

УДК 622.235.6:550.83

Григорьев Данила Вячеславович

научный сотрудник,
лаборатория технологии снижения
риска катастроф при недропользовании,
Институт горного дела УрО РАН,
620075, г. Екатеринбург,
ул. Мамина-Сибиряка, 58
e-mail: danilging@gmail.com

Ведерников Андрей Сергеевич

научный сотрудник,
лаборатория технологии снижения
риска катастроф при недропользовании,
Институт горного дела УрО РАН
e-mail: avedernikov@igduran.ru

ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ПРИМЕНЕНИЮ СЕЙСМОРАЗВЕДКИ ДЛЯ РАЗРАБОТКИ МЕТОДИКИ ОПТИМИЗАЦИИ ПАРАМЕТРОВ БУРОВЗРЫВНЫХ РАБОТ*

Аннотация:

В статье рассматриваются исследования по применению сейсморазведки для разработки методики оптимизации параметров буровзрывных работ. Приведены теоретические основы для перехода от скоростей упругих волн к физико-механическим характеристикам горных пород, слагающих блоки, запланированные для рудоподготовки. Приведены результаты практического опытного применения методики в карьере Качканарского месторождения, показан переход от разрезов скоростей продольной и поперечной волн к коэффициенту Пуассона, а затем и к прочности на одноосное сжатие. Сделаны выводы о перспективах применения на производстве.

Ключевые слова: сейсморазведка, скорость упругих волн, коэффициент Пуассона, прочность пород, буровзрывные работы.

DOI: 10.25635/2313-1586.2025.04.084

Grigoriev Danila V.

Researcher,
Laboratory of technology reducing
the risk of disasters in subsurface use,
Institute of Mining, Ural Branch of RAS,
58 Mamina-Sibiryaka Str.,
620075 Ekaterinburg
e-mail: danilging@gmail.com

Vedernikov Andrey S.

Researcher,
Laboratory of technology reducing
the risk of disasters in subsurface use,
Institute of Mining, Ural Branch of RAS
e-mail: avedernikov@igduran.ru

APPLICATION STUDIES ON SEISMIC SURVEYS FOR DEVELOPMENT OF METHODS TO OPTIMIZE THE PARAMETERS OF DRILLING AND BLASTING OPERATIONS

Abstract:

The article deals with research on the use of seismic exploration to develop methods for optimizing drilling and blasting parameters. It provides the theoretical basis for the transition from elastic wave velocities to the physical and mechanical characteristics of the rocks in the blocks planned for ore preparation. The results of practical experimental application of the methodology in the pit of the Kachkanar deposit are presented, showing the transition from primary and shear wave velocity sections to Poisson's ratio, and then to uniaxial compressive strength. Conclusions are made about the prospects for industrial application.

Key words: seismic survey, elastic wave velocity, Poisson's ratio, rock strength, drilling and blasting operations.

Введение

Взрывные работы играют ключевую роль в эффективном извлечении ценных ресурсов из недр земли: угля, металлических руд, строительного щебня и других материалов. С помощью взрывных работ можно быстро и эффективно разрушать горные породы и тем самым создавать условия для последующего извлечения полезных ископаемых.

В настоящее время основным видом добычи полезных ископаемых в мире является открытый способ, с помощью которого в России добывается около 90 % железных руд, 60 % руд цветных металлов и угля [1].

Количество взрывов для рудоподготовки на открыто разрабатываемых горных предприятиях Урала может измеряться сотнями и тысячами в год. И их количество только растет, как растут и требования к качеству проводимых работ. Зачастую бурение

* Работа выполнена в рамках Гос. задания No075-00410-25-00. Г.р. No 1022040300093-0-1.5.1. Тема 3 (2025-2027). Выявление закономерностей развития геодинамических процессов в условиях техногенного преобразования недр и разработка мер по повышению безопасности горного производства (FUWE-2025-0003).

ведется по осредненным параметрам для всего карьера или его большого участка, вследствие чего результат взрывания бывает неоптимальным как количественно, так и качественно: негабаритные куски руды, несоответствие запланированным объемам и прочее [2].

Основная идея данных исследований – определение параметров буровзрывных работ (БВР) на основе уточненной информации о прочностных свойствах массива горных пород, получаемой по данным геофизических сейсморазведочных работ.

Информация о распределении структурных неоднородностей в границах выемочного блока, подготовленного для взрывания, может быть использована для проектирования БВР: для расчета оптимальных параметров бурения скважин, выбора типа и количества ВВ для достижения необходимого результата и пр. [3, 4].

