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*

Принципы классификации сейсмовзрывных источников согласно формуле USBM

А.П.Господариков[1], **М.А.Зацепин**[1]✉, **В.Н.Ковалевский**[1], **А.Н.Холодилов**[2]

[1] *Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия*

[2] *Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И.Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия*

Как цитировать эту статью: Господариков А.П., Зацепин М.А., Ковалевский В.Н., Холодилов А.Н. Принципы классификации сейсмовзрывных источников согласно формуле USBM // Записки Горного института. 2026. Т. 279. С. 82-89. EDN LDEBRD

Аннотация

В статье рассмотрено сейсмическое воздействие взрывных работ на охраняемые объекты, показана важность этого фактора для обеспечения промышленной безопасности горных предприятий и отмечен прогресс в прогнозировании уровня воздействия. Обоснована значимость применения классических формул М.А.Садовского и USBM для прогноза сейсмовзрывного воздействия. Поскольку задача классификации взрывных работ по типу их сейсмического воздействия на основе формулы М.А.Садовского решена, похожая проблема рассмотрена для формулы USBM из-за ее широкого применения в международной практике. Решение основывалось на статистическом анализе пар «коэффициент сейсмичности – показатель затухания сейсмовзрывных волн», взятых из открытых литературных источников. Впервые получены нормальное распределение показателя затухания сейсмовзрывных волн и логнормальное распределение коэффициента сейсмичности, входящие в формулу USBM, и оценены основные характеристики этих распределений. Установлен классификационный критерий, разделяющий сейсмовзрывные источники по типу сейсмического воздействия – повышенного и пониженного, оценена значимость парной регрессии и сделан вывод о статистической значимости коэффициентов, входящих в выражение классификационного критерия. Показаны проблемы классификации сейсмовзрывных источников по уровню их сейсмического воздействия как по формуле USBM, так и по формуле М.А.Садовского. Приведены примеры применения предлагаемой классификации для относительной оценки сейсмического воздействия сравниваемых сейсмовзрывных источников, рассмотрены перспективы дальнейшего исследования.

Ключевые слова

взрывные работы; сейсмовзрывные волны; скорость смещения грунта; формула USBM; статистические распределения; охраняемый объект

Финансирование

Отсутствует.

Поступила: 25.06.2025 ***Принята: 28.04.2026*** ***Онлайн: 05.06.2026*** ***Опубликована: 20.07.2026***

Введение

Взрывные работы широко применяются в горной промышленности и строительстве для эффективного дробления скальных и полускальных пород, и едва ли в ближайшее время им найдется альтернатива [1, 2]. Вместе с этим применение энергии взрыва сопровождается негативным воздействием сейсмовзрывных волн на охраняемые объекты: борт карьера [3], действующий газопровод [4, 5], подземные горные выработки при взрывании на карьере, наземные сооружения [6-8], технологическое оборудование [9], транспортный тоннель [10] и др. Установлена связь между частотой техногенных землетрясений и потребленной массой взрывчатых веществ на примере ведения взрывных работ на карьерах Кузбасса, а также причинно-следственная связь между крупномасштабными массовыми взрывами и техногенной сейсмичностью [11, 12]. Особую значимость приобретает отмеченный негативный фактор при взрывании на месторождениях, склонных к горным ударам [13]. Поэтому важной проблемой является проектирование взрывных работ, обеспечивающих безопасный уровень колебаний в основании охраняемых объектов.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Современный подход к проектированию взрывных работ базируется на применении эффективных численных алгоритмов [14-16], методов машинного обучения [17-19]. Не теряют своей актуальности и аналитические методы прогнозирования [20-22], являющиеся фундаментальной составляющей для качественной подготовки горных инженеров [23]. Отмеченные подходы имеют следующие недостатки: использование сложного математического аппарата неизбежно приводит к необходимости введения многочисленных допущений о моделируемом воздействии на объект; машинное обучение требует огромных массивов экспериментальных данных при разнообразных условиях взрывания; в аналитических методах приходится вводить эмпирические коэффициенты, характеризуемые большими погрешностями, а в ряде случаев с неясным физическим смыслом. Все указанное не позволяет сделать надежный прогноз уровня воздействия сейсмовзрывных волн на начальном этапе ведения взрывных работ. Поэтому по-прежнему остается актуальным использование классических формул, в равной мере применяемых во взрывном деле для определения скорости смещения грунта:

$$\upsilon = K(\bar{R})^{-n},$$

где K – коэффициент сейсмичности; n – показатель затухания сейсмовзрывных волн; $\bar{R} = \frac{R}{\sqrt[3]{Q}}$ – приведенное расстояние для сосредоточенного заряда (формула М.А.Садовского); $\bar{R} = \frac{R}{\sqrt{Q}}$ – приведенное расстояние для цилиндрического заряда (формула USBM); R – расстояние, м; Q – масса заряда взрывчатого вещества, кг.

