

УДК 550.83:622.83

ОЦЕНКА УСТОЙЧИВОСТИ И ОБВОДНЕННОСТИ ПОРОДНОГО МАССИВА ГЕОФИЗИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ

В. В. РОМАНОВ, и. о. зав. кафедрой геофизики, канд. техн. наук,
roman_off@mail.ru

К. С. МАЛЬСКИЙ, и. о. декана геофизического факультета, канд. техн. наук

А. И. ПОСЕРЕНИН, старший преподаватель

А. Д. КАРИНСКИЙ, проф., д-р физ.-мат. наук

Российский государственный геологоразведочный университет
им. Серго Орджоникидзе, Москва, Россия

Введение

При разработке месторождений полезных ископаемых (МПИ) возникает ряд проблем и рисков, недоучет которых приводит к катастрофическим последствиям для горных выработок или значительному удорожанию горных работ. Среди них – горные удары, нарушения естественного гидрогеологического режима, оползни на бортах карьера, нерациональный расход взрывчатого вещества [1].

Горные породы земной коры находятся в напряженно-деформированном состоянии, неравномерном в пространстве и во времени. Изменение напряжения во времени приводит к возникновению сдвиговых и разрывных нарушений, которые становятся причиной колебательных движений в горных породах. Разработка МПИ приводит к перераспределению горного давления и образованию дополнительных напряжений в горных выработках. Процессы деформации и разрушения горных пород в выработках носят локальный характер и развиваются намного быстрее, чем аналогичные естественные процессы. При локальном накоплении и внезапном высвобождении потенциальной энергии возникают *горные удары*, провоцирующие завалы горных выработок [2].

Ведение горных работ сопровождается изменением гидрогеологического режима в породном массиве. Снижение напора подземных вод при дренировании вызывает депрессионное сжатие проницаемых и водоупорных пород, а восстановление гидродинамического режима после ликвидации карьеров и шахт часто приводит к разуплотнению массива.

Переувлажнение пластичных пород вскрыши приводит к образованию оползней, особенно активных в карьерах с большими углами откоса бортов. Недоучет прочности вскрышного уступа может привести к обрушению или деформации бортов карьера. Поверхностные глинистые грунты являются естественным защитным экраном для техногенных загрязнений, однако вскрышные и буровые работы разрушают эти грунты и провоцируют беспрепятственное проникновение вредных ингредиентов в подземные воды.

Существующий метод расчета параметров буровзрывных работ при проведении подземных горных выработок основывается на формулах, в которые входят приближенные коэффициенты, реальные значения которых значительно отличаются от табличных как в большую, так и в меньшую сторону. Существует потребность в уточнении параметров при проходке конкретной горной выработки.

Рассказано об опыте использования комплекса геофизических исследований для контроля состояния и эффективной разработки месторождений. Для оценки устойчивости и обводненности породного массива была выбрана сейсморазведка совместно с георадиолокацией. Выбранный комплекс показал высокую информативность и надежность получаемых данных.

Ключевые слова: геофизические методы, горные выработки, микросейсм, метод Накамуры, инженерная сейсморазведка, сейсмические волны, подтопление горных выработок, георадиолокация.

DOI: 10.17580/gzh.2018.11.11

Геофизические методы в горных выработках применяют для картирования разрабатываемых пластов, поиска геологических нарушений, литолого-стратиграфического разделения породного массива, оценки его геолого-технических свойств. Кроме того, при помощи геофизических методов оценивают реакцию геологической среды на проходку горных выработок, обнаруживают скрытые пустоты и завалы, выясняют оптимальные параметры работы горного оборудования и количество расходуемых материалов [3]. Геофизические методы используют при поиске пропавших шахтеров [4].

Таким образом, задачи, возникающие при добыче или проектировании разработки полезных ископаемых, являются достаточно сложными и актуальными. Интерес к проблеме использования геофизических методов достаточно высок как в России, так и за рубежом. Вместе с тем возможности геофизики в горном деле используют недостаточно полно.

Теория вопроса

Для быстрого исследования состояния горных выработок применяют геофизические исследования скважин, потенциальные методы (грави- и магниторазведка [5]), сейсмо- и электроразведка [6], микросейсмический мониторинг, с использованием активных и пассивных источников [1, 3]. Микросейсмическое зондирование основано на регистрации микросейсм – слабых колебаний, которые непрерывно совершает поверхность горных выработок. Интенсивность поверхностных волн, переносящих микросейсм, увеличивается при прохождении низкоскоростных неоднородностей, связанных с ослабленными зонами в горных породах. Эффект собственного излучения (эмиссии) и переизлучения (усиления) подземными полостями сейсмоакустических колебаний лег в основу нескольких методов, основанных на пассивной регистрации слабых сотрясений поверхности горных выработок [7, 8].

