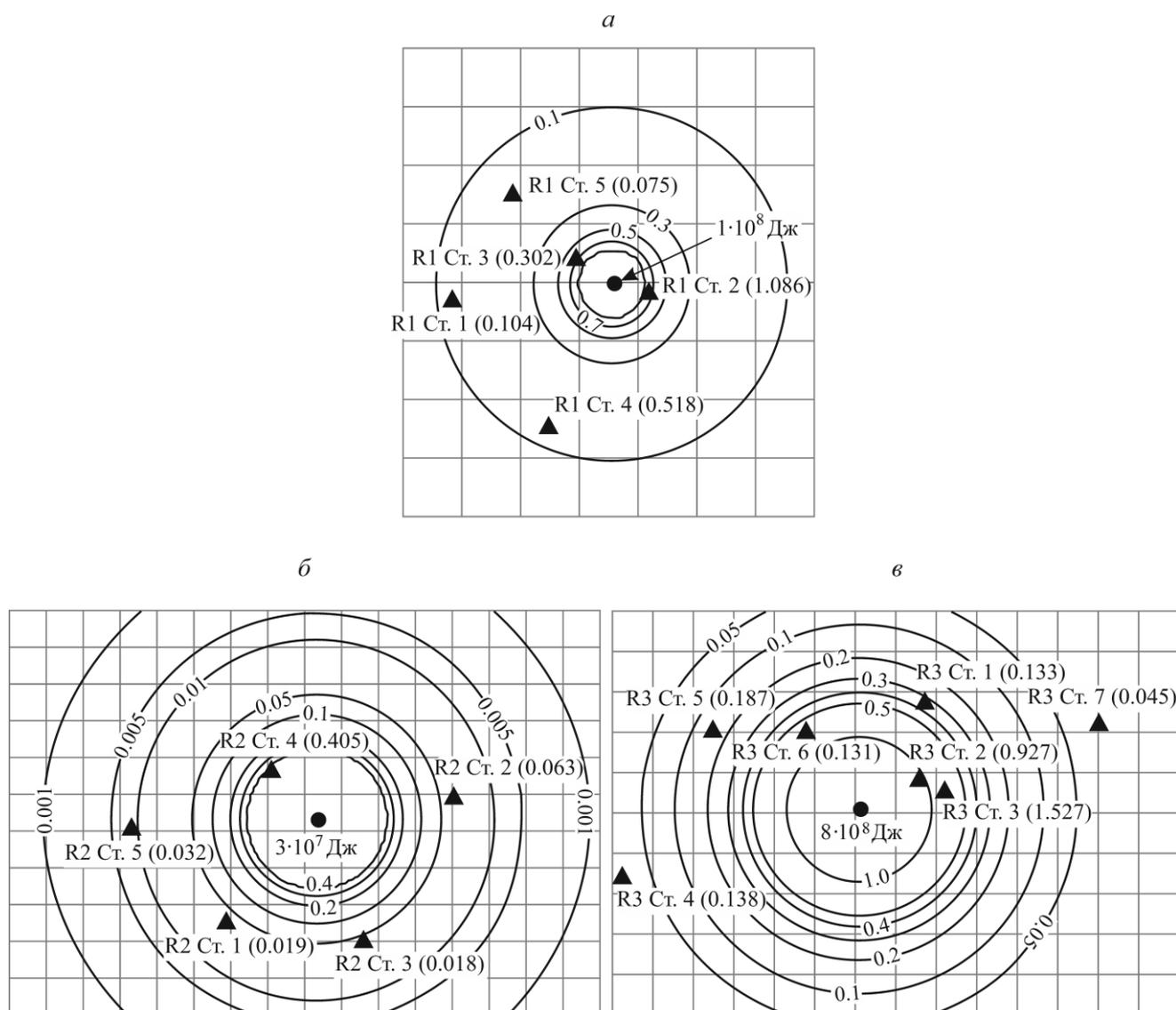


Рис. 1. Максимальные амплитуды ускорения поверхностных колебаний, зарегистрированные 21.04.2011 г. (а), 15.12.2014 г. (б) и 26.05.14 г. (в), для модели 1

При анализе эффекта направленности распространения поверхностных колебаний обнаружено, что в каждом регионе имеется тектонический разлом, направление которого практически параллельно направлению наименьшего затухания. Для толчка в первом регионе направление наименьшего затухания приблизительно параллельно разлому Леона (рис. 2а). Данный разлом не характеризуется большой дислокацией и проходит практически через весь горнопромышленный район.