В дополнении к информации о строении блока в разрабатываемой методике предлагается использовать и физико-механические (прочностные) параметры, что позволит более полно и точно спланировать БВР, что приведет к улучшению качества отработки исследуемого участка.

Материалы и методы

Физической основой для использования сейсмических методов с целью оценки прочностных свойств горных пород является наличие их достаточно тесной связи с сейсмическими характеристиками.

Исходными данными для расчета являются полученные в результате сейсморазведочных работ разрезы скоростей продольных и поперечных волн, плотность горных пород, априорная геологическая информация.

Сейсморазведка в целом основана на изучении распространения в среде упругих волн, возбуждаемых чаще всего искусственным путем. Упругие волны распространяются во всех направлениях от места их возбуждения и проникают на большую глубину в толщу земной коры.

Под упругими характеристиками среды понимают показатели, определяемые линейным законом связи между напряжениями и деформациями (законом Гука) и характеризующие особенности ее упругого (обратимого) деформирования. Упругие свойства однородной изотропной среды полностью определяются значениями модуля Юнга и коэффициента Пуассона. Для характеристики упругих свойств среды используют также модуль сдвига и модуль всестороннего сжатия [5, 6].

Представление об однородной изотропной идеально упругой среде с тем или иным приближением можно распространить на горные породы, в соответствии с чем перечисленные модули широко применяются для описания упругих свойств пород [7].

На представлениях линейной теории упругости базируется и теория распространения сейсмических волн.

Скорость продольных волн определяется по формуле:

$$V_p = \sqrt{\frac{K + \frac{3}{4}G}{\rho}} = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{1 - \mu}{(1 + \mu)(1 - 2\mu)}};$$

скорость поперечных волн определяется по формуле:

$$V_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}} = \sqrt{\frac{E}{\rho} \cdot \frac{1}{2(1 + \mu)}},$$

где K – модуль всестороннего сжатия, ГПа,

G – модуль сдвига, МПа;

E – модуль Юнга, ГПа;

μ – коэффициент Пуассона;

ρ – плотность, г/см³.

Расчет коэффициента Пуассона выполняется по формуле

$$\mu = \frac{Vp^2 - 2Vs^2}{2(Vp^2 - Vs^2)},$$

расчет модуля сдвига:

$$G = \rho \cdot Vs^2,$$

расчет модуля Юнга:

$$E = \rho \cdot Vs^2 \frac{3Vp^2 - 4Vs^2}{Vp^2 - Vs^2},$$

расчет модуля всестороннего сжатия:

$$K = \rho \cdot (Vp^2 - \frac{4}{3}Vs^2).$$

Связь предела прочности на одноосное сжатие и скоростей распространения продольных и поперечных волн выражается в виде формулы

$$\sigma_{сж} = \frac{Vp^2 \cdot \rho(1 - 2\mu)}{2C(1 - \mu)},$$

где коэффициент C зависит от состава пород [8].

Опытные работы выполнялись на Качканарском железорудном месторождении, расположенном на восточном склоне Среднего Урала, в пределах одноименного интрузивного массива и включающем два месторождения – Гусевогорское и собственно Качканарское. Месторождение находится по восточному склону горы Качканар, в западном крыле Тагильского мегасинклинория.

Качканарский интрузивный массив сложен в основном перидотитами, пироксенитами и в меньшей степени габбро. Общая площадь массива – около 110 км². Руды вкрапленные, комплексные. Главные рудные минералы: титаномагнетит, ильменит, второстепенные – минералы платиновой группы, хрома и др.

Содержание железа в рудах 16 – 17 %. Кроме железа, руды содержат ванадий (около 80 % в титаномагнетите), извлекаемый попутно. Месторождение разрабатывается открытым способом. Руда добывается из пяти карьеров.

С учетом объемов выполняемых работ по рудоподготовке, в первую очередь БВР, всегда актуален вопрос оптимизации этих процессов.

Экспериментальные исследования по проверке методики оптимизации параметров БВР на основе результатов сейсморазведки в условиях Качканарского месторождения выполнялись в карьере Северный Качканарского ГОКа, северо-восточный борт, нижние горизонты.

Основная задача состояла в проверке работоспособности методики сбора полевого материала сейсморазведки в условиях карьера.

