

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА СЕЙСМИЧЕСКОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ ВЗРЫВОВ ПРИ ОТКРЫТОЙ РАЗРАБОТКЕ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

Н.Н. Ефремовцев, И.Е. Шиповский

*Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В. Мельникова Российской академии наук (ИПКОН РАН), г. Москва, Российская Федерация
E-mail: noee7@mail.ru*

Аннотация. Рассмотрены основные положения методики проведения исследований сейсмического действия взрыва на полигоне и особенности применения метода сглаженных частиц (SPH) для исследования сейсмического действия взрыва в монолитных и трещиноватых массивах. Представлены результаты численных исследований, направленных на оценку влияния параметров взрывных работ на сейсмическое воздействие. В рамках полигонных испытаний и численного моделирования методом сглаженных частиц (SPH) проанализирована зависимость векторной скорости смещения грунта от скорости детонации. Исследования проведены для различных типов массивов – монолитных и трещиноватых. Установлено, что зависимость скорости смещения грунта от скорости детонации зарядов носит полиномиальный характер. Это свидетельствует о сложной, нелинейной природе данного процесса. Такая закономерность подразумевает возможность существования экстремумов - участков максимального или минимального эффекта, что важно учитывать при прогнозировании и оптимизации параметров взрывных работ.

Ключевые слова: буровзрывные работы (БВР); сейсмическое воздействие; скорость детонации; метод сглаженных частиц (SPH); монолитный массив; трещиноватый массив; полигонные испытания; векторная скорость смещения грунта; численное моделирование; оптимизация параметров взрывных работ.

Введение

Рост масштабов открытых горных работ вблизи жилой застройки и объектов производственного назначения, а также необходимость соблюдения требований по сейсмической и экологической безопасности обуславливают актуальность комплексных исследований воздействия взрывов. В работах [1–4] приведены результаты исследований влияния свойств пород и технологических факторов на сейсмическое действие промышленных взрывов, физические процессы формирования и распространения сейсмических волн и особенности их воздействия на механические системы, результаты исследований на горных предприятиях при открытой разработке месторождений полезных ископаемых. Проведен анализ влияния на сейсмический эффект массовых взрывов (результатирующую векторную скорость смещения грунта) следующих факторов: массы взрывааемого ВВ, масштабов массовых взрывов; количества групп скважин при различном удельном расходе ПВВ, глубины заложения зарядов, точности средств инициирования. М.И. Садовским, В.Ф. Писаренко [5] рассмотрены особенности режима сейсмического процесса в блоковой геофизической среде земной коры, которая рассматривается как сложная, неоднородная иерархическая система отдельных частей. Тенденция роста масштабов взрывных работ приводит к увеличению числа взрывааемых блоков, ступеней замедления и числа групп зарядов (ЧГЗ) общей продолжительности взрыва, что обуславливает повышение вероятности прироста результирующей векторной скорости смещения грунта у охраняемых объектов. В работах [6, 7] представлены результаты исследований в условиях полигона характера влияния скорости детонации на показатели сейсмического действия взрыва и содержание вредных газов в продуктах детонации, результаты систематизации способов управления сейсмическим действием взрыва как основы научного подхода к управлению действием взрыва, полученные SPH-методом зависимости векторной скорости смещения грунта от расстояния до заряда в различных зонах действия взрыва в монолитном и тре-

щитоватом массивах, влияние дифракции прямых и отраженных волн, а также методические аспекты расчета энергии, расходуемой на сейсмическое действие взрыва и ударную воздушную волну. Однако в настоящее время методы численного моделирования для оценки сейсмического воздействия БВР остаются недостаточно разработанными.

Методика проведения исследований

Особое значение приобретают методы, позволяющие оценивать влияние свойств взрывчатых веществ и параметров зарядов на характеристики сейсмического поля и уровень взрывного шума. В то же время существующие численные подходы не всегда обеспечивают достаточную точность и универсальность при моделировании сейсмических процессов, связанных с БВР. Полигонные экспериментальные исследования проводились с использованием зарядов идентичной массы и при постоянной влажности грунта, что обеспечивало воспроизводимость условий испытаний. Взрывчатые вещества размещались в специальных детонационных системах различных типов, заключённых в металлические или бетонные оболочки, что позволяло точно фиксировать скорость детонации. Для регистрации параметров взрывов применялось современное измерительное оборудование, предназначенное для записи сейсмических колебаний и воздушных ударных волн. Датчики сейсмического воздействия и микрофоны устанавливались на заранее заданных, строго фиксированных расстояниях от эпицентра каждого взрыва. В процессе испытаний производилась регистрация амплитудных и частотных характеристик сейсмических волн, а также измерение скорости смещения грунта по трем ортогональным направлениям. На основе полученных данных рассчитывались средние и максимальные значения скорости смещения, а также результирующая векторная скорость. Дополнительно оценивались параметры взрывного шума, включая его интенсивность и спектральный состав, что позволило комплексно охарактеризовать сейсмическое и акустическое воздействие каждого взрыва.