В исследовании [24] установлена функциональная зависимость между показателем затухания сейсмовзрывных волн и коэффициентом сейсмичности, входящими в формулу М.А.Садовского, получены статистические распределения указанных параметров и построена классификация сейсмовзрывных источников по уровню их воздействия. Полученные результаты позволяют существенно повысить надежность прогноза сейсмического воздействия взрывных работ на охраняемые объекты при сравнительно малом объеме выборки экспериментальных данных.

Учитывая широкую распространенность использования формулы USBM, актуальным является проведение аналогичных исследований для установления статистических закономерностей параметров, входящих в формулу USBM.

Методология

Разработанная методология исследований предполагает прохождение следующих этапов:

• сбор данных по парам данных K и n из открытых литературных источников, представляющих результаты экспериментальных исследований для широкого многообразия условий ведения взрывных работ;

• анализ статистических распределений параметров, входящих в формулу USBM;

• получение классификационного критерия – зависимости показателя затухания от логарифма коэффициента сейсмичности, позволяющего разделить сейсмовзрывные источники на источники повышенного и пониженного сейсмического воздействия;

• проверка статистической значимости параметров принятого классификационного критерия.

Классификационный критерий представляет собой решение задачи минимизации среднеквадратичного отклонения экспериментальной огибающей модуля скорости смещения от огибающей, построенной на основе формулы USBM, с применением к обеим огибающим операции низкочастотной фильтрации с одинаковыми параметрами. Такой подход был использован для получения классификационного критерия на основе формулы М.А.Садовского и разработки классификации сейсмовзрывных источников. В мировой практике достаточно часто при обработке одних и тех же экспериментальных данных используют прогноз скорости смещения грунта при ведении взрывных работ, получаемый как с помощью формулы М.А.Садовского, так и формулы USBM. Таким образом, в основе методологии исследований лежат статистические методы обработки экспериментальных данных и методы низкочастотной фильтрации. Существуют исследования, позволяющие повысить статистическую обеспеченность прогноза значения скорости смещения без существенного увеличения объема экспериментальных данных [25].

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

© А.П.Господариков, М.А.Зацепин, В.Н.Ковалевский, А.Н.Холодилов, 2026

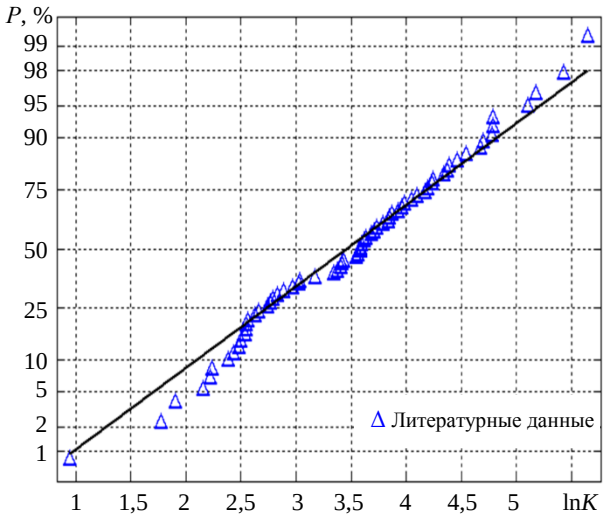


Рис.1. График кумулятивной прямой натурального логарифма коэффициента сейсмичности