При выполнении экспериментальных сейсморазведочных исследований применялась разработанная и изготовленная авторами буксируемая сейсморазведочная коса. В таком исполнении стандартные сейсмоприемники и сейсмокосы крепятся на гибкую стропу (рис. 1). Сами сейсмоприемники в таком варианте не втыкаются на каждой расстановке в почву, а прикреплены к «салазкам», которые за счет своего значительного веса обеспечивают надежную передачу упругих колебаний [9].

Затем, при переходе на следующую расстановку, такая коса просто протягивается по прямой вдоль профиля на необходимое количество каналов (рис. 2, 3). Для улучшения соотношения сигнал/помеха, особенно в условиях действующего карьера, использовалось накопление сигнала (многократные записи на каждой расстановке).

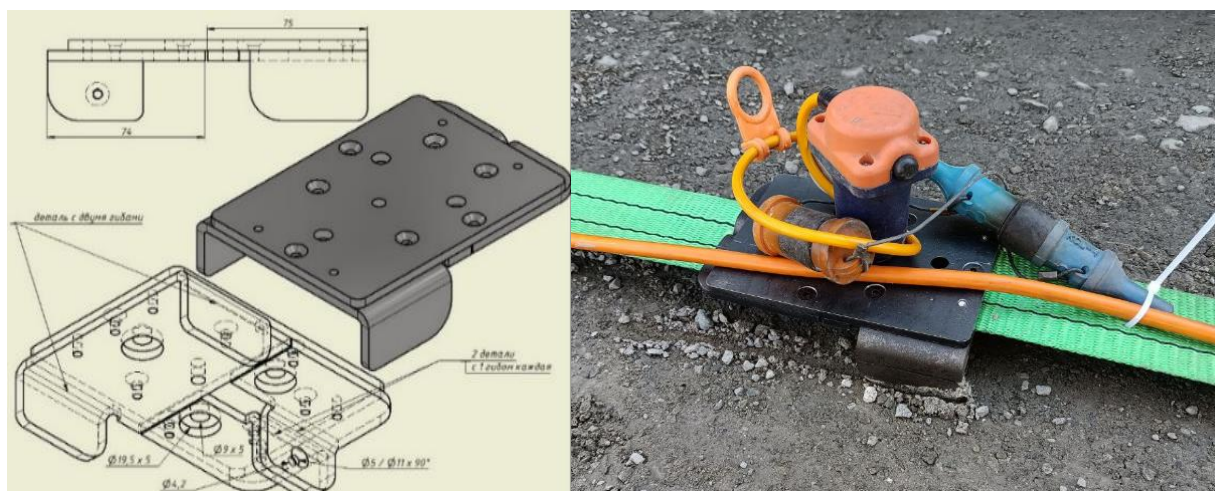


Рис. 1. Салазки и буксируемая сейсморазведочная коса в сборе

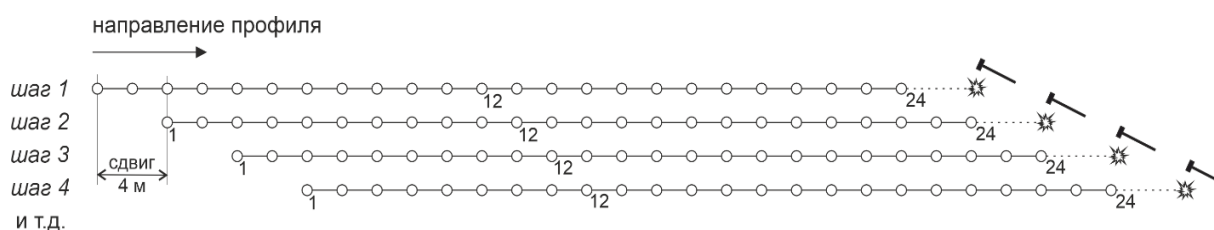


Рис. 2. Схема работы с буксируемой сейсморазведочной косой



Рис. 3. Расстановка буксируемой косы

Использование буксируемой сейсмической косы позволяет

- повысить производительность полевых работ;
- увеличить детальность за счет рассмотрения цельного длинного профиля;
- производить исследования методом отраженных волн МОВ-ОСТ малоканальной сеймостанцией (24 канала);
- обрабатывать полевой материал по методам: а) МПВ на продольных волнах с получением скоростного разреза продольных волн V_p ; б) MASW-CMPCC с получением

скоростного разреза поперечных волн V_s ; в) МОВ-ОСТ с получением временного разреза отраженных продольных волн;

– как следствие, упрощает расчет на глубину распределения отношения V_s/V_p , коэффициента Пуассона, модуля сдвига, модуля упругости [10].