Численное моделирование проводилось с использованием метода сглаженных частиц SPH [8], который обеспечивает высокую точность при описании динамики деформируемых тел и процессов разрушения горных пород. В рамках данного подхода были построены цифровые модели как монолитных, так и трещиноватых горных массивов, с учётом реальной геометрии зарядных полостей, свободных поверхностей и подпорных стенок, сформированных из ранее разрушенного материала.

Каждая частица в SPH-модели представляет собой элементарный объём среды с заданными физико-механическими характеристиками. Это позволяет достоверно моделировать процессы фрагментации, передачи напряжений и распространения ударных волн в неоднородной горной среде. В модели подробно воспроизводится конструкция зарядов, их пространственное размещение в уступе, а также геометрические параметры буровых скважин. Для каждого случая подбирался соответствующий тип взрывчатого вещества на основе технологической базы данных для учета влияния взрывчатых характеристик средств разрушения горных пород.

Особое внимание уделялось моделированию трещиноватых зон с различной ориентацией и толщиной трещин, что критически влияет на перераспределение энергии и направление фронта разрушения. Расчёты проводились в контрольных точках, расположенных на различном удалении от зарядов для определения закономерностей пространственного распределения максимальных и средних значений результирующей векторной скорости смещения грунта, а также напряжённого состояния массива.

Все модели проходили калибровку на основе данных, полученных в ходе полигонных испытаний или опытных взрывов в промышленных условиях. Результаты моделирования использовались для оценки изменения среднего расстояния между трещинами, объема образовавшихся мелких фракций, а также амплитуд и продолжительности сейсмического воздействия в различных зонах разрушаемого взрывом массива.

Объект исследования

Процессы распространения сейсмического воздействия при взрывных работах в горных массивах различной структуры (монолитных и трещиноватых), сопровождающиеся смещением грунта и образованием напряжённого состояния массива горных пород, и защищаемых объектах производственного и непроизводственного назначения.

Предмет исследования

Фундаментальные закономерности и параметры, характеризующие сейсмическое действие взрыва в монолитном и трещиноватом массиве горных пород и в условиях полигона. Пространственно-временные зависимости результирующей векторной скорости смещения грунта и их изменение в зависимости от скорости детонации взрывчатого вещества; закономерности распределения средних и пиковых значений сейсмических параметров в характерных зонах действия взрыва.

Результаты исследования

В ходе проведённых полигонных и численных исследований в частности получены зависимости средних значений результирующей векторной скорости смещения грунта (РВС) от расстояния до свободной поверхности (рис. 1) и от скорости детонации зарядов во взрываемом блоке (рис. 2).

На рис. 1 линия, обозначенная квадратами, показывает значения РВС при расстоянии от скважинного заряда до свободной поверхности 2 м; линия, обозначенная ромбами, – значения РВС до свободной поверхности при расстоянии 4 м; линия, обозначенная треугольниками, – значения РВС при расстоянии от скважинного заряда до свободной поверхности 6 м.

Установлен полиномиальный характер зависимости численных значений РВС от расстояния до заряда. Получены следующие убывающие полиномиальные зависимости третьего порядка при расстоянии от крайнего к бровке уступа скважинного заряда соответственно 6 и 4 м:

$$Y_1 = -1,2389x^3 + 16,48x^2 - 72,123x + 125,15; R = 0,9069, \quad (1)$$

$$Y_2 = -1,6389x^3 + 17,658x^2 - 64,144x + 104,92; R = 0,9594. \quad (2)$$

Получены зависимости влияния расстояния между скважиной и бровкой уступа на результирующую среднюю векторную скорость и наличие зоны максимального прироста и снижения сейсмического воздействия на массив горных пород. В рассмотренном случае минимальные значения РВС соответствуют расстоянию от крайней скважины до поверхности уступа, равному 4 м. Максимальный прирост вычисленных значений векторной скорости смещения (РВС) наблюдается в анализируемых расчетных сценариях при расстоянии от заряда до бровки уступа, равном 2 м. Этот эффект обусловлен, в частности, дифракцией прямых и отражённых волн.