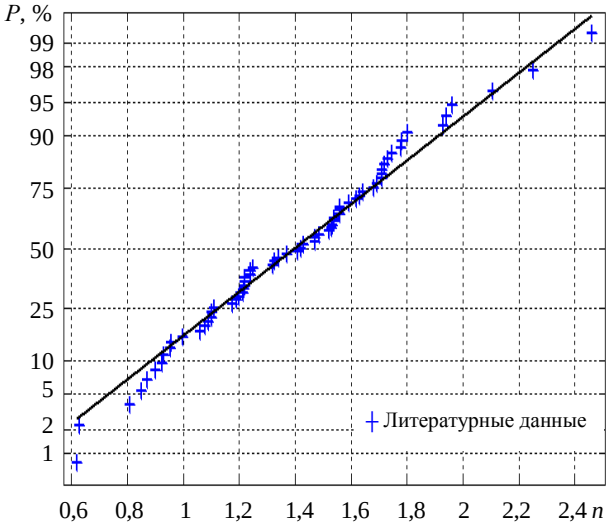


Рис.2. График кумулятивной прямой показателя затухания сейсмовзрывных волн

Результаты исследований

На основе открытых литературных источников [26, 27] для формулы USBM получены статистические данные логнормального распределения коэффициента сейсмичности (рис.1) для скорости смещения грунта и нормальное распределение коэффициента затухания сейсмовзрывных волн (рис.2). Представленные распределения ограничены значениями коэффициента сейсмичности меньше 300 и показателя затухания меньше 2,5, поскольку при больших значениях указанных параметров наблюдаются значительные отклонения от приведенных распределений. Эти статистические распределения получены впервые.

Параметры статистических распределений K и n на уровне надежности 95 %: условие $2 < K < 300$; N – количество точек, $N = 67$; $\overline{\ln K}$ – среднее значение натурального логарифма коэффициента сейсмичности, $\overline{\ln K} = 3,51^{+0,23}_{-0,23}$; σ_K – среднее квадратичное отклонение коэффициента сейсмичности, $\sigma_K = 0,95^{+0,17}_{-0,17}$; $\overline{K}$ – среднее значение коэффициента сейсмичности, $\overline{K} = 53^{+26}_{-17}$; $K_{\text{мед}}$ – медианное значение коэффициента сейсмичности, $K_{\text{мед}} = 33,5^{+8,6}_{-6,9}$; $\overline{n}$ – среднее значение показателя затухания сейсмовзрывных волн, $\overline{n} = 1,40^{+0,09}_{-0,09}$.

Анализ рис.1 показал, что видимые отклонения от кумулятивной прямой наблюдаются при значениях коэффициента сейсмичности K меньше 12 для небольшого количества экспериментальных точек. В то же время экспериментальные точки показателя затухания n сейсмовзрывных волн достаточно ровно ложатся на кумулятивную прямую и не имеют характерных отклонений, как это следует в случае показателя затухания n по формуле М.А.Садовского. В последнем случае наблюдаются пиковые значения n = 1,5 в результате доминирующего вклада в сейсмическое воздействие поверхностных волн Рэлея и n = 2 в случае объемных волн.

Для получения выражения для классификационного критерия использовались экспериментальные данные для массового взрыва и методика, приведенные в исследовании [24] и адаптированные для формулы USBM:

$$n = 0,33\ln K + 0,75. \quad (1)$$

Разумно связать свободный член в формуле (1) с геометрией сейсмовзрывного источника, тогда физически реализуемое значение свободного члена не должно быть отрицательным.

Согласно выражению (1), вид аппроксимирующей функции для пар по K и n имеет следующий вид:

$$n = \hat{a}\ln K + \hat{b},$$

где $\hat{a}$ – угловой коэффициент; $\hat{b}$ – свободный член.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Параметры $\hat{a}$ и $\hat{b}$ определяются в результате статистической обработки пар по K и n, статистические распределения которых приведены на рис.1, 2. Численные значения параметров $\hat{a}$ и $\hat{b}$ и границы их доверительных интервалов представлены в таблице.

Результаты статистической обработки выборок

Условие	Доверительный интервал при доверительной вероятности 95 %		r^2
	$\hat{a}$	$\hat{b}$	
Совокупность всех точек (73 точки)	0,32±0,05	0,29±0,19	0,72
Скорректированная выборка (68 точек)	0,33±0,05	0,26±0,18	0,77

Условием существования связи между показателем затухания n сейсмовзрывных волн и коэффициентом сейсмичности K с учетом физического смысла свободного члена и левой границы его доверительного интервала будет неравенство

$$n \geq 0{,}33\ln K - 0{,}19. \qquad (2)$$

Значения n, не удовлетворяющие неравенству (2), должны исключаться из выборки вместе с соответствующими значениями K, что отражено в таблице. Тогда скорректированное выражение для классификационного критерия примет вид:

$$n = 0{,}33\ln K + 0{,}26. \qquad (3)$$

Оценим значимость уравнения парной регрессии. Фактическое значение F-критерия

$$F_{\text{факт}} = \frac{r^2}{1-r^2}(N-2) = \frac{0{,}77}{1-0{,}77}(68-2) \approx 221.$$

Табличное значение критерия Фишера при уровне значимости $\alpha = 0{,}05$ – $F_{\text{табл}} = 3{,}99$, $F_{\text{факт}} >> F_{\text{табл}}$. Следовательно, гипотеза об отсутствии линейной связи между показателем затухания n сейсмовзрывных волн и коэффициентом сейсмичности K отвергается.