Результаты исследований

В ходе экспериментальных исследований пройден профиль сейсморазведки длиной 156 м, с числом точек удара 40, шаг между сейсмоприемниками 2 м, шаг смещения расстановки сейсмоприемников и точек удара составил 4 м. Число активных каналов сейсмостанции – 24, длина расстановки составила 46 м, буксировка косы осуществлялась вручную либо автомобилем. Время, затраченное непосредственно на получение полевого материала, составило 2 ч. В результате полевое исследование взрываемого блока с помощью сейсморазведки составит до 1 рабочего дня.

Качество полевого материала получилось хорошее, отчетливо выделяются интересующие нас типы волн для использования скоростного анализа, помехи от карьерной техники оказались на приемлемом уровне.

Последующая обработка служила для оценки качества, выявления особенностей в полевом материале, оценке шумов, выводов о перспективности данного подхода.

Были построены скоростные разрезы по продольным (рис. 4) и поперечным (рис. 5) волнам. На разрезе продольных волн отчетливо выделяются две зоны снижения их скоростей. Предположительно они связаны с особенностями распространения систем трещин на данном участке, возникших при отработке предыдущего блока.

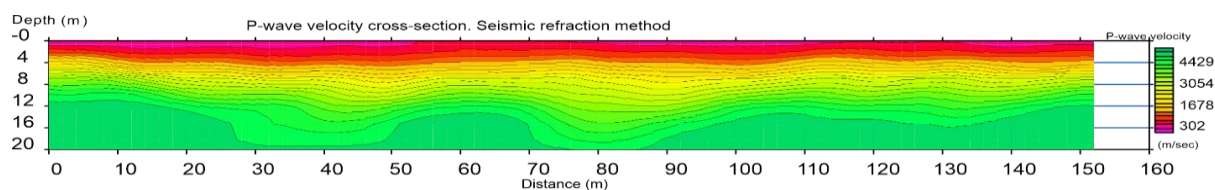


Рис. 4. Скоростной разрез продольных волн V_p в пределах исследуемого участка

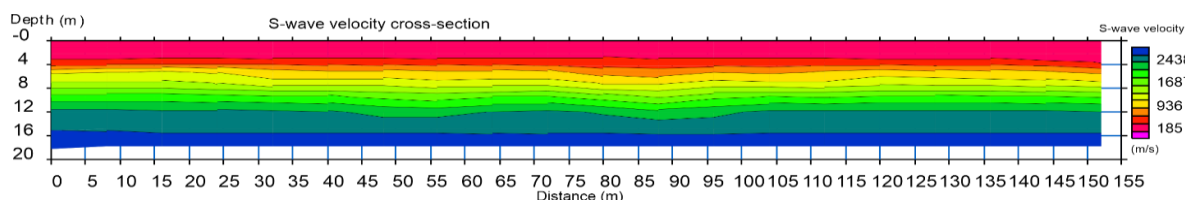


Рис. 5. Скоростной разрез поперечных волн V_s в пределах исследуемого участка

Из разрезов продольных и поперечных скоростей был построен разрез распределения коэффициента Пуассона (рис. 6), на нем выделяются два участка аномально низких значений, совпадающих с участками снижения скоростей продольных волн. На следующем этапе исследований запланировано определение физико-механических свойств пород, слагающих массив, с целью однозначной интерпретации данных аномалий.

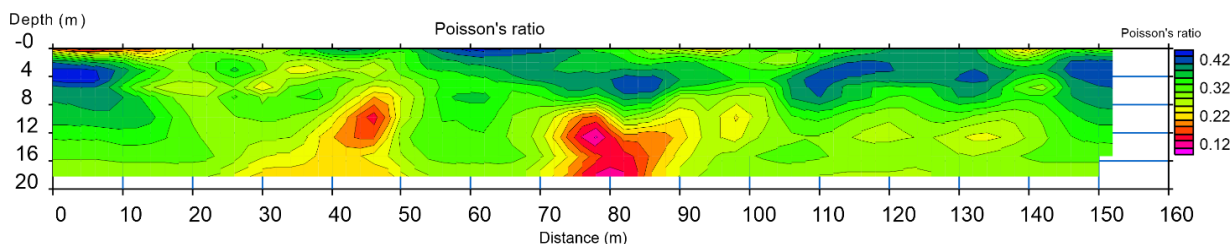


Рис. 6. Распределение значений коэффициента Пуассона в пределах исследуемого участка

В данном исследовании был пройден один профиль. При выполнении исследований двумя и более параллельными профилями появляется возможность оценить направления распространения систем трещин, а также построения псевдо-3D-разрезов.