Полный вектор ускорения микросейсмических колебаний имеет три компоненты – вертикальную $V(Z)$ и две горизонтальные $H(X, Y)$. При измерениях трехкомпонентный датчик микросейсм – акселерометр или велосиметр – ориентируется так, чтобы ось чувствительности первого горизонтального датчика (X) совпала

с направлением север – юг, а у второго (У) ориентировалась по азимуту запад – восток.

Сейсморазведка основана на изучении распространения в толще горных пород упругих волн различного типа. Скорости волн зависят от физическо-механических свойств пород, поэтому физико-механические свойства можно найти по корреляционным уравнениям и данным сейсморазведки. Методы сейсморазведки на основе продольных и поверхностных волн имеют высокую эффективность при поиске скрытых малых пустот [9].

В электроразведке используют электрические поля и электромагнитные волны. В поле постоянного тока хорошо выделяются зоны повышенного водонасыщения, залежи металлосодержащих руд и заброшенные горные выработки [6]. Трехмерная электроразведка в томографическом варианте активно применяется при мониторинге прорыва подземных вод и обводнения шахт [10]. Межшахтная и межскважинная электроразведка позволяет обнаруживать хорошо проводящие рудные тела и старые горные выработки [8]. Наиболее высокочастотное электромагнитное поле используют в георадиолокации. Скорость электромагнитной волны обратно пропорциональна относительной диэлектрической проницаемости ϵ , которая у подземных вод в 10–20 раз больше, чем у большинства породообразующих минералов. Поэтому скорость электромагнитных волн в обводненных зонах резко падает, что вызывает увеличение амплитуды волн на георадиолокационных разрезах. При помощи георадиолокации определяют зоны с аномально высокими водно-физическими свойствами и пустоты, заполненные газом. Значительный интерес вызывает поиск полостей в угольных шахтах, где они могут содержать опасные концентрации метана. Высокие частоты используемых в георадиолокации волн (мега- и гигагерцовый диапазон) позволяют выделять неоднородности породного массива сверхмалых размеров [11].

Некоторое применение в горных выработках нашла гравиразведка. Она базируется на измерении ускорения силы тяжести, которое увеличивается над плотными телами и уменьшается над менее плотными [3].

Положительные гравитационные аномалии соответствуют плотным рудными телам хромита, гематита и барита. Отрицательные гравитационные аномалии соотносятся с неплотными галитом, выветрелыми кимберлитами и диатомитовой землей. Гравиразведка позволяет предсказать общую массу изучаемого рудного тела. Гравиразведка не применяется для картирования рудных тел без выраженных вертикальных границ, а невысокая разрешающая способность не позволяет выделять малые пустоты,

кроме случаев, когда последние находятся на небольшом расстоянии от горных выработок [3].

Методика геофизических исследований

Авторами статьи разработан и опробован комплекс из сейсморазведки, микросейсмического зондирования и георадиолокации, дающий ценную информацию о состоянии и механических свойствах горных выработок.

Микросейсмическое зондирование. Для регистрации микросейсмических колебаний авторами использован программно-аппаратный комплекс, включающий: регистратор сейсмических сигналов Дельта-3М, трехкомпонентный сейсмоприемник-акселерометр А0531, программу обработки записей микросейсмических колебаний MicroSeisTools.

Измеряли среднеквадратичную A_{rms} - и пиковую A_{peak} -амплитуды ускорения микросейсм (**рис. 1**), на основе спектров Фурье вычисляли спектр Накамуры H/V . Эта характеристика отражает локальную усиливающую способность породного массива по отношению к сейсмическим колебаниям. В выражении (1) представлена методика расчета спектра отношения Накамуры, в которое входят частоты гармоник спектра Фурье (f), спектральные амплитуды компонент вибросейсмических колебаний – двух горизонтальных $H_x(f)$, $H_y(f)$ и одной вертикальной $V(f)$:

$$\frac{H}{V}(f) = 1,6 \lg \frac{H_x(f) + H_y(f)}{2V(f)}.$$

Инженерная сейсморазведка. Для возбуждения волн в сейсморазведке при работе в горных выработках применяют слабые ударные источники, так как глубина исследования редко превышает 30–40 м. Для приема волн формируют расстановку из нескольких десятков сейсмических приемников. Расстановки размещают на бортах карьеров, в скважинах и между штольнями [12], что позволяет изучать различные участки породного массива с разной детальностью. Скорости упругих волн возрастают при переходе блока горных пород в напряженное состояние и снижаются при развитии трещиноватости и иных деформаций [9]. Это проявляется в виде появления характерной точки излома на годографе (**рис. 2**), который отражает распределение времени вступления первых волн (прямых, преломленных и рефрагированных) на сейсмические приемники. С увеличением скорости волн наклон годографа резко уменьшается. Причиной горных ударов является локальное увеличение напряженности, а его можно диагностировать по анизотропии скорости сейсмических волн при выполнении азимутальной съемки [13].

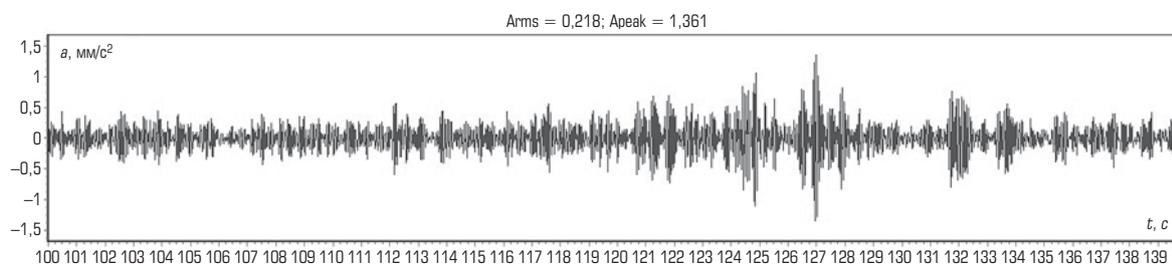


Рис. 1. Акселерограмма микросейсмических колебаний (приведена горизонтальная компонента H_x)

Данные о скоростях в совокупности с плотностью грунтов применяют для определения физико-механических характеристик горных пород, например модуля полной деформации или коэффициента крепости. Результаты сейсморазведки представляются в виде слоистого разреза с нанесенными литологическими обозначениями и скоростями упругих волн [13].

Георадиолокация. При проведении георадиолокации в пространстве породного массива непрерывно перемещается антенный блок, состоящий из излучающего и приемного устройств [14]. Антенна-источник возбуждает импульсное электромагнитное поле с частотами 90–1700 МГц, которое воспринимается приемным устройством. Импульсы вторичных электромагнитных волн после обработки формируют изображение геологической среды на глубинах до 15–20 м. Основным недостатком георадиолокации – малая глубинность, которая во влажных глинах может снижаться до 0,5–1 м.

Для изучения подземных и наземных выработок авторы применяли георадиолокационный комплекс ОКО–3 с антенным блоком 250 МГц. Глубинность исследования в условиях карьера не превышала 5–6 м, при изучении подземных выработок в крепких породах глубина проникновения поля увеличивалась до 10–12 м.

Полученные результаты

Микросейсмическое зондирование ряда горных выработок позволило получить несколько количественных и качественных выводов. Фоновые значения пиковой амплитуды микросейсм в устойчивых блоках породного массива изменялись в интервале 0,1–1 мм/с², в ослабленных – возрастали в 10–20 раз и достигали 2–10 мм/с². Наибольший уровень сейсмических сигналов характерен для верхних уступов карьеров, с уменьшением высоты микросейсмические колебания плавно убывали, что учитывалось при поиске ослабленных зон. На подтопленных участках горных выработок амплитуды микросейсм увеличивались. В целом ослабленные зоны в горных выработках были определены по комплексу микросейсмических признаков – возрастанию амплитуд горизонтальных компонент микросейсм, снижению преобладающей частоты спектра Фурье и увеличению параметра Накамуры H/V .