На рис. 2 представлены обобщённые результаты расчётов, полученных для различных зон массива: ближней (4–7 радиусов заряда), средней (7–12 радиусов заряда) и дальней (50–70 радиусов заряда). Анализ полученных данных показал, что характер зависимостей – полиномиальный, что свидетельствует о сложной и многокомпонентной природе рассматриваемого процесса.

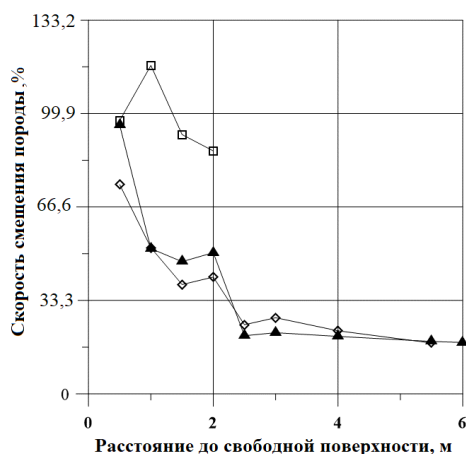


Рис. 1. Зависимость результирующей векторной скорости смещения грунта в относительных единицах от расстояния между скважинным зарядом и свободной поверхностью склона уступа

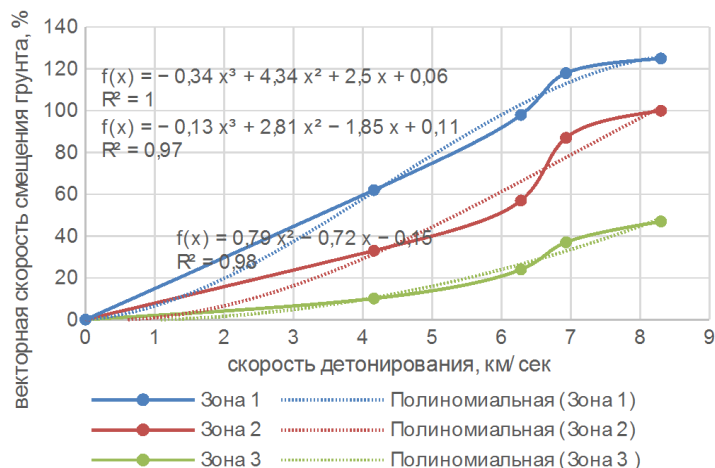


Рис. 2. Зависимости в относительных единицах векторной скорости смещения грунта от скорости детонации ВВ

На рис. 2 линия 1 показывает полиномиальную зависимость векторной скорости в относительных единицах в ближней зоне действия взрыва в пределах 4–7 радиусов заряда; линия 2 – полиномиальная зависимость в пределах 7–12 радиусов заряда; линия 3 – зависимость на расстоянии от 50–70 радиусов заряда.

Во всех рассмотренных случаях выявлена нелинейность зависимости результирующей векторной скорости смещения от скорости детонации взрывчатого вещества, расстояний от заряда до свободной поверхности. Установлено, что при увеличении скорости детонации наблюдается неравномерный рост или снижение результирующей векторной скорости смещения, причём в отдельных диапазонах возможны экстремальные значения – максимумы или минимумы, указывающие на точки повышенной чувствительности массива к параметрам взрыва. Такие участки требуют особого внимания при проектировании взрывных работ, так как могут приводить как к усиленному воздействию на окружающую среду, так и к неэффективному расходованию энергии заряда. Анализ также показал, что степень нелинейности зависимости усиливается в трещиноватых массивах, где наблюдаются процессы отражения и дифракции волн. При этом рассеяние энергии на структурных неоднородностях играет доминирующую роль. В монолитных массивах картина более стабильна, однако и в этом случае сохраняется полиномиальный характер связи между параметрами. Результаты моделирования подтверждены данными полигонных экспериментов и продемонстрировали хорошее совпадение по основным критериям: значениям амплитуд векторной скорости и характеру ослабления сейсмического сигнала с увеличением расстояния от центра взрыва. Выявленные закономерности позволяют сделать вывод о том, что изменение скорости детонации оказывает не просто линейное, а качественно сложное воздействие на структуру сейсмического поля. Это обусловлено одновременно действующими факторами: геометрией заряда, типом массива, расстоянием до свободной поверхности, а также физико-механическими свойствами породы. Проводятся исследования изменения во времени и пространстве волн напряжения и скорости смещения грунта сейсмического действия взрыва при наличии подпорной стенки. На рис. 3 представлена структура поля сейсмичности, а также численные значения результирующей векторной скорости смещения грунта.