На основании скоростных разрезов и коэффициента Пуассона по формуле (1) вычислен и построен разрез предела прочности на одноосное сжатие. Плотность пород принята постоянной $3,5 \text{ г/см}^3$. Степень нарушенности массива четко отслеживается в значениях предела прочности на одноосное сжатие (МПа). Данный разрез демонстрирует возможности перехода от результатов сейсморазведки в прочностные характеристики массива (рис. 7).

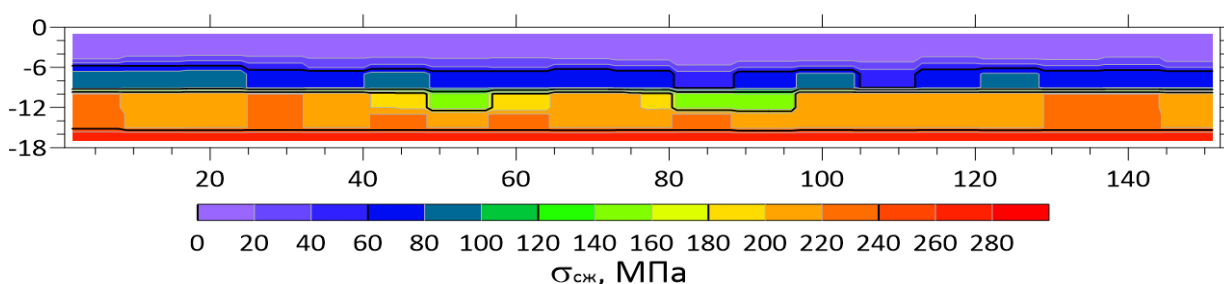


Рис. 7. Разрез предела прочности на одноосное сжатие (МПа) в пределах исследуемого участка горного массива

Исходя из результатов аналитических и экспериментальных исследований, разработана методика выполнения сейсморазведочных исследований для оптимизации параметров БВР, состоящая из следующих этапов:

1. Полевые работы с применением буксируемой сейсмической косы (оптимизированный способ по сравнению с конвенциональным).
2. Обработка полевого материала сейсморазведки по методике МПВ с получением разрезов скоростей продольных волн V_p .
3. Обработка полевого материала сейсморазведки по методике MASW-CMPCC с получением разрезов скоростей поперечных волн V_s .
4. Расчет упругих характеристик горных пород в пределах выемочного блока. Расчет прочностных характеристик (предела прочности на сжатие и растяжение).
5. Расчет параметров БВР с учетом результатов сейсморазведки.

Разрезы наглядно демонстрируют пространственную изменчивость прочности массива и упругости пород, что является критически важной информацией для проектирования БВР.

Таким образом, разрабатываемая методика, сочетающая аналитический алгоритм перехода от сейсмических характеристик к прочностным в сочетании с эффективной технологией полевых измерений, является научно обоснованным и практически реализуемым инструментом. Ее внедрение позволяет перейти от усредненного проектирования БВР к дифференцированному и оптимальному выбору параметров бурения и взрывания, учитывающему реальную неоднородность горного массива в границах выемочного блока. Это открывает путь к повышению эффективности взрыва, снижению себестоимости и улучшению контроля над результатами БВР.

Список литературы

1. Трубецкой К.Н., Рыльникова М.В., 2015. Состояние и перспективы развития открытых горных работ в XXI веке. *Горный информационно-аналитический бюллетень*, № 45-1, С. 21-32.
2. Берсенев Г.П., Жариков С.Н., Реготунов А.С., Кутуев В.А., 2022. Результаты исследования технологического развития буровзрывных работ на карьерах Уральского региона. *Проблемы недропользования*, № 3(34), С. 43-54.

