ISSN 2411-3336; e-ISSN 2541-9404

ЗАПИСКИ ГОРНОГО ИНСТИТУТА

Journal of Mining Institute

Сайт журнала: pmi.spmi.ru

Научная статья

Геотехнология и инженерная геология

Исследование влияния массовых взрывов на законтурный массив

Е.Б.Шевкун, Е.А.Шишкин✉

Тихоокеанский государственный университет, Хабаровск, Россия

***Как цитировать эту статью*:** Шевкун Е.Б., Шишкин Е.А. Исследование влияния массовых взрывов на законтурный массив // Записки Горного института. 2026. Т. 279. С. 13-24. EDN NMLQQP

Аннотация

Волна напряжения, возникающая при взрывании блока горной породы, вызывает колебания законтурного массива. В области законтурного массива, где наблюдается превышение допустимой скорости, прочность породы значительно снижается, что может привести к обрушению близлежащих уступов. Исследование направлено на разработку методики определения границы сейсмически опасной зоны законтурного массива при взрыве, а также оценку влияния интервала межскважинного замедления на положение границы опасной зоны. Рассмотрены упругие колебания породы законтурного массива под действием взрывной волны. Зависимость смещения породы массива под действием напряжения представляет собой функцию времени и расстояния от места взрыва. Для определения значений коэффициентов зависимости, учитывающих затухание волны напряжения в горной породе с увеличением расстояния от места взрыва, проведена серия производственных экспериментов в условиях карьера «Долина» ООО «Амур Минералс». Разработана методика определения положения границы зоны законтурного массива, за пределами которой скорость смещения горной породы не превышает допустимого значения. Исходными данными для расчета являются физико-механические характеристики породы массива и параметры применяемых взрывчатых веществ. В среде Simulink была разработана имитационная модель, реализующая описанную методику. Для проверки результатов моделирования была разработана методика энергетической оценки процесса смещения горной породы под действием волны напряжения. Результаты энергетической оценки позволили сделать вывод о достаточной для практических расчетов точности предлагаемой методики определения положения границы опасной зоны законтурного массива. Проведен анализ расхождения значений энергии смещения одной и той же точки законтурного массива при различных замедлениях скважинных зарядов. Установлено, что взрывание горного массива с увеличенными интервалами межскважинных замедлений позволяет повысить сохранность законтурного массива с входящими в него уступами вышележащих горизонтов без потери качества рыхления горной породы взрываемого блока.

Ключевые слова

массовый взрыв; упругая зона; волна напряжения; скорости смещения; уступ; устойчивость; межскважинное замедление

Финансирование

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-27-20036, https://rscf.ru/project/24-27-20036, и финансирования со стороны Министерства образования и науки Хабаровского края.

Поступила: 04.10.2025 ***Принята: 24.12.2025*** ***Онлайн: 14.05.2026*** ***Опубликована: 20.07.2026***

Введение

Взрывное рыхление является эффективным способом подготовки горной породы к выемке [1-3]. Взрыв скважинного заряда приводит к возникновению волны напряжения. В упругой зоне законтурного массива амплитудные значения волны напряжения меньше предела прочности породы на растяжение [4, 5]. В этой зоне волна напряжения вызывает упругие колебания породы, потенциально опасные с точки зрения разрушительной способности. Установлено, что упругие колебания породы со скоростью, превышающей допустимое значение, приводят к уменьшению прочности массива [6, 7]. Поэтому скорость смещения горной породы принимают в качестве показателя, оценивающего сейсмическое действие взрыва. Превышение допустимой скорости вызывает значительное снижение прочности породы законтурного массива, что может привести к обрушению близлежащего уступа непосредственно после взрыва [8, 9]. Кроме того, возникающие в законтурной зоне упругие колебания способствуют развитию микротрещин в близлежащем уступе [10, 11], что

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

может привести к «отложенному разрушению» за счет последующего механического воздействия горной техники (автотранспорт, буровые станки и т.д.). Негативная сторона сейсмического действия взрыва подтверждается обрушениями на действующих карьерах: Киембаевский карьер, карьер «Восточный» и др.

При рассмотрении процесса распространения волны напряжения в массиве особый интерес представляет закономерность изменения пиковых значений скорости смещения на различных расстояниях от места взрыва. В работе [12] приведена аналитическая зависимость скорости колебаний массива от расстояния между крайним рядом скважин взрываемого блока и пунктом измерения с учетом степени трещиноватости массива. Практическое применение зависимости затруднено наличием большого количества сложных в определении коэффициентов. В работе [4] в качестве критерия нарушенности массива предлагается коэффициент, равный отношению скорости продольной волны в образце породы к скорости продольной волны в массиве горных пород, однако методика определения коэффициента нарушенности массива весьма трудоемка. Существенно затруднено применение при ведении взрывных работ методик оценки скорости колебаний на различных расстояниях расположения защищаемого объекта от места взрыва [13-15]. Причина сложности связана с трудностью определения значений эмпирических коэффициентов, зависящих от условий взрывания и распространения сейсмовзрывных колебаний.

Для снижения опасности сейсмического действия взрыва широко используются различные способы. Например, технология экранирующего взрывания, которая заключается в образовании в массиве щели в результате взрыва близко расположенных скважинных зарядов уменьшенного диаметра [16-18]. Кроме этого используются и другие технологические решения, например инъекционное упрочнение пород откоса уступа [19]. Однако применение описанных технологических решений ведет к увеличению трудоемкости и удорожанию взрывных работ.

Более предпочтительным способом снижения сейсмического действия взрыва на законтурный массив является изменение параметров производства взрывных работ без снижения качества дробления горной породы. Наиболее перспективным параметром, регулирующим сейсмическое действие взрыва, является интервал времени замедления скважинных зарядов [20-22]. Инициирование зарядов через интервал времени, обеспечивающий образование свободной поверхности, приводит к уменьшению интенсивности нарушения законтурного массива [23]. В результате экспериментальных исследований в известковых карьерах [24] установлено, что использование интервалов межскважинного замедления свыше 42 мс приводит к снижению максимальной амплитуды скорости колебаний массива до 2,2 раз. Теоретические исследования [25] показали, что увеличение интервала замедления приводит к преобладанию низких частот в спектре колебаний. Отсюда можно сделать вывод, что применение интервалов замедления свыше 60 мс позволяет повысить устойчивость выработки. Однако в существующих исследованиях слабо изучено влияние интервалов замедления свыше 100 мс на сохранность законтурного массива.

Целью настоящего исследования является разработка относительно простой в использовании методики определения сейсмически безопасного расстояния, а также экспериментальное подтверждение положительного влияния интервала межскважинного замедления свыше 100 мс на величину сейсмически безопасного расстояния.