Анализ результатов численных экспериментов показывает значительное изменение локализации областей с максимальными значениями результирующей скорости смещения (РСВ) в районе подпорной стенки, сформированной из ранее взорванной горной массы.

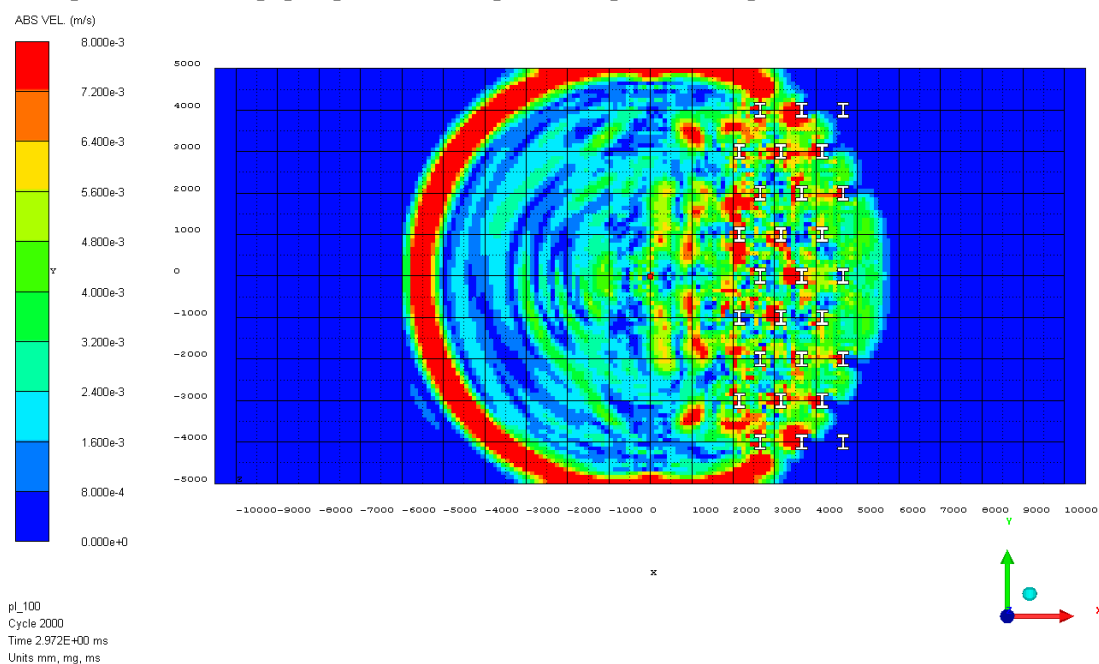


Рис. 3. Структура поля значений результирующей векторной скорости грунта в различные моменты времени при прохождении волной сжатия зоны горных пород, разрыхленной предыдущим взрывом

В левой части поля сейсмичности, где горные породы сохраняют монолитную структуру, волны смещения грунта и возникающие напряжения распространяются без разрывов по фронту. Они характеризуются максимальными амплитудами и наибольшим периодом колебаний.

В правой части поля, находящейся в зоне массива, разрушенного предыдущим взрывом, картина распространения сейсмических и напряжённых волн принципиально иная. Здесь наблюдается очаговый характер распространения: импульсы с высокой результирующей скоростью имеют значительно меньший период колебаний, а средние показатели РСВ в разрушенном массиве и за его пределами снижаются в 2 и более раза по сравнению с монолитной частью массива.

Таким образом, полученные результаты позволяют не только углубить понимание механизмов формирования сейсмического воздействия, но и использовать выявленные зависимости при инженерном обосновании параметров взрывных работ. Это особенно важно при их проведении вблизи объектов инфраструктуры или охраняемых территорий, где требуется строгий контроль над уровнем сейсмического воздействия.