Оценим значимость параметров $\hat{a}$, $\hat{b}$ и r с помощью t-статистики:

$$t_a = \frac{\hat{a}}{m_{\hat{a}}} = \frac{0{,}33}{0{,}025} = 13{,}2; \quad t_b = \frac{\hat{b}}{m_{\hat{b}}} = \frac{0{,}26}{0{,}09} = 2{,}9; \quad t_r = \frac{r}{\sqrt{\frac{1-r^2}{N-2}}} = \frac{0{,}87}{\sqrt{\frac{1-0{,}77}{68-2}}} = 14{,}9.$$

Общепринятое табличное значение коэффициента Стьюдента при уровне значимости $\alpha = 0{,}05$ $t_{\text{табл}} = 2$, отсюда t_a, t_b, $t_r > t_{\text{табл}}$. Поэтому рассматриваемые параметры неслучайно отличаются от нуля и являются статистически значимыми.

Выражение (3) удовлетворяет значениям $K_{\text{мед}}$ и $\bar{n}$ и отличается от выражения (1) только величиной свободного члена. Согласно исследованию [24], точки с координатами (K, n), лежащие выше линии 2 (рис.3), соответствуют сейсмовзрывным источникам пониженного сейсмического воздействия, ниже линии 2 (рис.3) – сейсмовзрывным источникам повышенного сейсмического воздействия. Классификация сейсмических источников согласно формуле USBM представлена на рис.3. Из-за наличия доверительного интервала для свободного члена квалификационного критерия существует смешанная область, в пределах которой тип воздействия сейсмовзрывного источника следует полагать условным или (что не будет считаться большой ошибкой) областью существования источников нормального сейсмического воздействия.

Однако можно оценить относительный уровень сейсмического воздействия различных сейсмовзрывных источников. Для этого необходимо проанализировать пары K – n: (30,2 – 1,56) [28], (177 – 1,72) [29] (рис.1-3). Необходимо вычислить разность показателей затухания, взятых из приведенных пар, и значения, полученные согласно выражению (3): для первой пары $\Delta n_1 = 1{,}56 - 0{,}33\ln 30{,}2 - 0{,}26 = 0{,}18$; для второй пары $\Delta n_2 = -0{,}25$. Следовательно, первая пара