Методология

В зоне упругих деформаций массив представляет собой линейно-упругую среду с затуханием [26, 27], т.е. в любой точке горная порода ведет себя как линейно-упругое тело,

$$\sigma(t) = ku(t), \tag{1}$$

где σ – напряжение, Па; k – коэффициент пропорциональности, характеризующий жесткость горной породы; u – смещение, м.

При переходе от одной точки к другой по мере удаления от источника возбуждения происходит ослабление (затухание) сигнала за счет диссипации энергии [28]

$$\sigma_{max} = \sigma_{max}(r), \tag{2}$$

где σ_{max} – максимальное напряжение, достигаемое в рассматриваемой точке, Па; r – расстояние от места возмущения до рассматриваемой точки, м.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Таким образом, в любой точке среды напряжение, вызванное волной возбуждения, является функцией не только времени t, но и расстояния r от источника возмущения, $\sigma = f(t, r)$.

Восходящую ветвь положительной фазы функции $\sigma(t)$ можно описать при помощи параболической функции

$$\sigma(t) = -ct^2 + 2\sqrt{cdt}, \tag{3}$$

где c – коэффициент, зависящий от времени t_{max} достижения максимального значения σ, $\sigma = \sigma_{max}$; d – коэффициент, зависящий от амплитуды импульса σ_{max}.

Подставив формулу (3) в выражение (1), получим зависимость смещения $u(t)$ для конкретной точки массива

$$u(t) = -\frac{c}{k}t^2 + \frac{2}{k}\sqrt{cdt}, \tag{4}$$

преобразуем равенство (4)

$$u(t) = -at^2 + 2\sqrt{abt}, \tag{5}$$

где a – коэффициент, зависящий от времени достижения амплитудного значения t_{max} амплитудного значения смещения $u = u_{max}$; b – коэффициент, зависящий от амплитудного значения смещения u_{max}.

Как видно из уравнения (5), функция изменения смещения $u(t)$ повторяет функцию изменения возбуждающего импульса $\sigma(t)$, но с иными коэффициентами:

$$a = \frac{u_{max}}{t_{max}^2}; \quad b = u_{max}. \tag{6}$$

Смещение u, описываемое уравнением (5), является функцией времени t и расстояния r от источника возмущения $u = f(t, r)$. Затухание волны напряжения в горной породе с увеличением расстояния r от места взрыва учитывается коэффициентами a и b: $a = f(r)$; $b = f(r)$. Для получения численных значений времени t_{max} и соответствующего смещения u_{max}, используемых в формуле (6), была проведена серия производственных экспериментов в условиях карьера «Долина» ООО «Амур Минералс», Хабаровский край.

Условия проведения экспериментов следующие:

• исследуемые горизонты – 180-170, 170-165, 150-140;

• породы блока представлены песчаником кварц-полевошпатового, калиевошпатового составов от светло-серого до серого цвета с пачками биотита;

• межскважинные замедления – 42×67 мс, 176×200 мс;

• вид забойки – буровая мелочь;

• инициирование взрывной сети осуществлялось с помощью неэлектрической системы инициирования «Искра» (Россия);

• физико-механические свойства горной породы (коэффициент крепости по шкале М.М.Протодьяконова f = 11-13; плотность $\rho_0 = 2650$ кг/м^3; предел прочности при сжатии $\sigma_{сж} = 92$ МПа; предел прочности при растяжении $\sigma_р = 7{,}2$ МПа; модуль Юнга $E = 27{,}8$ ГПа; коэффициент Пуассона $\nu = 0{,}27$).

На целике, расположенном на расстоянии около 20 м от границы блока, устанавливались сейсмоприемники (рис.1). Измерения проводились с помощью комплекса регистрации сейсморазведочной станции Лакколит 24-М2 (Россия) (рис.2, *а*). Разрядность АЦП комплекса составляет 24 бита. В качестве сейсмоприемников использовались геофоны GS-20DX (США), которые подключались к сейсмокосе комплекса регистрации (рис.2, *б*); чувствительность геофона $\alpha = 27{,}6 \times \times 10^3$ мкВ/(мм/с).

Источником сейсмоакустических колебаний генерировался возбуждающий импульс, который регистрировался сейсмоприемниками (рис.2, *б*), установленными на разных расстояниях от пункта возбуждения. Полученные с сейсмоприемников сигналы преобразовывались комплексом регистрации (рис.2, *а*) в дискретные значения U, отображаемые на экране ноутбука в виде сейсмической трассы.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