Во втором регионе направление наименьшего затухания поверхностных колебаний параллельно разлому Бледовски (рис. 2б), в третьем — определенное направление наименьшего затухания поверхностных колебаний близко к направлению разлома Клодники (рис. 2в). В каждом из рассматриваемых регионов присутствует большее количество разломов. Они не рассматриваются в данной работе, так как располагаются на удаленном расстоянии от эпицентра толчка или имеют значительно меньшую дислокацию.

ТАБЛИЦА 3. Результаты оценки параметров модели 2

Параметр	Значение
Регион 1 ( $R=0.997$ , $R^2=0.994$ , $R_D=2504-10539$ м)	
$b_1$	-0.00049
$b_2$	-0.05264
$b_3$	1.40249
$p$	4.57067
$q$	2.56258
Регион 2 ( $R=0.999$ , $R^2=0.998$ , $R_D=1087-3432$ м)	
$b_1$	-0.00049
$b_2$	-1.33136
$b_3$	7.50929
$p$	0.31498
$q$	2.85327
Регион 3 ( $R=0.997$ , $R^2=0.994$ , $R_D=5636-26971$ м)	
$b_1$	-0.00008
$b_2$	0.00000
$b_3$	0.60779
$p$	9.90000
$q$	1.53146

ТАБЛИЦА 4. Наблюдаемые и спрогнозированные максимальные амплитуды ускорения поверхностных колебаний, вызванных рассматриваемыми толчками

Регион	Станция сейсмического мониторинга	Максимальные амплитуды ускорения поверхностных колебаний, $m/c^2$		
		Наблюдаемые	Модель 1	Модель 2
1	R1 Ст. 1	0.1036	0.1118	0.0002
	R2 Ст. 2	1.0864	0.9199	1.0864
	R3 Ст. 3	0.3015	0.6124	0.3015
	R4 Ст. 4	0.5181	0.1193	0.5181
	R5 Ст. 5	0.0748	0.1418	0.0001
	Среднеквадратичная ошибка, $m/c^2$	—	0.2400	0.0570
	Максимальное отклонение, $m/c^2$	—	0.3988	0.1034
2	R2 Ст. 1	0.0193	0.0314	0.0115
	R2 Ст. 2	0.0634	0.0332	0.0649
	R2 Ст. 3	0.0183	0.0427	0.0239
	R2 Ст. 4	0.4046	0.4040	0.4056
	R2 Ст. 5	0.0322	0.0077	0.0291
	Среднеквадратичная ошибка, $m/c^2$	—	0.0150	0.0032
	Максимальное отклонение, $m/c^2$	—	0.0302	0.0078
3	R3 Ст. 1	0.1330	0.3313	0.0376
	R3 Ст. 2	0.9270	1.1350	0.9691
	R3 Ст. 3	1.5270	0.7580	1.5244
	R3 Ст. 4	0.1380	0.0265	0.1398
	R3 Ст. 5	0.1870	0.1404	0.1678
	R3 Ст. 6	0.1310	0.6090	0.1575
	R3 Ст. 7	0.0450	0.0233	0.0612
	Среднеквадратичная ошибка, $m/c^2$	—	0.3620	0.0418
	Максимальное отклонение, $m/c^2$	—	0.7690	0.0954