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

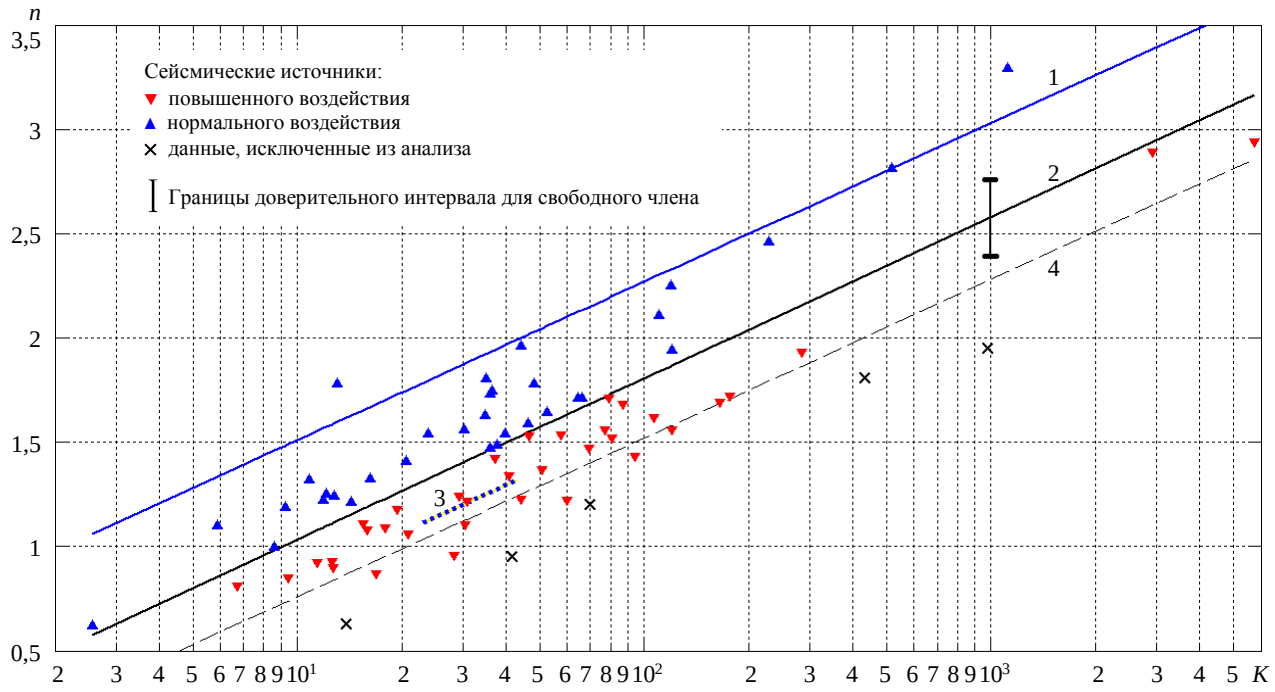


Рис.3. Классификация сейсмических источников согласно формуле USBM

1 – зависимость показателя затухания сейсмовзрывных волн от коэффициента сейсмичности согласно формуле (1); 2 – линейная регрессия выборки $n = 0{,}33\ln K + 0{,}26$, формула (3); 3 – аппроксимация данных [30]; 4 – уравнение $n = 0{,}33\ln K$

соответствует источнику пониженного сейсмического воздействия, вторая пара – источнику повышенного сейсмического воздействия. Очевидно, что из условия $\Delta n_1 - \Delta n_2 > 0$ следует, что второй источник обладает более высоким сейсмическим воздействием по сравнению с первым, а условие $\Delta n_1 - \Delta n_2 < 0$ показывает обратную ситуацию (значения коэффициентов сейсмичности пересчитаны в сантиметры на секунды, согласно рис.1 в источнике [28] и рис.5 в источнике [29]).

В соответствии с работой [31], данные, исключенные из статистического анализа, характеризуют сейсмическое воздействие при взрывании в чрезвычайно трещиноватых горных породах, что не характерно для источников повышенного сейсмического воздействия в таких породах.

Сравним результат применения выражения (3) с результатами, полученными на основе байесовского подхода и моделирования методом Монте-Карло в статье [30], в которой обобщаются 520 замеров сейсмических колебаний при разнообразных геологических характеристиках грунтов и условиях ведения взрывных работ в Гонконге. На рис.3 изображена аппроксимация этих данных, построенная согласно выражению (3), но со вторым слагаемым, равным 0,08 (линия 3). Данные, приведенные в статье [30], получены в середине 80-х годов XX в. и отражают состояние взрывных работ того времени, т.е. их повышенное сейсмическое воздействие.

Иногда для одних и тех же взрывов точки, характеризующие источники нормального сейсмического воздействия для формулы М.А.Садовского, становятся точками, характеризующими источники повышенного сейсмического воздействия для формулы USBM. Это характерно при взрывании небольших зарядов [32]. С физической точки зрения рассматривать такие заряды как удлиненные даже на сравнительно небольших расстояниях не вполне корректно.

При сравнении формул М.А.Садовского и USBM для одних и тех же взрывов актуальным параметром является показатель затухания n сейсмовзрывных волн. Из физических соображений следует, что показатель затухания сейсмовзрывных волн для формулы М.А.Садовского будет больше такого показателя для формулы USBM. Однако в ряде случаев эта закономерность не работает.

Подробное изучение этого вопроса показывает, что показатель затухания сейсмовзрывных волн для формулы USBM превышает такой же параметр для формулы М.А.Садовского при весьма неравномерном распределении экспериментальных точек по приведенному расстоянию [33]. Если

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

экспериментальные точки распределены равномерно [34], то не возникает различий в классификации сейсмических источников. Другие причины связаны с узким интервалом измеренных значений скоростей смещения [35], аномально большими значениями коэффициента сейсмичности и показателя затухания сейсмовзрывных волн [36], большой вариацией параметров взрывных работ [37], малыми значениями коэффициентов регрессии [38]. На противоречивый характер прогнозирования скорости смещения прямо указывается в статье [39], из которой следует, что на больших расстояниях формула USBM дает по скорости смещения более высокие результаты, чем по формуле М.А.Садовского. Скорость детонации взрывчатого вещества в колонке заряда конечна, поэтому шпуровой (скважинный) заряд может рассматриваться по сейсмическому воздействию как совокупность сосредоточенных зарядов взрывчатых веществ.