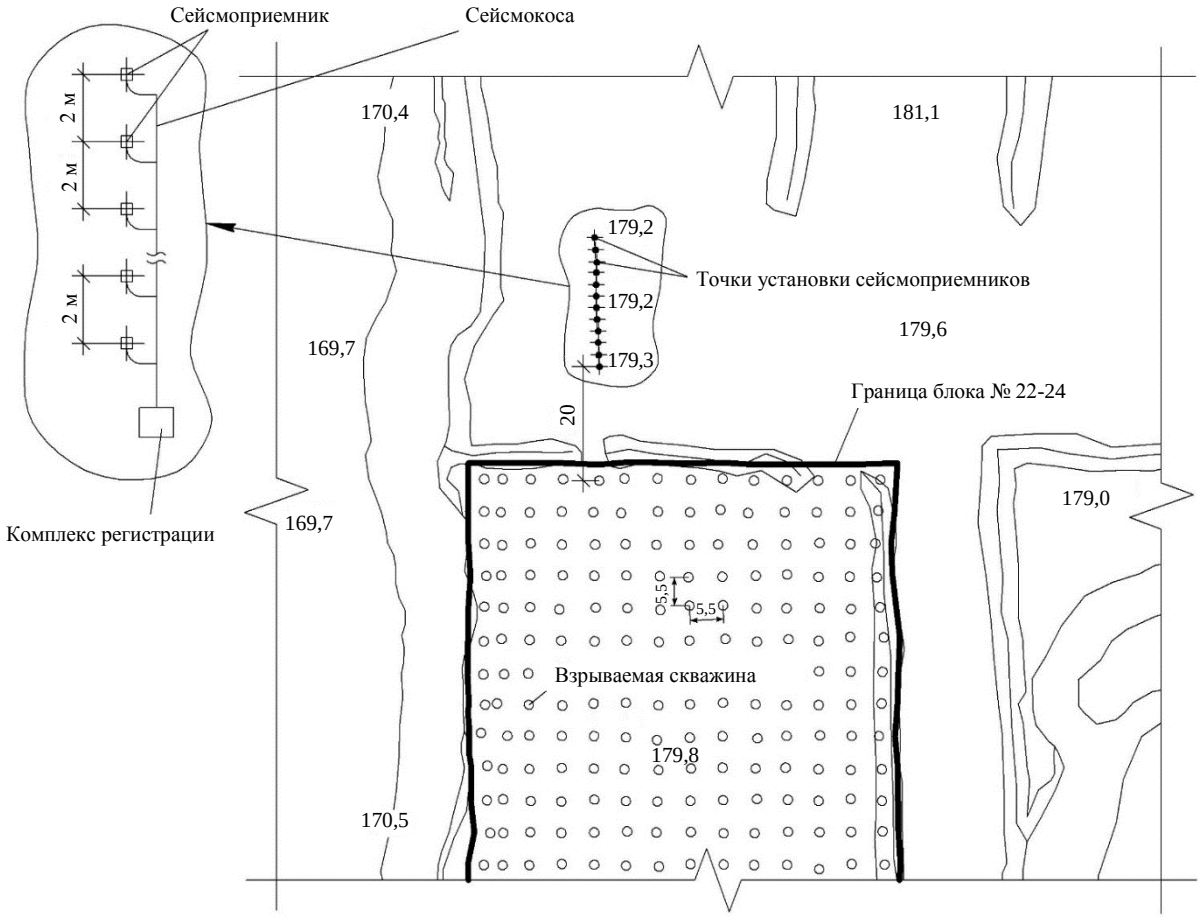


Рис.1. План расположения сейсмоприемников относительно блока № 22-24

а *б*

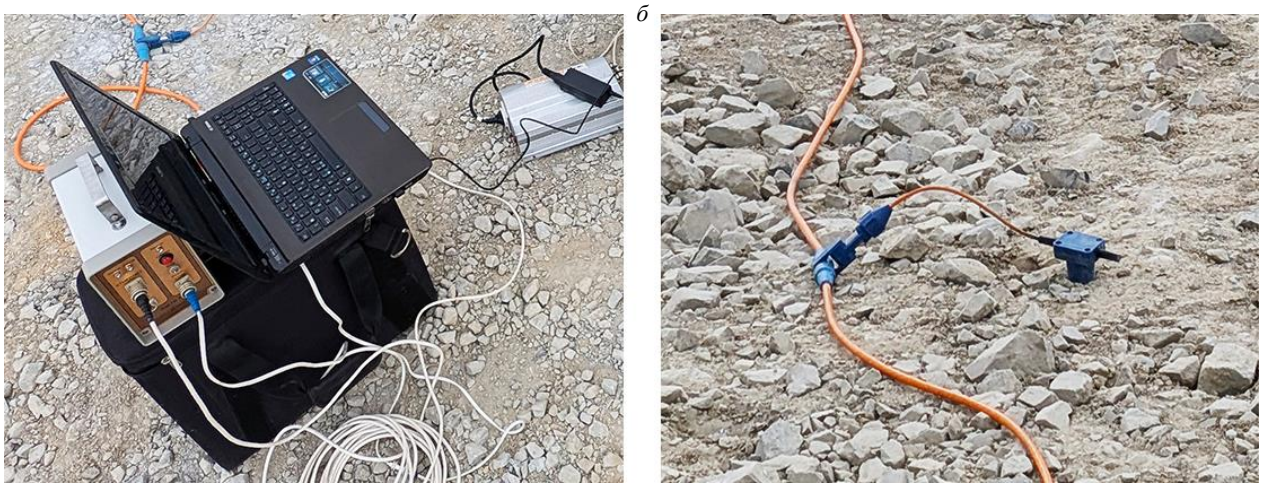


Рис.2. Сейсморазведочная станция Лакколит 24-М2: *а* – комплекс регистрации; *б* – сейсмоприемник

Преобразование полученных дискретных значений U в физическую величину скорости смещения горной породы осуществлялось по зависимости

$$\dot{u} = \frac{U}{\alpha}, \tag{7}$$

где α – чувствительность сейсмоприемника, мкВ/(мм/с).

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Анализ формы пилотного импульса, фиксируемого сейсморазведочной станцией показал, что его положительная фаза (рис.3) может быть описана зависимостью следующего вида:

$$\dot{u}(t) = \dot{u}_{\max} \sin(\omega t), \qquad (8)$$

где $\dot{u}$ – скорость смещения горной породы, мм/с; $\dot{u}_{\max}$ – максимальная скорость смещения горной породы, мм/с; ω – частота импульса, рад/с.

Абсцисса максимума кривой $\dot{u}(t)$ равна $t'_{\max} = T/4$, где T – период колебаний (рис.3); частота колебаний

$$\omega = \frac{\pi}{2t'_{\max}}. \qquad (9)$$

Зависимость смещения породы $u(t)$, соответствующая изменению скорости смещения $\dot{u}(t)$, определяется путем интегрирования выражения (8):

$$u(t) = \int \dot{u}_{\max} \sin(\omega t) dt. \qquad (10)$$

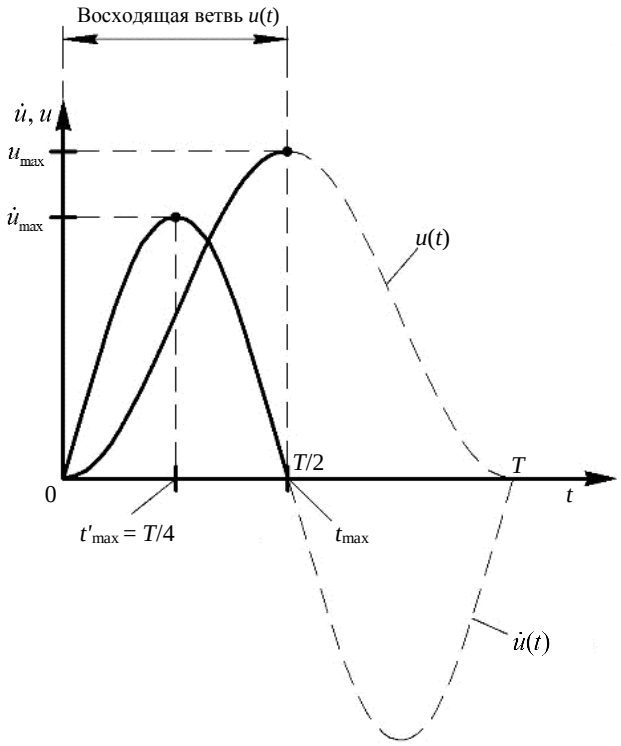


Рис.3. Временная зависимость смещения и скорости смещения горной породы

Учитывая начальные условия $t = 0$, $u = 0$, получим (рис.3)

$$u(t) = \frac{\dot{u}_{\max}}{\omega}\left[1 - \cos(\omega t)\right]. \qquad (11)$$