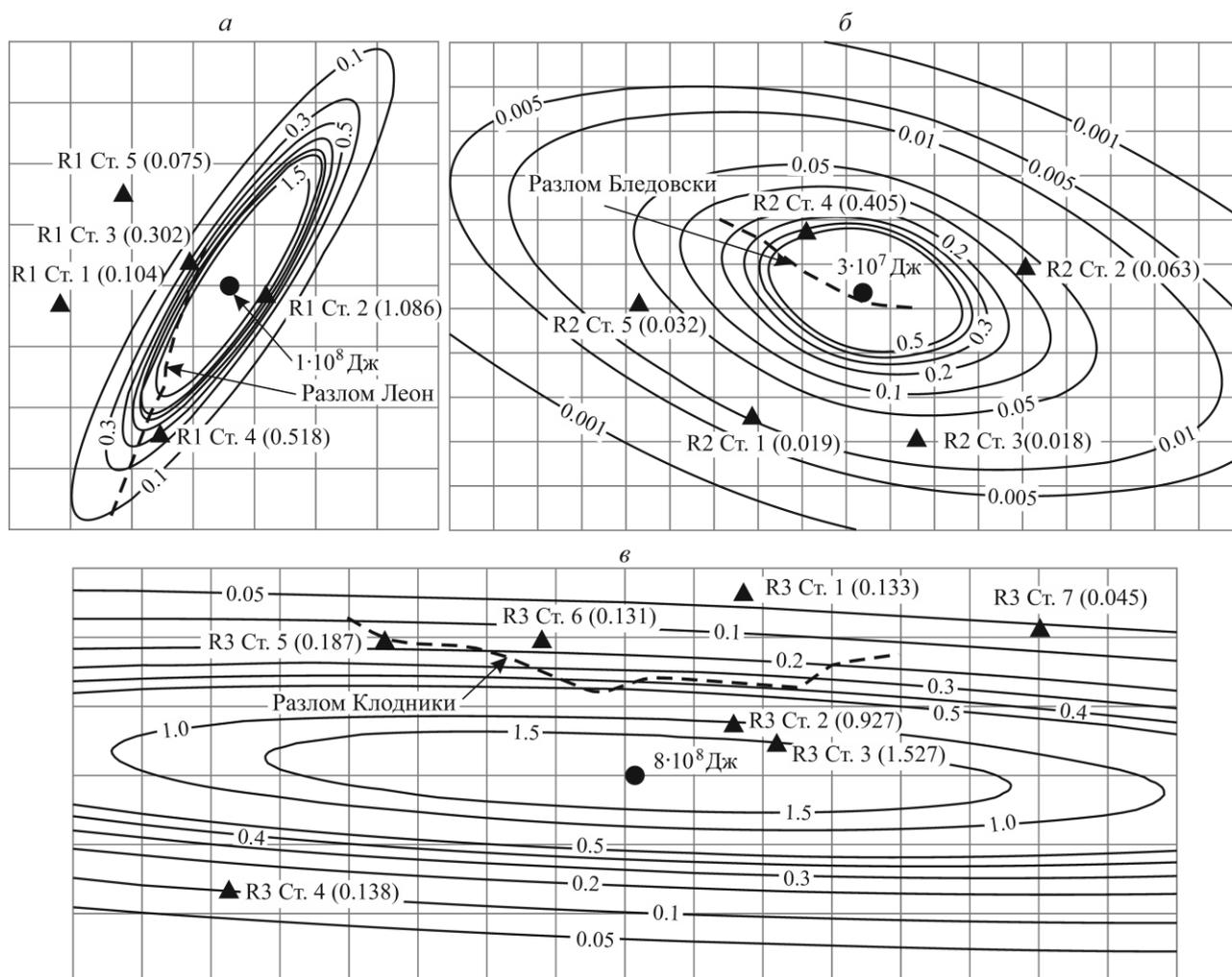


Рис. 2. Максимальные амплитуды ускорения поверхностных колебаний, зарегистрированные после толчка с энергией  $1 \cdot 10^8$  Дж, произошедшего 21.04.2011 г. (а); энергией  $3 \cdot 10^7$  Дж (15.12.2014 г.) (б) и энергией  $8 \cdot 10^8$  Дж (26.05.2014 г.) (в)

Выполненные исследования показывают зависимость между анизотропным распространением поверхностных колебаний, вызванных горными толчками, и направлением тектонических разломов, расположенных вблизи эпицентра толчков. Проводятся дальнейшие работы, направленные на количественное описание данных зависимостей.

## ВЫВОДЫ

Описаны возможности повышения точности определения поля ускорения поверхностных колебаний, вызванных горными толчками. С помощью модифицированной модели, основанной на методе статистической регрессии и учитывающей эффект направленности затухания сейсмической волны, получены более точные параметры распространения поверхностных колебаний по сравнению с традиционно применяемыми зависимостями. Проанализированы три толчка горной породы с высокой энергией. Коэффициенты корреляции при условии анизотропного распространения волны составили 0.997, 0.999 и 0.997 по сравнению со значениями 0.776, 0.990, 0.723, полученными по обычно применяемой оценке затухания. Зафиксированы меньшие среднеквадратичные ошибки (0.057, 0.003, 0.042 м/с<sup>2</sup> по сравнению с 0.399, 0.030, 0.769 м/с<sup>2</sup>). Отмечается значительная корреляция между направлением наименьшего затухания волны с ориентацией разломов в исследуемых областях.