Заключение

Получены нормальное распределение показателя затухания сейсмовзрывных волн и логнормальное распределение коэффициента сейсмичности, входящих в формулу USBM, оценены основные характеристики этих распределений.

Проведен корреляционный анализ парных параметров коэффициента сейсмичности и показателя затухания сейсмовзрывных волн. Установлен классификационный критерий, разделяющий сейсмовзрывные источники по типу сейсмического воздействия – повышенного и пониженного, оценена значимость парной регрессии и сделан вывод о статистической значимости коэффициентов, входящих в выражение классификационного критерия.

Представлены проблемы классификации сейсмовзрывных источников по уровню их сейсмического воздействия как по формуле USBM, так и по формуле М.А.Садовского. Рассмотрены примеры практического применения предложенной классификации для относительной оценки сейсмического воздействия сравниваемых сейсмовзрывных источников.

Перспективы дальнейшего исследования заключаются в последующем накоплении экспериментальных данных для выявления тенденций изменения характеристик статистических распределений показателя затухания сейсмовзрывных волн и коэффициента сейсмичности и их парных корреляций, уточнения классификационных границ по типу сейсмического воздействия сейсмовзрывных источников с целью определения параметров взрывных работ, обеспечивающих минимально возможное сейсмическое воздействие на охраняемые объекты при оптимальных показателях взрывной подготовки горной массы.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Аленичев И.А.* Корректировка удельного расхода взрывчатого вещества с учетом обводненности апатит-нефелиновых руд // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2016. № 7. С. 364-373.

2. *Кабелко С.Г., Дунаев В.А., Яницкий Е.Б., Рахманов Р.А.* Компьютерное моделирование смещения горной массы и оценка разубоживания руды в результате массового взрыва при открытой разработке месторождений // Взрывное дело. 2018. № 120/77. С. 94-108.

3. *Kolapo P., Oniyide G.O., Said K.O. et al.* An Overview of Slope Failure in Mining Operations // Mining. 2022. Vol. 2. Iss. 2. P. 350-384. DOI: 10.3390/mining2020019

4. *Хохлов С.В., Соколов С.Т., Виноградов Ю.И., Френкель И.Б.* Проведение промышленных взрывов вблизи газопроводов // Записки Горного института. 2021. Т. 247. С. 48-56. DOI: 10.31897/PMI.2021.1.6

5. *Соколов С.Т., Хохлов С.В., Баженова А.В.* Оценка влияния взрыва протяженного блока на охраняемый объект // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2023. № 9-1. С. 122-134. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_91_0_122

6. *Яковлев В.Л., Жариков С.Н., Реготунов А.С., Кутуев В.А.* Методологические основы адаптации параметров буровзрывных работ к изменяющимся горно-геологическим условиям при разработке сложноструктурных месторождений // Горная промышленность. 2024. № 6. С. 89-97. DOI: 10.30686/1609-9192-2024-6-89-97

7. *Дарбинян Т.П., Уваров И.И., Федосеев А.В., Трофимов А.В.* Оценка сейсмического воздействия взрывных работ на поверхностные охранные объекты карьера рудника «Заполярный» ООО «Медвежий ручей» // Горный журнал. 2023. № 1. С. 102-106. DOI: 10.17580/gzh.2023.01.17

8. *Шапошник Ю.Н., Конурин А.И., Неверов А.А., Неверов С.А.* Оценка сейсмического действия массовых взрывов в карьере на поверхностные здания и сооружения // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. 2024. Т. 11. № 2. С. 97-104. DOI: 10.15372/FPVGN2024110213

9. *Василец В.Н., Афанасьев П.И., Павлович А.А.* Обеспечение условий безопасной эксплуатации горнотранспортного комплекса при воздействии сейсмовзрывных волн // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2020. №1. С. 26-35. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-1-0-26-35

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

10. *Wenxiang Xu, Jianjun Shi, Hao Zhang.* Blasting Vibration Control and Signal Analysis of Adjacent Existing Deterioration Tunnels // Applied Sciences. 2024. Vol. 14. Iss. 5. № 2212. DOI: 10.3390/app14052212

11. *Адушкин В.В., Соловьев С.П., Спивак А.А., Хазинс В.М.* Геоэкологические последствия проведения горных работ на карьерах с применением взрывных технологий // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2020. № 2. С. 164-178. DOI: 10.15372/FTPRPI20200219

12. *Протосеня А.Г., Карасев М.А., Беляков Н.А., Тулин П.К.* Прогноз предельного состояния и дилатансии пород вокруг горных выработок // Записки Горного института. 2025. Т. 276. Вып. 2. С. 107-122.12.