По данным сейсморазведки, скорость продольных волн V_p в сухих вскрышных породах карьеров составляла 400–500 м/с, на зеркале грунтовых вод она скачкообразно увеличивалась до 1600–1900 м/с, в крепких горных породах возрастала до 2500–6000 м/с. Скорость поперечных волн V_p в сухих вскрышных породах составляла 150–250 м/с, на зеркале грунтовых вод она практически не изменялась, в скальных горных породах возрастала до 1500–3000 м/с. В диапазоне глубин 0–10 м скорость продольных и поперечных волн значительно возрастала в вертикальном направлении независимо от состава грунта. Было установлено, что физико-механические свойства породного массива существенно изменялись в пространстве. Аномальное увеличение скорости продольных волн позволило диагностировать напряженное состояние блока вскрышных пород, склонного к оползанию. На одном из карьеров было отмечено локальное снижение скорости поперечных волн, связанное с поверхностью скольжения. Использование вычисленного по данным сейсморазведки коэффициента

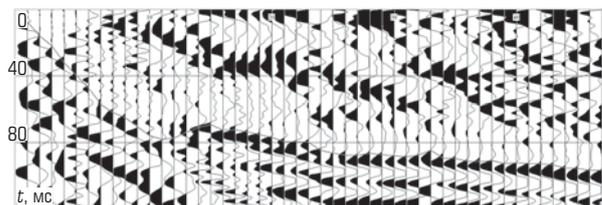


Рис. 2. Сейсмограмма инженерной сейсморазведки. Линией выделен годограф волны

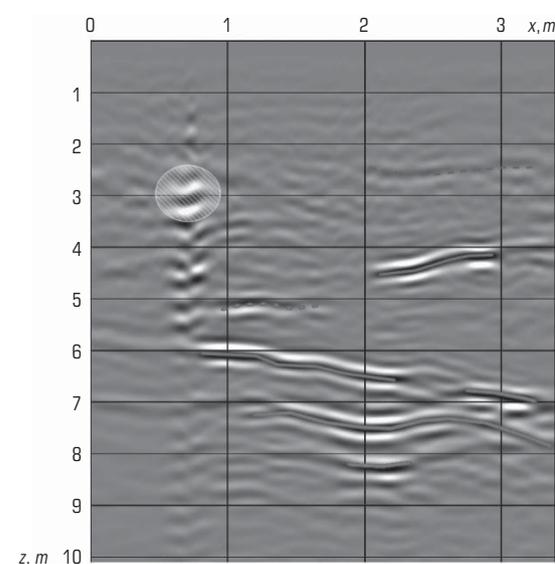


Рис. 3. Обработанный и проинтерпретированный разрез георадиолокации. Линиями показаны отражающие границы, штриховкой – скрытая полость в породном массиве

крепости позволило расчленить породы вскрыши на интервалы X–IX категорий.

При помощи георадиолокации в породных массивах выделялись отражающие границы (рис. 3) и скрытые полости. Часть границ была связана с зонами повышенного водонасыщения. Использование георадара с замерзшей поверхностью затопленной части карьера позволило установить контур поверхности минерального дна и правильно организовать дренаж.

Микросейсмическое зондирование еще раз подтвердило связь уровня микросейсм с состоянием породного массива. Ослабленные зоны выделялись по увеличению уровня случайных сейсмических колебаний, снижению частоты, возрастанию параметра спектра Накамуры. На бортах карьера уровень микросейсм предсказуемо падал от верхней части к основанию, что предопределило необходимость в поправках за высоту расположения датчика. Скорости сейсмических волн в вскрышных породах и определенная по ним крепость попали в типовые интервалы для отложений подобного состава и глубины залегания. При помощи георадиолокации ожидаемо выделились отражающие границы и отдельные локальные пустоты.

Заключение

Пример использования рассмотренного комплекса показывает, как при помощи геофизических методов эффективно реша-

ются многие задачи, возникающие при добыче полезных ископаемых. Метод регистрации микросейсм позволил определить наиболее уязвимые участки горных выработок, инженерная сейсмо-

разведка — уточнить механические свойства горных пород и картировать оползневые процессы, а георадиолокация — провести прямой поиск обводненных зон и скрытых полостей.