Разработанная модель может применяться в случаях получения большого различия значений зарегистрированных параметров поверхностных колебаний при условии, что данные различия не являются результатом изменения коэффициента усиления колебаний. Установленная зависимость анизотропии распределения поверхностных колебаний от ориентации тектонических разломов требует дальнейшего исследования. Его цель — определение количественного критерия, который на стадии прогнозирования параметров колебания грунта позволит определить, какие разломы и каким образом влияют на анизотропию распространения сейсмической волны.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Gibowicz S. J.** Problems connected with assessing seismic risk in mining areas, Materials from the 2<sup>nd</sup> National Symp. on Surface Protection from Mining Damage, Soc. of Min. Eng. and Techn. — the Managing Board, 1985. — P. 56–70.
2. **Gibowicz S. J. and Kijko A.** An introduction to mining seismology, Acad. Press, INC, 1994.
3. **Orlecka-Sikora B., Cesca S., Lasocki S., Lizurek G., Wiejacz P., Rudziński Ł., Urban P., and Kozłowska M.** Complex source mechanisms of mining-induced seismic events and their exceptional surface impacts: the case from Rudna copper-ore mine in Poland, J. Geophys., 2014, Vol. 198. — P. 40–54.
4. **Pitilakis K.** Site effects, in recent advances in earthquake geological engineering and microzonation, Ansal A. Ed., Kluwer Acad. Publ., Dordrecht, 2004.
5. **Nakamura Y.** A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface, Quarterly Report of Railway Technical Research Institute, Japan, 1989, Vol. 30. — P. 25–33.
6. **Olszewska D. and Lasocki S.** Application of the horizontal to vertical spectral ratio technique for estimating the site characteristic of ground motion caused by mining induced seismic events, Acta Geoph. Pol., 2004, Vol. 52. — P. 301–318.
7. **Frej A. and Zuberek W. M.** Local effects in peak accelerations caused by mining tremors in Bytom Syncline region (Upper Silesia), Acta Geodyn. Geomater., 2008, Vol. 5, No. 2. — P. 115–122.
8. **Joyner W. B. and Boore D. M.** Peak horizontal acceleration and velocity from strong-motion records including records from the 1979 Imperial Valley, California Earthquake. Bull. Seismol. Soc. Am., 1981, Vol. 71. — P. 2011–2038.
9. **Boore D. M. and Joyner W. B.** The empirical prediction of ground motion, Bull. Seismol. Soc. Am., 1982, Vol. 72. — P. 43–60.
10. **Atkinson G. M. and Boore D. M.** Earthquake ground-motion prediction equation for eastern North America, Bull. Seismol. Soc. Am., 2006, Vol. 96. — P. 2181–2205.
11. **Douglas J.** Ground-motion prediction equations 1964–2010, Pacific Earthquake Eng. Res. Center, PEER Report, 2011. — 102 p.
12. **Sin-Chi Kuok, Iok-Tong Ng, and Ka-Veng Yuen.** Study of the attenuation relationship for the Wenchuan Ms 8.0 earthquake, J. Earthquake Eng. and Eng. Vibration, 2015, Vol. 14. — P. 1–11.
13. **Ka-Veng Yuen, Gilberto A. Ortiz, and Ke Huang.** Novel nonparametric modelling of seismic attenuation and directivity relationship, J. Computer Methods in Applied Mech. and Eng., 2016, Vol. 311. — P. 537–555.
14. **Bańka P.** Acceleration field of ground vibrations and anisotropy of wave propagation, Int. J. Min. Mater. Metall. Eng., 2015, Vol. 1. — P. 1–10.
15. **Angell I. O.** A practical introduction to computer graphics, United Kingdom, The Macmillan Press, 1981.
16. **Draper N. R. and Smith H.** Applied regression analysis, New York, Wiley, 1966.
17. **Tarantola A.** Inverse problem theory and methods for model parameter estimation, Philadelphia, Society for Industrial and Applied Mathematics, 2005.

*Поступила в редакцию 12/IX 2019*

*После доработки 14/IX 2019*

*Принята к публикации 10/IV 2020*