13. *Еременко А.А., Машуков И.В., Еременко В.А.* Геодинамические и сейсмические явления при обрушении блоков на удароопасных месторождениях Горной Шории // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2017. № 1. С. 70-76.

14. *Гладков И.В., Якунчиков Е.Н., Румянцев А.Е., Соннов М.А.* Моделирование влияния открытых горных работ на состояние нижележащего массива при планировании отработки подземным способом с применением программного комплекса CAE Fidesys // Горная промышленность. 2024. № 4. С. 165-172. DOI: 10.30686/1609-9192-2024-4-165-172

15. *Буй Мань Тунг, Нгуен Чи Тхань, Господариков А.П., Зацепин М.А.* Разработка моделей прогноза площади поперечного сечения тоннеля при ведении буровзрывных работ // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2024. № 6. С. 31-49. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_6_0_31

16. *Волохов Е.М., Кожухарова В.К., Зеленцов С.Н. и др.* Оценка эффектов взаимодействия фундамента и основания методами численного моделирования для условий подработки здания Мариинского театра в Санкт-Петербурге // Записки Горного института. 2025. Т. 276. Вып. 1. С. 16-29.

17. *Komadja G.C., Rana A., Glodji L.A. et al.* Assessing Ground Vibration Caused by Rock Blasting in Surface Mines Using Machine-Learning Approaches: A Comparison of CART, SVR and MARS // Sustainability. 2022. Vol. 14. Iss. 17. № 11060. DOI: 10.3390/su141711060

18. *Fissha Y., Ikeda H., Toriya H. et al.* Application of Bayesian Neural Network (BNN) for the Prediction of Blast-Induced Ground Vibration // Applied Sciences. 2023. Vol. 13. Iss. 5. № 3128. DOI: 10.3390/app13053128

19. *Никитин В.И., Двойников М.В., Купавых К.С., Пантелеева Т.А.* Применение машинного обучения при моделировании параметров бурового раствора реологической модели Гершеля – Балкли для оптимизации промывки скважины // Записки Горного института. 2025. Т. 275. С. 70-80.

20. *Odeyemi O.Y., Taiwo B.O., Alaba O.* Influence of explosive maximum instantaneous charge on blasting environmental impact // Journal of Sustainable Mining. 2023. Vol. 22. Iss. 4. № 6. DOI: 10.46873/2300-3960.1398

21. *Тюпин В.Н.* Прогнозирование скорости колебаний грунтов при массовых взрывах в подземных условиях // Безопасность труда в промышленности. 2021. № 6. С. 41-45. DOI: 10.24000/0409-2961-2021-6-41-45

22. *Жариков С.Н., Кутуев В.А.* Изучение промышленной сейсмики для уточнения методики оценки влияния взрывов на устойчивость охраняемых объектов // Горная промышленность. 2023. № S1. С. 122-127. DOI: 10.30686/1609-9192-2023-S1-122-127

23. *Литвиненко В.С.* Модель горного инженерного образования XXI века // Устойчивое развитие горных территорий. 2025. Т. 17. № 2 (64). С. 603-615 (in English). DOI: 10.21177/1998-4502-2025-17-2-603-615

24. *Холодилов А.Н., Господариков А.П., Еременко А.А.* Методические основы классификации взрывов по уровню их сейсмического действия // Горный журнал. 2021. № 5. С. 98-102. DOI: 10.17580/gzh.2021.05.13

25. *Новиньков А.Г., Самусев П.А., Протасов С.И.* Обеспечение сейсмической безопасности строительных объектов при массовых промышленных взрывах с учетом предельных состояний первой группы // Безопасность труда в промышленности. 2024. № 2. С. 48-57. DOI: 10.24000/0409-2961-2024-2-48-57

26. *Hajihassani M., Armaghani D.J., Marto A., Mohamad E.T.* Ground vibration prediction in quarry blasting through an artificial neural network optimized by imperialist competitive algorithm // Bulletin of Engineering Geology and the Environment. 2015. Vol. 74. Iss. 3. P. 873-886. DOI: 10.1007/s10064-014-0657-x