Момент времени $t_{\max} = T/2$ равен

$$t_{\max} = \frac{\pi}{\omega} = 2t'_{\max}; \qquad (12)$$

амплитудное значение смещения

$$u_{\max} = \frac{2\dot{u}_{\max}}{\omega}. \qquad (13)$$

С учетом формул (12), (13) зависимости (6) примут следующий вид:

$$a = \frac{\dot{u}_{\max}}{\pi t'_{\max}}; \quad b = \frac{4\dot{u}_{\max} t'_{\max}}{\pi}. \qquad (14)$$

Экспериментальные значения $t'_{\max}$ и $\dot{u}_{\max}$ для различных расстояний r использованы для расчета соответствующих величин коэффициентов a и b по формулам (14). Отсчет расстояния r начинается от границы между зоной упругих деформаций и зоной дробления. В массив значений коэффициентов $a_i(r_i)$ и $b_i(r_i)$, полученных на основе эксперимента, были добавлены коэффициенты $a_0(r = 0)$ и $b_0(r = 0)$, рассчитанные для границы зон упругих деформаций и дробления. После этого проводилась статистическая обработка этого массива. Из физических соображений в качестве аппроксимирующей функции была выбрана экспоненциальная зависимость, поскольку она описывает ослабление упругой волны при ее распространении в диссипативной среде [29]. При аппроксимации был использован метод наименьших квадратов, коэффициент детерминации R^2 составил 0,88.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

На границе зоны упругих деформаций и зоны дробления, т.е. при $r = 0$, согласно формуле (6),

$$a_0 = \frac{u_{\max 0}}{t_{\max 0}^2}; \quad b_0 = u_{\max 0}, \tag{15}$$

где $u_{\max 0}$ – максимальное смещение породы на границе зоны упругих деформаций; $t_{\max 0}$ – время достижения максимального смещения $u_{\max 0}$.

Максимальное смещение, согласно источнику [30],

$$u_{\max 0} = \frac{1+\nu}{E}\sigma_p R, \tag{16}$$

где ν – коэффициент Пуассона горной породы; E – модуль Юнга горной породы, Па; σ_p – предел прочности горной породы при растяжении, Па; R – расстояние от места взрыва до границы зоны упругих деформаций, м.

Время достижения максимального смещения [31]

$$t_{\max 0} = \frac{54}{K} R^{1-\frac{\nu}{2(1-\nu)}} Q^{0,05}, \tag{17}$$

где K – объемный модуль упругости горной породы, Па; Q – масса заряда взрывчатого вещества, кг.

Согласно источнику [30], расстояние от места взрыва до границы зоны упругих деформаций

$$R = \frac{\nu}{1+\nu}\frac{\sigma_{сж}}{\sigma_p} r_0 \left[\frac{\rho_{ВВ} D^2}{8\sigma_{сж}\left(\frac{\rho_0 C_p^2}{\sigma_{сж}}\right)^{1/4}}\right]^{1/4} \left(\frac{\rho_0 C_p^2}{5\sigma_{сж}}\right)^{1/2}, \tag{18}$$

где $\sigma_{сж}$ – предел прочности горной породы при сжатии, Па; r_0 – радиус заряда, м; $\rho_{ВВ}$ – плотность взрывчатого вещества, кг/м^3; ρ_0 – плотность горной породы, кг/м^3; C_p – скорость продольной волны, м/с; D – скорость детонации взрывчатого вещества, м/с.

Подставив выражения (16), (17) в уравнения (15), получим

$$a_0 = \frac{(1+\nu)\sigma_p K^2 R^{\frac{\nu}{1-\nu}-1}}{2916 E Q^{0,1}}; \quad b_0 = \frac{1+\nu}{E}\sigma_p R. \tag{19}$$

В результате аппроксимации дискретных значений $a_i(r_i)$ и $b_i(r_i)$, полученных по формулам (14) на основе измеренных сейсморазведочной станцией величин $\dot{u}_{\max}$, $t'_{\max}$ на различных расстояниях r от источника возбуждения, а также значений коэффициентов a_0, b_0, рассчитанных по формулам (19), были получены следующие экспоненциальные зависимости:

$$a = m_1 e^{-n_1 r}; \quad b = m_2 e^{-n_2 r}, \tag{20}$$

где m_1, m_2, n_1, n_2 – коэффициенты, зависящие от физико-механических характеристик горной породы, для песчаника кварц-полевошпатового $m_1 = 6{,}962 \cdot 10^{20}$, $m_2 = 8783$, $n_1 = 0{,}472$, $n_2 = 0{,}609$; r – расстояние до источника возбуждения колебаний, м.

Сейсмически безопасное расстояние от места взрыва определяется путем сравнения максимальной скорости смещения $\dot{u}_{\max}$ с допустимой $\dot{u}_{доп}$ по следующему алгоритму:

• Для расстояния $r_0 = 0$ по зависимостям (19) рассчитываются величины a_0, b_0. Подставив значения коэффициентов a_0, b_0 в уравнение (5), получим зависимость $u_0(t)$ на границе упругой зоны. После дифференцирования полученной зависимости определяется значение скорости смещения $\dot{u}_{\max 0}$ для момента времени $t = 0$. Сравниваем полученное значение скорости с допустимой скоростью $\dot{u}_{доп}$: если $\dot{u}_{\max 0} > \dot{u}_{доп}$, расстояние r_0 увеличиваем на величину Δr, получая $r_1 = r_0 + \Delta r$.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

• Для расстояния r_1 по зависимостям (20) определяются величины a_1, b_1. Подставив значения коэффициентов a_1, b_1 в уравнение (5), получим зависимость $u_1(t)$ на расстоянии r_1 от границы упругой зоны. После дифференцирования полученной зависимости определяется значение скорости смещения $\dot{u}_{max1}$ для момента времени $t = 0$. Сравниваем полученное значение скорости с допустимой скоростью $\dot{u}_{доп}$: если $\dot{u}_{max1} > \dot{u}_{доп}$, расстояние r_1 увеличиваем на величину Δr, получая $r_2 = r_1 + \Delta r$.

Алгоритм повторяется до тех пор, пока не будет выполнено условие $\dot{u}_{max} \le \dot{u}_{доп}$. В таком случае расстояние $(r_n + R)$ принимается за допустимое, так как отсчет расстояния r ведется от границы зоны упругих деформаций.

Согласно работе [32], для песчаника, характеризуемого прочностью на сжатие 92 МПа, прочностью на растяжение 7,2 МПа, модулем Юнга 27,8 ГПа, допустимое значение скорости смещения горной породы $\dot{u}_{доп}$ составляет 14 см/с.