Выводы

В результате выполненного исследования установлено, что зависимость векторной скорости смещения грунта от скорости детонации зарядов носит полиномиальный характер. Такая форма зависимости свидетельствует о нелинейной и многопараметрической природе распространения взрывной энергии в горных массивах. Полученные данные подтверждают, что интенсивность сейсмического воздействия определяется не только физико-химическими свойствами применяемого взрывчатого вещества, но и комплексом влияния геомеханических факторов: структурой массива (монолитность, трещиноватость), ориентацией и плотностью трещин, расстоянием от заряда до свободных поверхностей и конструктивными особенностями заряда.

Особенно важно, что характер выявленных зависимостей указывает на наличие экстремумов – диапазонов скорости детонации, при которых сейсмическое воздействие достигает локальных максимумов или минимумов. Это открывает возможности для целенаправленного управления энергетикой взрыва с целью минимизации негативного влияния на окружающую среду, конструкции и инфраструктуру, расположенные в зоне действия.

Применение численного моделирования методом сглаженных частиц, откалиброванного по результатам полигонных экспериментов, позволило получить высоко информативные данные о распространении упругих и пластических деформаций, формировании зон разрушения и изменении напряжённого состояния массива при различных сценариях взрывов. Совокупность экспериментальных и расчётных результатов подтверждает высокую эффективность данного подхода для инженерного прогнозирования и оптимизации параметров буровзрывных работ.

Установленные закономерности могут быть использованы в практической деятельности для:

- проектирования режимов взрывов с учётом допустимых уровней сейсмического воздействия;
- подбора взрывчатых веществ с оптимальной скоростью детонации;
- повышения безопасности проведения взрывных работ вблизи жилой застройки, охраняемых объектов и инженерных коммуникаций.

Благодарности

Работа выполнена в ИПКОН РАН в рамках научно-исследовательских программ по темам FMMS-2024-0007; FMMS-2024-0008.

Литература

1. Мосинец, В.Н. Дробящее и сейсмическое действие взрыва в горных породах / В.Н. Мосинец. – М: Недра. 1976. – 271 с.
2. Сейсмическое действие взрыва в горных породах / А.А. Кузьменко, В.Д. Воробьев, И.И. Денисюк, А.А. Дауэтас. – М.: Недра, 1990. – 171 с.
3. Зависимость сейсмического действия взрыва в массиве горных пород от технологических условий ведения буровзрывных работ / Г.В. Гриб, А.Ю. Позынич, Н.Н. Гриб, Е.Е. Петров // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2012. – Том 14. – № 1-8. – С. 2112–2117.

4. Сейсмическая безопасность при взрывных работах: уч. пособие / В.К. Совмен, Б.Н. Кутузов, А.Л. Марьясов *et al.* – М.: Изд. Горная книга, 2012. – 227 с.
5. Садовский, М.А. Сейсмический процесс в блоковой среде / М.А. Садовский, В.Ф. Писаренко. – М.: Наука, 1991. – 96 с.
6. Ефремовцев, Н.Н. Сейсмические и экологические факторы оптимизации управления кинетикой выделения энергии детонационными системами для обеспечения безопасного ведения взрывных работ / Н.Н. Ефремовцев, П.Н. Ефремовцев // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2012. – № S4-14. – С. 11–16.
7. Федотенко, В.С. Методические вопросы комплексной оценки дробящего и техногенного действия взрывных работ при открытой разработке месторождений / В.С. Федотенко, Н.Н. Ефремовцев, А.В. Харченко // Горная промышленность. – 2024. – № 6. – С. 60–67.
8. Шиповский, И.Е. Расчет хрупкого разрушения горной породы с использованием бессеточного метода / И.Е. Шиповский // Научный вестник Национального Горного университета. – 2013. – Вып. 1(145). – С. 76–82.

Поступила в редакцию 22 сентября 2025 г.

Сведения об авторах

Ефремовцев Никита Николаевич – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, член научного совета РАН по проблеме «Народнохозяйственное использование взрыва», Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В. Мельникова Российской академии наук, г. Москва, Российская Федерация, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0001-5797-1631>, e-mail: npee7@mail.ru.

Шиповский Иван Евгеньевич – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В. Мельникова Российской академии наук, г. Москва, Российская Федерация, e-mail: iv_ev@mail.ru.