3. Казаков Н.Н., Викторов С.Д., Шляпин А.В., Лапиков И.Н., 2020. *Дробление горных пород взрывом в карьерах: монография*. Под научной редакцией академика К.Н. Трубецкого. Москва: РАН, 519 с.
4. Ключко И.И., Манжос Ю.В., Касьяненко Д.Л., 2025. Влияние условий инициирования зарядов ВВ на эффективность дробления горных пород. *Труды РАНИМИ*, № 6(44), С. 41-50.
5. Яновская Т.Б., Ратникова Л.И., Ляховицкий Ф.М. и др., 1981. *Сейсморазведка: Справочник геофизика*. Под ред. И.И. Гурвича, В.П. Номоконова. Москва: Недра, 464 с.
6. Котяшев А.А., Маторин А.С., Меньшиков П.В., 2010. Применение сейсмометрии для совершенствования параметров буровзрывных работ. *Горный информационно-аналитический бюллетень*, № 11, С. 302-306.
7. Савич А.И., 1979. *Исследование упругих и деформационных свойств горных пород сейсмоакустическими методами*. Под ред. А.М. Епинатьевой. Москва: Недра, 214 с.
8. *Применение сейсмоакустических методов в гидрогеологии и инженерной геологии*. ВНИИ гидрогеологии и инж. геологии; Сост. Т. Майкут и др.; Под ред. Н. Н. Гориной. Москва: Недра, 1992, 259 с.
9. Van der Veen M., Spitzer R., Green A.G. and Wild P., 2001. Design and Application of a Towed Land-Streamer System for Cost-Effective 2-D and Pseudo-3-D Shallow Seismic Data Acquisition. *Geophysics*, 66, P. 482-500.
10. Зуев П.И., Григорьев Д.В., Ведерников А.С., 2021. Геофизическое обследование участков асбестового карьера. *Горный информационно-аналитический бюллетень*, № 5-1, С. 131-141.

References

1. Trubetskoi K.N., Ryl'nikova M.V., 2015. Sostoyanie i perspektivy razvitiya otkrytykh gornykh rabot v XXI veke [State and prospects of open-pit mining in the 21st century]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'*, № 45-1, P. 21-32.
2. Bersenev G.P., Zharikov S.N., Regotunov A.S., Kutuev V.A., 2022. Rezul'taty issledovaniya tekhnologicheskogo razvitiya burovzryvnykh rabot na kar'erakh Ural'skogo regiona [Results of a study of the technological development of drilling and blasting operations in the quarries of the Ural region]. *Problemy nedropol'zovaniya*, № 3(34), P. 43-54.
3. Kazakov N.N., Viktorov S.D., Shlyapin A.V., Lapikov I.N., 2020. Droblenie gornykh porod vzryvom v kar'erakh: monografiya [Crushing of rocks by explosion in quarries: a monograph]. Pod nauchnoi redaktsiei akademika K.N. Trubetskogo. Moscow: RAN, 519 p.
4. Klochko I.I., Manzhos Yu.V., Kas'yanenko D.L., 2025. Vliyanie uslovii initsirovaniya zaryadov VV na effektivnost' drobleniya gornykh porod [Influence of explosive charge initiation conditions on the efficiency of rock crushing]. *Trudy RANIMI*, № 6(44), P. 41-50.
5. Yanovskaya T.B., Ratnikova L.I., Lyakhovitskii F.M. i dr., 1981. *Seismorazvedka: Spravochnik geofizika* [Seismic exploration: Handbook of Geophysics]. Pod red. I.I. Gurvicha, V.P. Nomokonova. Moscow: Nedra, 464 p.
6. Kotyashev A.A., Matorin A.S., Men'shikov P.V., 2010. Primenenie seismometrii dlya sovershenstvovaniya parametrov burovzryvnykh rabot [Use of seismometry to improve the parameters of drilling and blasting operations]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'*, № 11, P. 302-306.
7. Savich A.I., 1979. Issledovanie uprugikh i deformatsionnykh svoistv gornykh porod seismoakusticheskimi metodami [Investigation of elastic and deformation properties of rocks by seismoacoustic methods]. Pod red. A.M. Epinat'evoi. Moscow: Nedra, 214 p.
8. Primenenie seismoakusticheskikh metodov v gidrogeologii i inzhenernoi geologii . [Application of seismoacoustic methods in hydrogeology and engineering geology]. VNII gidrogeologii i inzh. geologii; Sost. T. Maikut i dr.; Pod red. N. N. Goryainova. Moscow: Nedra, 1992, 259 p.

9. Van der Veen M., Spitzer R., Green A.G. and Wild P., 2001. Design and Application of a Towed Land-Streamer System for Cost-Effective 2-D and Pseudo-3-D Shallow Seismic Data Acquisition. *Geophysics*, 66, P. 482-500.

10. Zuev P.I., Grigor'ev D.V., Vedernikov A.S., 2021. Geofizicheskoe obsledovanie uchastkov asbestovogo kar'era [Geophysical survey of asbestos quarry sites]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'*, № 5-1, P. 131-141.