Значение скорости продольной волны C_p, участвующей в уравнении (18), определялось с использованием результатов измерений сейсморазведочной станции. На сейсмической трассе фиксировалось время первого вступления продольной волны [33, 34], дошедшей до i-го сейсмоприемника, которое соответствует первому отклонению частиц среды от нулевого положения. Скорость пробега сигнала от источника сейсмоакустических колебаний до i-го сейсмоприемника определялась по зависимости

$$C_i = \frac{\Delta u_{пр i}}{\Delta t_{пр i}}, \tag{21}$$

где $\Delta u_{пр i}$ – расстояние от источника сейсмоакустических колебаний до i-го сейсмоприемника, м; $\Delta t_{пр i}$ – время пробега сигнала от источника сейсмоакустических колебаний до i-го сейсмоприемника, с.

На основе полученных для различных сейсмоприемников значений скорости продольной волны C_i рассчитывалась средняя скорость продольной волны C_p.

На рис.4 приведена структурная схема имитационной модели, реализующей описанный алгоритм определения сейсмически безопасного расстояния. Модель включает следующие подсистемы: 1 – исходные данные; 2 – определение коэффициентов a_0 и b_0 на границе зоны упругих деформаций; 3 – аппроксимация – получение экспоненциальных зависимостей (20); 4 – определение максимальной скорости смещения горной породы на расстоянии r_i от места взрыва; 5 – условие окончания итеративного процесса – $\dot{u}_{max} \le \dot{u}_{доп}$; 6 – результат моделирования – величина сейсмически безопасного расстояния, м.

Для подтверждения предлагаемой методики определения сейсмически безопасного расстояния была проведена энергетическая оценка процесса смещения горной породы под действием волны напряжения.

Пусть имеется некоторая функция смещения горной породы $u(t)$ под действием напряжения $\sigma(t)$. Рассмотрим смещение u горной породы из исходного положения в положение максимального смещения за время t_{max}, т.е. восходящую ветвь функции $u(t)$ (рис.3). Работа смещения

$$A = Fu, \tag{22}$$

где F – радиальная сила, воздействующая на горную породу; u – смещение горной породы.

Выделим в горной породе единичную площадку, перпендикулярную напряжению σ, тогда сила F, приложенная к этой площадке, будет численно равна напряжению σ. Энергия, необходимая для смещения этой площадки,

$$Э = \int_0^{t_{max}} \sigma(t) u(t) dt. \tag{23}$$

Поскольку горная порода рассматривается как линейно-упругое тело, закон (1) справедлив в том числе для максимальных значений напряжения в породе и смещения породы на границе зоны упругих деформаций

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

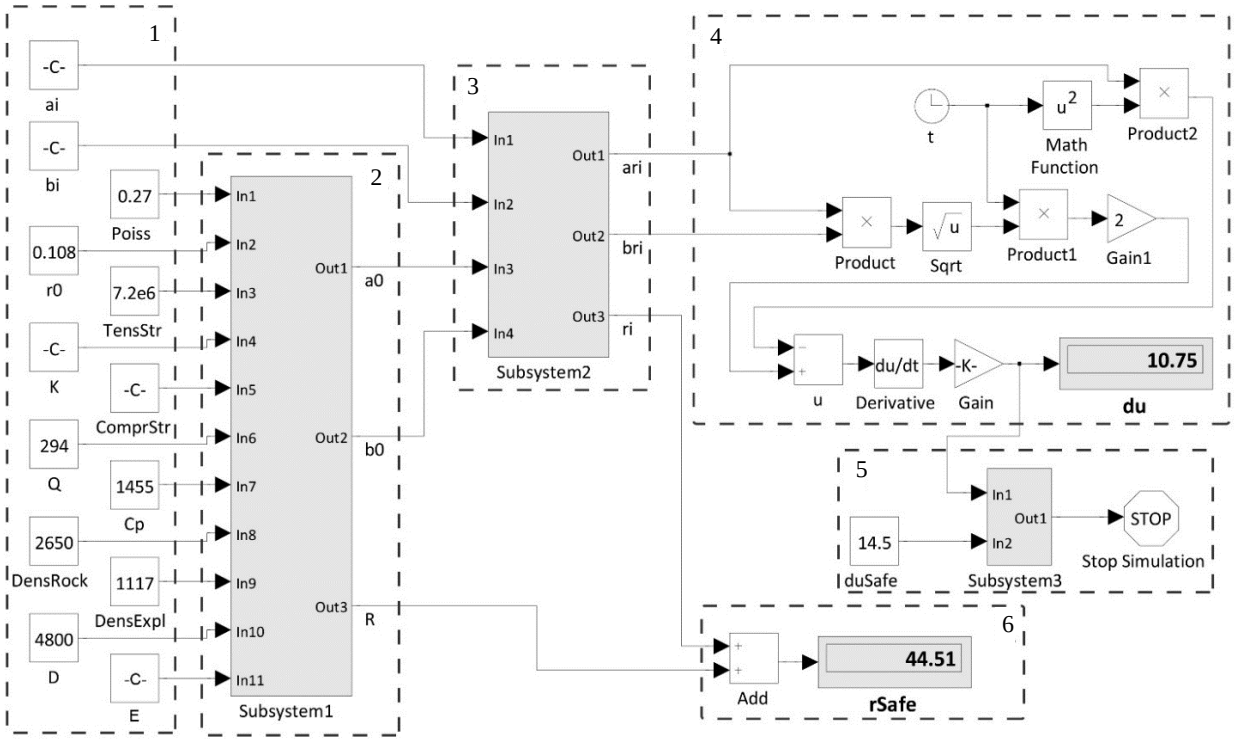


Рис.4. Схема имитационной модели в среде Simulink

$$\sigma_{\max 0} = k u_{\max 0}, \tag{24}$$

где σ_{max0} – максимальное напряжение, достигаемое на границе зоны упругих деформаций.