27. *Khandelwal M., Armaghani D.J., Faradonbeh R.S. et al.* Classification and regression tree technique in estimating peak particle velocity caused by blasting // Engineering with Computers. 2017. Vol. 33. Iss. 1. P. 45-53. DOI: 10.1007/s00366-016-0455-0

28. *Alipour A., Mokhtarian M., Abdollahei Sharif J.* Artificial Neural Network or Empirical Criteria? A Comparative Approach in Evaluating Maximum Charge per Delay in Surface Mining – Sungun Copper Mine // Journal of the Geological Society of India. 2012. Vol. 79. № 6. P. 652-658. DOI: 10.1007/s12594-012-0102-3

29. *Tripathy G.R., Shirke R.R., Kudale M.D.* Safety of engineered structures against blast vibrations: A case study // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. 2016. Vol. 8. Iss. 2. P. 248-255. DOI: 10.1016/j.jrmge.2015.10.007

30. *Yan W.M., Tham L.G., Yuen K.-V.* Reliability of empirical relation on the attenuation of blast-induced vibrations // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2013. Vol. 59. P. 160-165. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2012.12.005

31. *Mesec J., Strelec S., Težak D.* Ground vibrations level characterization through the geological strength index (GSI) // Rudarsko-geološko-naftni zbornik. 2017. Vol. 32. № 1. № 172685. DOI: 10.17794/rgn.2017.1.1

32. *Bhagwat V.P., Dey K.* Comparison of Some Blast Vibration Predictors for Blasting in Underground Drifts and Some Observations // Journal of The Institution of Engineers (India): Series D. 2016. Vol. 97. Iss. 1. P. 33-38. DOI: 10.1007/s40033-015-0086-4

33. *Ataei M., Sereshki F.* Improved prediction of blast-induced vibrations in limestone mines using Genetic Algorithm // Journal of Mining & Environment. 2017. Vol. 8. № 2. P. 291-304. DOI: 10.22044/jme.2016.654

34. *Новиньков А.Г., Протасов С.И., Гукин А.С.* Оценка сейсмобезопасности массовых промышленных взрывов // Безопасность труда в промышленности. 2013. № 6. С. 40-46.

35. *Fouladgar N., Hasanipanah M., Bakhshandeh Amnieh H.* Application of cuckoo search algorithm to estimate peak particle velocity in mine blasting // Engineering with Computers. 2017. Vol. 33. Iss. 2. P. 181-189. DOI: 10.1007/s00366-016-0463-0

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

36. *Parida A., Mishra M.K.* Blast Vibration Analysis by Different Predictor Approaches – A Comparison // Procedia Earth and Planetary Science. 2015. Vol. 11. P. 337-345. DOI: 10.1016/j.proeps.2015.06.070

37. *Rai R., Singh T.N.* A new predictor for ground vibration prediction and its comparison with other predictors // Indian Journal of Engineering and Materials Sciences. 2004. Vol. 11 (3). P. 178-184.

38. *Козырев С.А., Аленичев И.А., Соколов А.В., Усачев Е.А.* Особенности и методы снижения сейсмического воздействия взрыва отрезной щели на законтурный массив карьера // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2017. № 10. Спец. вып. 23. С. 307-315. DOI: 10.25018/0236-1493-2017-10-23-307-315

39. *Mohamad E.T., Noorani S.A., Armaghani D.J., Saad R.* Simulation of Blasting Induced Ground Vibration by Using Artificial Neural Network // The Electronic Journal of Geotechnical Engineering. 2012. Vol. 17/R. P. 2571-2584.

***Авторы*: Александр Петрович Господариков,** *д-р техн. наук, заведующий кафедрой* (*Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия*), *https://orcid.org/0000-0003-1018-6841*, **Михаил Александрович Зацепин,** *канд. физ.-мат. наук, доцент* (*Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия*), *michael_zatsepin@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-6304-8349*, **Владимир Николаевич Ковалевский,** *канд. техн. наук, доцент* (*Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия*), *https://orcid.org/0000-0002-7155-2000*, **Андрей Николаевич Холодилов,** *д-р техн. наук, профессор* (*Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И.Ульянова* (*Ленина*), *Санкт-Петербург, Россия*), *https://orcid.org/0009-0001-5244-1268*.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0