*Bulletin of the South Ural State University
Series "Mathematics. Mechanics. Physics"
2025, vol. 17, no. 4, pp. 65–71*

DOI: 10.14529/mmph250408

RESEARCHING THE INFLUENCE OF TECHNOLOGICAL FACTORS ON THE SEISMIC IMPACT OF BLASTS IN SURFACE MINING OF MINERAL DEPOSITS

N.N. Efremovtsev, I.E. Shipovskii

Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

Abstract. The paper discusses the main principles of the methodology for studying the seismic impact of explosions at test sites, as well as the application of the smoothed particle hydrodynamics (sph) method for investigating the seismic impact of explosions in both monolithic and fractured rock masses.

It presents the results of the numerical studies aimed at assessing the influence of blasting parameters on seismic impact. Based on field tests and numerical simulations using the sph method, we analyzed the dependence of the ground displacement vector velocity on the detonation velocity for various types of rock masses, including monolithic and fractured ones. This dependence exhibits a polynomial character, indicating a complex and nonlinear nature of the process. This pattern suggests the possible existence of extremes – zones of maximum or minimum impact – which is important to take into account when forecasting and optimizing blasting parameters.

Keywords: *blasting operations; seismic impact; detonation velocity; Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) method; monolithic rock mass; fractured rock mass; field tests; vector velocity of ground displacement; numerical modeling; optimization of blasting parameters.*

References

1. Mosinets V.N. Drobyashchee i seysmicheskoe deystvie vzryva v gornyykh porodakh (Crushing and Seismic Effects of Explosion in Rocks). Moscow, Nedra Publ., 1976, 271 p. (in Russ.).
2. Kuz'menko A.A., Vorob'ev V.D., Denisuk I.I., Dauetas A.A. *Seysmicheskoe deystvie vzryva v gornyykh porodakh* (Seismic Effect of Explosion in Rocks). Moscow, Nedra Publ., 1990, 171 p. (in Russ.).
3. Grib G., Grib N., Pazynich A., Petrov E. Dependence of the Seismic Explosive Action in the Rock Massives on the Technological Conditions of Drilling and Blasting Operations. *Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, 2012, Vol. 14. no. 1-8, pp. 2112–2117. (in Russ.).
4. Sovmen V.K., Kutuzov B.N., Maryasov A.L., Ekvist B.V., Tokarenko A.V. *Seysmicheskaya bezopasnost' pri vzryvnykh rabotakh: uch. posobie* (Seismic Safety during Blasting Operations: A textbook). Moscow. Gornaya Kniga Publ., 2012, 227 p. (in Russ.).
5. Sadovskiy M.A., Pisarenko V.F. *Seysmicheskii protsess v blokovoy srede* (Seismic Process in a Block Environment). Moscow, Nauka Publ., 1991. 96 p. (in Russ.).
6. Efremovtsev N.N., Efremovtsev P.N. Seismic and Ecological Factors of Optimization Management the Kinetics an Energy Detonation Systems to Ensure Safe Conducting Explosive Works. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten' (nauchno-tekhnicheskiy zhurnal)*, 2012, no S4-14, pp. 11–16. (in Russ.).
7. Fedotenko V.S., Efremovtsev N.N., Kharchenko A.V. Methodological Issues of a Comprehensive Assessment of the Crushing and Man-Made Effects of Blasting Operations during Open-Pit Mining. *Russian Mining Industry*, 2024, no. 6, pp. 60–67. DOI: 10.30686/1609-9192-2024-6-60-67.
8. Shipovskii I.E. Calculation of Brittle Fracture of Rock using Meshless Method (Raschet khrupkogo razrusheniya gornoy porody s ispol'zovaniem bessetochnogo metoda). *Nauchnyy vestnik Natsional'nogo Gornogo universiteta (Scientific Bulletin of the National Mining University)*, 2013, Iss. 1(145), pp. 76–82. (in Russ.).

Received September 22, 2025

Information about the authors

Efremovtsev Nikita Nikolaevich is Cand. Sc. (Engineering), Senior Staff Scientist, Member of the Scientific Council of the Russian Academy of Sciences on the Problem of “National economic use of explosion”, Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0001-5797-1631>, e-mail: noee7@mail.ru.

Shipovskii Ivan Evgen'evich is Cand. Sc. (Engineering), Senior Staff Scientist, Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation, e-mail: iv_ev@mail.ru.