Из выражения (24) получим коэффициент пропорциональности, характеризующий жесткость горной породы,

$$k = \frac{\sigma_{\max 0}}{u_{\max 0}}. \tag{25}$$

Амплитудное значение напряжения, достигаемое на границе зоны упругих деформаций, согласно [30],

$$\sigma_{\max 0} = \sigma_{\text{р}}. \tag{26}$$

С учетом выражений (16), (24), (25), (26) уравнение (23) примет следующий вид:

$$Э = \frac{E}{(1+\nu)R} \int_0^{t_{\max}} u^2(t)\,dt. \tag{27}$$

Так как рассматривается только восходящая ветвь сигнала $u(t)$, т.е. для $t > t_{\max}$ значения функции считаются равными нулю, верхний предел интегрирования (27) можно изменить на ∞:

$$Э = \frac{E}{(1+\nu)R} \int_0^{\infty} u^2(t)\,dt. \tag{28}$$

Известная из спектрального анализа теорема Релея имеет вид

$$\int_0^{\infty} f^2(t)\,dt = \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} F^2(\omega)\,d\omega, \tag{29}$$

где $f(t)$ – некоторая функция; $F(\omega)$ – спектральная плотность функции $f(t)$; ω – частота.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Сравнив уравнения (28) и (29) и выбрав в качестве $f(t)$ функцию $u(t)$, имеем уравнение

$$Э = \frac{E}{(1+\nu)R}\int_0^\infty u^2(t)dt = \frac{E}{\pi(1+\nu)R}\int_0^\infty F^2(\omega)d\omega. \quad (30)$$

Площадь, ограниченная спектром функции смещения $u(t)$, возведенным в квадрат, умноженная на коэффициент $E/\pi(1+\nu)R$, равна энергии, необходимой для смещения горной породы в пределах единичной площадки по закону $u(t)$.

Для получения численных значений энергии при различных расстояниях от места взрыва и межскважинных замедлениях было использовано указанное измерительное оборудование. Разметка точек установки сейсмоприемников осуществлялась с помощью приемника Topcon Hiper VR UHF/GSM в комплекте с полевым контроллером FC-500, установленными на переносной вехе. Снятые координаты точек с привязкой к плану местности в границах взрываемого блока заносились в память контроллера. Данная процедура проводилась для поиска мест установки сейсмоприемников после массового взрыва блока с целью проведения повторных измерений.

Дискретные значения скорости смещения рассматриваемой точки среды, полученные с помощью сейсморазведочной станции Лакколит 24-М2, преобразованы в соответствующие дискретные значения смещений путем интегрирования. С помощью алгоритма быстрого преобразования Фурье получен амплитудный спектр $F(\omega)$ сигнала смещения $u(t)$ длительностью t_{max}. На рис.5 показан спектр мощности $F^2(\omega)$, рассчитанный путем возведения в квадрат значений амплитудного спектра $F(\omega)$. Наличие нехарактерных высокочастотных составляющих в спектре обусловлено тем, что разлагается в спектр не весь сигнал смещения $u(t)$, а лишь его часть длительностью t_{max}. Как известно из спектрального анализа, более короткий сигнал имеет более широкий спектр. Кроме того, разлагаемый в спектр сигнал смещения имеет резкий спад в момент времени $t = t_{max}$ (см. рис.3), что также добавляет в спектр высокочастотные составляющие.

Площадь под кривой на графике спектра мощности соответствует величине $\int_0^\infty F^2(\omega)d\omega$. Подставляя это значение в формулу (30), получим численное значение энергии, необходимой для смещения горной породы в результате воздействия на него импульса напряжения $\sigma(t)$. Данная величина может служить косвенной мерой нарушенности массива в результате взрыва.

Расхождение значений энергии до и после взрыва массива горной породы вычисляется по формуле

$$\Delta Э = 100\,\% - \frac{Э_2}{Э_1}\cdot 100\,\%, \quad (31)$$

где $Э_1$ – энергия, необходимая для смещения горной породы, до взрыва; $Э_2$ – энергия, необходимая для смещения горной породы, после взрыва.

Обсуждение результатов

В результате моделирования (рис.4) взрывного воздействия на законтурный массив, состоящий преимущественно из песчаника кварц-полевошпатового, определено значение сейсмически безопасного расстояния, равное 44,51 м. При этом расчетная скорость смещения горной породы меньше допустимой: $\dot{u}_{max} = 10{,}75$ см/с $< \dot{u}_{доп} = 14$ см/с.

Расчет численных значений энергии для точек массива, расположенных на различных расстояниях от места взрыва, показывает, что на расстоянии 26 м от места взрыва $\Delta Э = 36{,}4$ % (рис.5, *а*), а на расстоянии 45 м $\Delta Э = 5{,}8$ % (рис.5, *б*). Отсюда можно сделать вывод об отсутствии сейсмического воздействия на массив, находящийся дальше 45 м от места взрыва. Следовательно, это расстояние является сейсмически безопасным.

Во всех сериях измерений расхождение между расчетными и экспериментальными значениями безопасного расстояния не превышало 7 %, т.е. разработанная имитационная модель определения величины сейсмически безопасного расстояния является адекватной.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

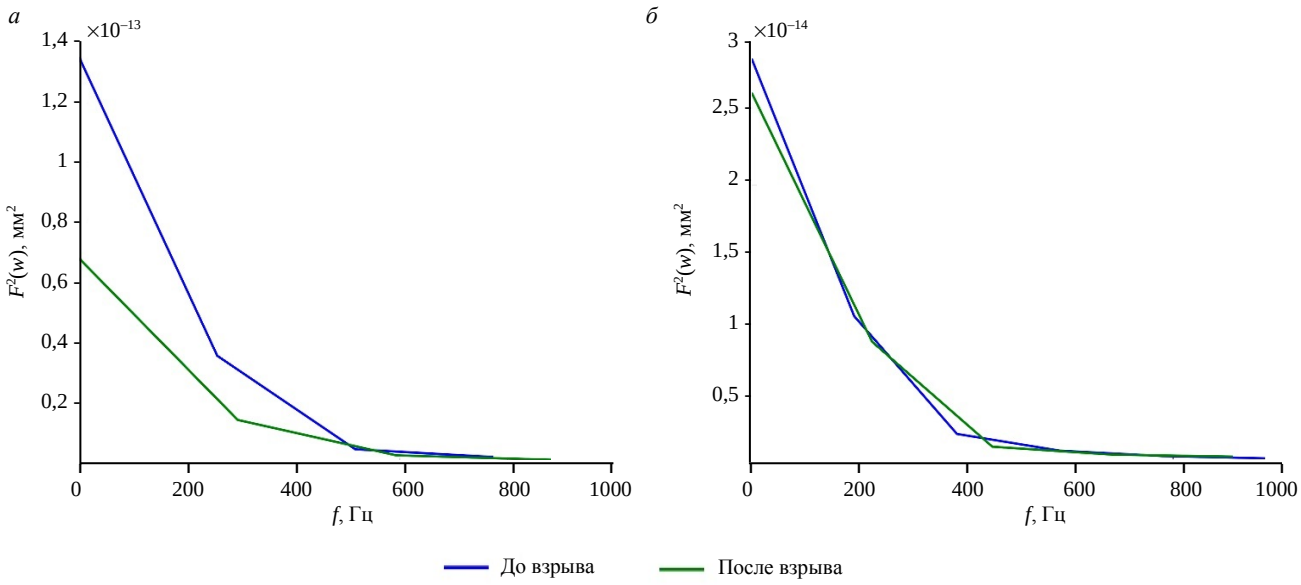


Рис.5. Спектр мощности сигнала $u(t)$ для точек массива, удаленных от места взрыва на различные расстояния: *а* – 26 м; *б* – 45 м