Библиографический список

1. Романов В. В., Посеренин А. И., Дронов А. Н., Мальский К. С. Обзор геофизических методов, применимых при поиске геомеханических нарушений вблизи горных выработок // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2016. № 1. С. 243–248.
2. Романов В. В., Мальский К. С., Дронов А. Н. Выбор оптимальных параметров записи микросейсмических колебаний в горных выработках // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2016. № 7. С. 101–107.
3. Hatherly P. Overview on the application of geophysics in coal mining // *International Journal of Coal Geology*. 2013. Vol. 114. P. 74–84.
4. Parasnis D. S. *Methods in Geochemistry & Geophysics: Mining Geophysics*. 2nd revised and updated ed. — Amsterdam : Elsevier, 2014. — 389 p.
5. Braga M. A., Endo I., Galbiatti H. F., Carlos D. U. 3D full tensor gradiometry and Falcon Systems data analysis for iron ore exploration: Baú Mine, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil // *Geophysics*. 2014. Vol. 79. Iss. 5. P. 213–220.
6. Kotyrba B., Schmidt V. Combination of seismic and resistivity tomography for the detection of abandoned mine workings in Münster/Westfalen, Germany: Improved data interpretation by cluster analysis // *Near Surface Geophysics*. 2014. Vol. 12. No. 3. P. 415–425.
7. Здещич В. М., Калинин О. А., Пигулевский П. Г., Рыбалко Б. И., Щербина С. В. Дослідження мікросейсмічних явищ техногенного походження // *Геофізический журнал*. 2015. Т. 37. № 5. С. 132–142.
8. Бах А. А., Красников А. А. Использование метода стоячих волн для анализа динамических характеристик высотных зданий на примере 40-этажного комплекса «Дирижабль», г. Москва // *Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений*. 2014. № 1. С. 26–30.
9. Malehmir A., Heinson S., Dehghannejad M., Heino P., Maries G. et al. Landstreamer seismics and physical property measurements in the Siilinjärvi open-pit apatite (phosphate) mine, central Finland // *Geophysics*. 2017. Vol. 82. Iss. 2. P. 29–48.
10. Malehmir A., Juhlin C., Wijns C., Urosevic M., Valasti P., Koivisto E. 3D reflection seismic imaging for open-pit mine planning and deep exploration in the Kevitsa Ni-Cu-PGE deposit, Northern Finland // *Geophysics*. 2012. Vol. 77. Iss. 5. P. 95–108.
11. Мальский К. С., Романов В. В. Исследование состояния горных выработок сейсмическими методами и георадиолокацией // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2016. № 8. С. 296–305.
12. Malehmir A., Durrheim R., Bellefleur G., Urosevic M., Juhlin C. et al. Seismic methods in mineral exploration and mine planning: A general overview of past and present case histories and a look into the future // *Geophysics*. 2012. Vol. 77. Iss. 5. P. 173–190.
13. Olivier G., Brenguier F., Campillo M., Lynch R., Roux P. Body-wave reconstruction from ambient seismic noise correlations in an underground mine // *Geophysics*. 2015. Vol. 80. Iss. 3. P. 11–25.
14. Van Dam R. L., Hendrick J. M. H., Cassidy N. J., North R. E., Dogan M., Borchers B. Effects of magnetite on high-frequency ground-penetrating radar // *Geophysics*. 2013. Vol. 78. Iss. 5. P. 1–11. 

«GORNYI ZHURNAL», 2018, № 11, pp. 61–64
DOI: 10.17580/gzh.2018.11.11

Estimation of rock mass strength and water content by geophysical methods

Information about authors

V. V. Romanov¹, Acting Head of Chair of Geophysics, Candidate of Engineering Sciences, roman_off@mail.ru

K. S. Malsky¹, Acting Dean of Geophysical Faculty, Candidate of Engineering Sciences

A. I. Poserenin¹, Senior Lecturer

A. D. Karinsky¹, Professor, Doctor of Physico-Mathematical Sciences

¹Sergo Ordzhonikidze Russian State Geological Prospecting University, Moscow, Russia

Abstract

The article describes the experience of using modern geophysical methods for studying the state of mine workings. In the course of a brief analysis of domestic and foreign literature, the capabilities of seismic, electrical and gravity exploration methods are shown. Out of them the methods that effectively solve the most of applied problems in mineral mining, namely, diagnosis and prevention of rock bursts, finding of hidden abandoned excavations, landslide mapping, finding and forecasting of underflooding zones, adjustment of drilling and blasting charts, etc., are selected. These methods are the multi-component recording of microseismic oscillations, engineering seismic surveys using longitudinal and surface (pseudo-Rayleigh) waves, GRP. The physical principles of the methods, the features of field operation and data processing, as well as the geological and geophysical results are briefly considered.