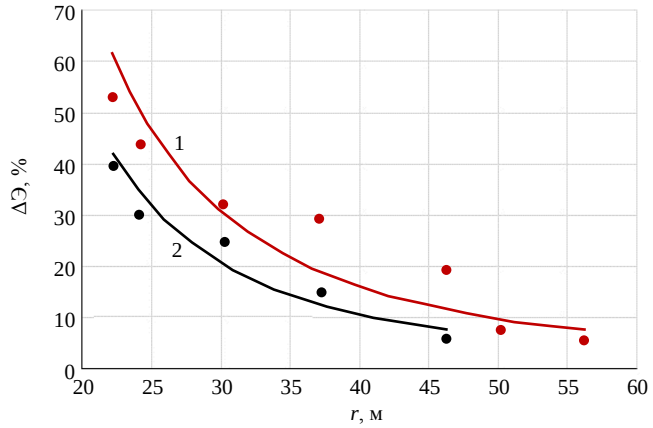


Рис.6. Влияние времени межскважинного замедления на ослабление волн напряжения:
1 – время замедления в ряду 42 мс, между рядами – 67 мс;
2 – время замедления в ряду 176 мс, между рядами – 200 мс

Для оценки влияния межскважинного замедления на сейсмически безопасное расстояние были произведены расчеты величины энергии Э, необходимой для смещения горной породы. Сравнение расхождений ΔЭ значений энергии смещения одной и той же точки законтурного массива при различных замедлениях позволяет сделать вывод о положительном влиянии увеличенного замедления на величину сейсмически безопасного расстояния (рис.6).

Увеличение интервала замедления до 200 мс позволяет снизить сейсмическое воздействие на законтурную зону взрываемого блока. Увеличение интервала замедления обеспечило завершение процесса трещинообразования в зоне действия заряда, при этом большая часть энергии взрыва расходовалась на дробление, снижая сейсмическое воздействие. При взрывании с замедлением 176×200 мс $\Delta Э_2$ в среднем в 1,83 раза меньше $\Delta Э_1$ при взрывании с замедлением 42×67 мс. При взрывании с увеличенным интервалом замедления сейсмически безопасное расстояние уменьшилось: с замедлением 176×200 мс – 46 м; с замедлением 42×67 мс – 56 м.

Заключение

Разработанная методика оценки скорости смещения горной породы дает обоснованную возможность при известных физико-механических характеристиках породы и технологических параметрах ведения взрывных работ вычислять сейсмически безопасное расстояние с достаточной для практических расчетов точностью. Разработанная методика определения энергии, необходимой для смещения горной породы, позволяет косвенно оценивать нарушенность законтурного массива в результате воздействия взрывной волны. Установлено, что увеличение интервала замедления между рядами скважинных зарядов с 67 до 200 мс позволяет уменьшить сейсмически безопасное расстояние в 1,2 раза (с 56 до 46 м для песчаника). Таким образом, взрывание горного массива с увеличенным интервалом замедления позволяет повысить сохранность законтурного массива с входящими в него уступами вышележащих горизонтов.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Главное преимущество разработанной методики определения сейсмически безопасного расстояния заключается в ее относительной простоте. Для реализации методики требуется лишь наличие сейсморазведочной станции. Методика не предполагает проведения лабораторных исследований. Практическое применение разработанной методики расчета сейсмически безопасного расстояния позволит повысить как текущую устойчивость уступов, так и устойчивость уступов на предельном контуре карьера.

Авторы выражают благодарность ООО «Амур Минералс» (Хабаровский край) за предоставленную возможность проведения инструментальной оценки изменения показателей нарушенности массива вблизи взрываемых промышленных блоков при различных параметрах массовых взрывов.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Шевкун Е.Б., Плотников А.Ю., Никулин П.В., Казарина Е.Н.* Взрывное рыхление горных пород на карьерах без развала горной массы // Горный журнал. 2024. № 6. С. 76-81. DOI: 10.17580/gzh.2024.06.12

2. *Пыталев И.А., Доможиров Д.В., Угольников Н.В. и др.* Обеспечение высокого качества взрывной подготовки пород к выемке при открытом способе добычи в сложных горно-геологических условиях и существенном росте масштабов работ // Маркшейдерский вестник. 2021. № 5-6 (144-145). С. 116-121.

3. *Афанасьев П.И., Менжулин М.Г.* Изменение среднего размера куска в зоне дробления на основе расчета диссипации энергии // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. 2022. № 4. С. 408-419.

4. *Ковальчук И.О., Кондрашов А.В., Добрынин А.А.* Определение скорости продольной сейсмической волны с целью уточнения нарушенности массива вблизи взрываемого блока // Труды РАНИМИ. 2024. № 2 (40). С. 101-105. DOI: 10.24412/2519-2418-2024-240-101-105

5. *Господариков А.П., Ревин И.Е., Морозов К.В.* Композитная модель анализа данных сейсмического мониторинга при ведении горных работ на примере Кукисвумчоррского месторождения АО «Апатит» // Записки Горного института. 2023. Т. 262. С. 571-580. DOI: 10.31897/PMI.2023.9

6. *Тюпин В.Н.* Геометрические параметры зоны сейсмического очага при массовых взрывах в карьерах // Взрывное дело. 2022. № 134/91. С. 137-154.

7. *Яковлев А.В., Шимкив Е.С.* Проблемы постановки уступов в предельное положение // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2021. № 5-1. С. 105-116. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_51_0_105

8. *Xueliang Zhu, Shuai Shao, Shengjun Shao et al.* A general kinematic approach to the effect of rock mass saturation on the stability of 3D rock slopes // Environmental Earth Sciences. 2025. Vol. 84. Iss. 1. № 9. DOI: 10.1007/s12665-024-11992-6

9. *Белов А.А., Афанасьев П.И., Шмонин И.В.* Разработка комплексного анализа сейсмовзрывного воздействия на приконтурный массив карьера: теоретические подходы, методологии и вызовы // Взрывное дело. 2025. № 146/103. С. 102-132. DOI: 10.18698/0372-7009-2023-9

10. *Романенко С.В., Ларионова Е.В., Малдыбаев У.А. и др.* Методика управления риском проявления оползневых процессов с учетом фактора сейсмической активности на территории Киргизской Республики // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2020. Т. 331. № 10. С. 155-163. DOI: 10.18799/24131830/2020/10/2865