The article presents the conclusions on the absolute values of amplitudes of vibration acceleration and vibro-speed of microseisms in mine workings, prevailing frequencies of microseismic oscillations, as well as the shapes and magnitudes of the Nakamura spectra. The relationship is traced between the parameters of microseisms and weakened zones of fractured and watered rocks in mine workings. The geological and geophysical data obtained using engineering seismics are also analyzed. Based on the results, a layered structure and physical and mechanical properties of overburden rocks, depth of the groundwater table and sliding surfaces are determined in pitwalls of some surface mines. GRP had delineated underflooding and voids in underground mine workings.

The proposed package of methods has proved its effectiveness, as well as completeness and reliability of the results obtained in several mineral deposits. Each of the methods, solving specific tasks, has contributed to the model of the current state of the fields being developed. Based on the data of geophysical studies, the recommendations are made for the safe and efficient mineral mining with regard to internal structure and physical properties of deposits.

Keywords: geophysical methods, mining, microseisms, Nakamura method, engineering seismology, seismic waves, mine underflooding, GRP.

References

1. Romanov V. V., Poserenin A. I., Dronov A. N., Mal'skiy K. S. Review of geophysical methods to detect mechanical damages in rock mass around excavations. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten*. 2016. No. 1. pp. 243–248.
2. Romanov V. V., Mal'skiy K. S., Dronov A. N. Selection of optimum parameters of microseismic vibration recording in underground excavations. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten*. 2016. No. 7. pp. 101–107.
3. Hatherly P. Overview on the application of geophysics in coal mining. *International Journal of Coal Geology*. 2013. Vol. 114. pp. 74–84.
4. Parasnis D. S. *Methods in Geochemistry & Geophysics: Mining Geophysics*. 2nd revised and updated ed. Amsterdam : Elsevier, 2014. 389 p.
5. Braga M. A., Endo I., Galbiatti H. F., Carlos D. U. 3D full tensor gradiometry and Falcon Systems data analysis for iron ore exploration: Baú Mine, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. *Geophysics*. 2014. Vol. 79, Iss. 5. pp. 213–220.
6. Kotyrba B., Schmidt V. Combination of seismic and resistivity tomography for the detection of abandoned mine workings in Münster/Westfalen, Germany: Improved data interpretation by cluster analysis. *Near Surface Geophysics*. 2014. Vol. 12, No. 3. pp. 415–425.
7. Zdeschits V. M., Kalinichenko O. A., Pigulevsky P. G., Rybalko B. I., Shcherbina S. V. Investigation of microseismic phenomena of anthropogenic origin. *Geophysical Journal*. 2015. Vol. 37, No. 5. pp. 132–142.
8. Bakh A. A., Krasnikov A. A. Standing wave method usage for analysis of dynamic characteristics of high-rise buildings by example of 40-storey complex Dirigible, Moscow. *Earthquake engineering. Constructions safety*. 2014. No. 1. pp. 26–30.
9. Malehmir A., Heinson S., Dehghannejad M., Heino P., Maries G. et al. Landstreamer seismics and physical property measurements in the Siilinjärvi open-pit apatite (phosphate) mine, central Finland. *Geophysics*. 2017. Vol. 82, Iss. 2. pp. 29–48.
10. Malehmir A., Juhlin C., Wijns C., Urosevic M., Valasti P., Koivisto E. 3D reflection seismic imaging for open-pit mine planning and deep exploration in the Kevitsa Ni-Cu-PGE deposit, Northern Finland. *Geophysics*. 2012. Vol. 77, Iss. 5. pp. 95–108.
11. Malskiy K. S., Romanov V. V. Analysis of underground openings using seismic and georadar methods. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten*. 2016. No. 8. pp. 296–305.
12. Malehmir A., Durrheim R., Bellefleur G., Urosevic M., Juhlin C. et al. Seismic methods in mineral exploration and mine planning: A general overview of past and present case histories and a look into the future. *Geophysics*. 2012. Vol. 77, Iss. 5. pp. 173–190.
13. Olivier G., Brenguier F., Campillo M., Lynch R., Roux P. Body-wave reconstruction from ambient seismic noise correlations in an underground mine. *Geophysics*. 2015. Vol. 80, Iss. 3. pp. 11–25.
14. Van Dam R. L., Hendrick J. M. H., Cassidy N. J., North R. E., Dogan M., Borchers B. Effects of magnetite on high-frequency ground-penetrating radar. *Geophysics*. 2013. Vol. 78, Iss. 5. pp. 1–11.