11. *Xiaohua Ding, Yuqing Yang, Wei Zhou et al.* The law of blast stress wave propagation and fracture development in soft and hard composite rock // Scientific Reports. 2022. Vol. 12. № 17120. DOI: 10.1038/s41598-022-22109-z

12. *Тюпин В.Н.* Параметры сейсмического действия массовых взрывов в изотропном и сложноструктурном горных массивах карьеров // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2021. № 12. С. 47-57. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_12_0_47

13. *Singh P., Jayanthu S.* Pseudo-static and Dynamic Analysis of Mine Rock Slope Under the Influence of Production Blasting // Mining, Metallurgy & Exploration. 2024. Vol. 41. Iss. 6. P. 3197-3209. DOI: 10.1007/s42461-024-01112-0

14. *Hengyu Su, Shu Ma.* Study on the stability of high and steep slopes under deep bench blasting vibration in open-pit mines // Frontiers in Earth Science. 2022. Vol. 10. № 990012. DOI: 10.3389/feart.2022.990012

15. *Tingyao Wu, Chuanbo Zhou, Nan Jiang et al.* Stability analysis for high-steep slope subjected to repeated blasting vibration // Arabian Journal of Geosciences. 2020. Vol. 13. Iss. 17. № 828. DOI: 10.1007/s12517-020-05857-y

16. *Кантор В.Х., Рахманов Р.А., Аленичев И.А. и др.* Исследование параметров контурных скважинных зарядов ВВ для образования отрезной щели в горных породах при заоткоске уступов на карьерах // Взрывное дело. 2022. № 135/92. С. 32-66.

17. *Камянский В.Н.* Оценка сейсмовзрывных нагрузок на законтурный массив при разделке отрезной щели // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2018. № 7. С. 181-188. DOI: 10.25018/0236-1493-2018-7-0-181-188

18. *Шеметов П.А., Умаров Ф.Я.* Сейсмобезопасная технология БВР в приконтурной зоне карьера и вблизи ответственных сооружений // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2013. № 8. С. 221-224.

19. *Угляница А.В.* Глубинные инъекционные марки для повышения устойчивости бортов карьера // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2023. № 1 (155). С. 87-94. DOI: 10.26730/1999-4125-2023-1-87-94

20. *Шевкун Е.Б., Лещинский А.В., Лысак Ю.А., Плотников А.Ю.* Взрывное рыхление пород на карьерах с большими замедлениями // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2020. № 10. С. 29-41. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-10-0-29-41

21. *Peng Xu, Renshu Yang, Jinjing Zuo et al.* Research progress of the fundamental theory and technology of rock blasting // International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials. 2022. Vol. 29. Iss. 4. P. 705-716. DOI: 10.1007/s12613-022-2464-x

22. *Ляшенко В.И., Кислый П.А.* Обоснование сейсмобезопасной технологии разрушения горного массива сложноструктурных месторождений // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2017. № 6. С. 314-332.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

23. *Яковлев А.В., Шимкив Е.С., Переход Т.М.* Основные направления и результаты исследований дробления трудновзрываемых пород // Проблемы недропользования. 2019. № 3 (22). С. 137-144. DOI: 10.25635/2313-1586.2019.03.137

24. *Бульбашева И.А.* Управление сейсмическим воздействием взрывов на опоры линий электропередачи при открытой разработке месторождений: Автореф. дис. … канд. техн. наук. СПб: Санкт-Петербургский горный университет, 2019. 19 с.

25. *Зыков В.С., Иванов В.В., Соболев В.В.* Исследования влияния массовых промышленных взрывов на устойчивость подземных горных выработок при открыто-подземной разработке угольных месторождений // Безопасность труда в промышленности. 2018. № 11. С. 19-23. DOI: 10.24000/0409-2961-2018-11-19-23

26. *Козырев С.А., Власова Е.А., Усачев Е.А.* Инженерная методика оперативной оценки сейсмовзрывного воздействия на законтурный массив в карьере // Горная промышленность. 2024. № 5. С. 66-73. DOI: 10.30686/1609-9192-2024-5-66-73

27. *Li Chengjie, Wang Mengqi, Xie Shoudong et al.* Experimental investigation of blasting stress wave attenuation in sandstone with columnar charging using high-speed DIC technique // Scientific Reports. 2025. Vol. 15. № 22515. DOI: 10.1038/s41598-025-02662-z

28. *Shuailong Jia, Zhiliang Wang, Jianguo Wang et al.* Experimental and theoretical study on the propagation characteristics of stress wave in filled jointed rock mass // PLoS ONE. 2021. Vol. 16 (9). № e0253392. DOI: 10.1371/journal.pone.0253392

29. *Can Liu, Feifei Wang, Qingyang Ren et al.* Field test of blasting vibration and adjacent slope stability under the influence of blasting vibration in mining // Journal of Vibroengineering. 2023. Vol. 25. Iss. 4. P. 713-728. DOI: 10.21595/jve.2022.22826

30. *Ракишев Б.Р.* Автоматизированное проектирование и производство массовых взрывов на карьерах. Алматы: Гылым, 2016. 340 с.

31. *Масаев Ю.А., Масаев В.Ю., Дрозденко Ю.В., Аксенова О.Ю.* Условия формирования волн напряжения при взрыве шпуровых зарядов взрывчатого вещества и их влияние на качество разрушения горных пород при проходке горных выработок // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2021. Т. 332. № 11. С. 110-116. DOI: 10.18799/24131830/2021/11/3432

32. *Жариков С.Н., Кутуев В.А.* Построение номограммы для определения параметров БВР в приконтурной зоне карьера // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. 2020. № 3. С. 161-171. DOI: 10.25635/r0915-0037-0746-z

33. *Linghao Kong, Peng Yan, Wenbo Lu et al.* Estimation of P-wave velocities based on pulse rise time in blasting vibration // Measurement. 2025. Vol. 258. Part A. № 119079. DOI: 10.1016/j.measurement.2025.119079

34. *Botelho A.H., Dineva S., Ping Zhang, Nordlund E.* Modification of seismic waves and particle velocity close to the excavation surface from mining-induced seismicity at Kiirunavaara Mine, Sweden // Tunnelling and Underground Space Technology. 2025. Vol. 165. № 106850. DOI: 10.1016/j.tust.2025.106850

***Авторы*: Евгений Борисович Шевкун,** *д-р техн. наук, профессор* (*Тихоокеанский государственный университет, Хабаровск, Россия*), *https://orcid.org/0000-0001-5596-7700*, **Евгений Алексеевич Шишкин,** канд. техн. наук, доцент (*Тихоокеанский государственный университет, Хабаровск, Россия*), *004655@togudv.ru, https://orcid.org/0000-0003-4387-0228*.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0