Оценка эффективности комплекса геофизических методов исследований массива в условиях подземного рудника

Мельник В. В.¹, Харисов Т. Ф.^{1, 2*}, Замятин А. Л.¹, Харисова О. Д.¹

¹ Институт горного дела УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия

² Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург, Россия

*e-mail: timur-ne@mail.ru

Реферат

Введение. В настоящее время геофизические методы исследования массива горных пород нашли широкое применение в горном деле и в науках о Земле. С их помощью выполняются поисково-оценочные работы в массиве, а именно выявление структурных неоднородностей, пустот, а также различных зон контактов сред с достаточно высокой точностью. Точность полученных результатов зависит от метода, который используется в тех или иных условиях, характера и параметров искомого объекта, внешних условий проведения натурного эксперимента, а также поставленных в работе задач.

Методы исследований. Выполнен комплекс геофизических исследований с использованием методов спектрального сейсмопрофилирования и георадарного зондирования в условиях подземного рудника. Измерения проводились для поиска различных объектов под разным углом к искомому объекту с целью определения расстояния до него.

Результаты исследований. В результате исследований комплексом геофизических методов обнаружен металлический ползок под насыпной горной массой с последующим выделением границ двух ярусов полка при проведении вертикально направленных измерений. В процессе поиска нижележащей выработки в массиве при проведении вертикально направленных геофизических измерений в горизонтальной выработке в 20 м от ствола выявлено изменение плотности спектра на глубине около 55 м, что совпадает с фактическим расположением искомой выработки. Результаты поиска пустот в массиве горных пород при проведении измерений под углом к искомому объекту показали отсутствие достаточно явных границ и невозможность оценки расстояния до пустот в заложенных камерах.

Ключевые слова: георадар; геофизические исследования в подземных условиях; ствол шахты; массив; пустоты; спектральное сейсмопрофилирование.

Введение. Исследование массива горных пород с помощью геофизических методов является одним из наиболее эффективных способов решения поисково-оценочных задач в горном деле, газовой, нефтяной промышленности, а также в науках о Земле. Современное геофизическое оборудование позволяет дистанционно вести исследования природно-техногенных объектов в верхней части земной коры, выявлять структурные и петрографические неоднородности, тектонические разломы, карсты, пустоты, образованные при не до конца заложенных камерах или усадке закладочного материала, а также зоны контактов различных сред в массиве горных пород [1–10]. Точность полученных результатов зависит от множества факторов, а именно от того, какой метод используется в тех или иных условиях, от характера и параметров искомого объекта, от внешних условий проведения эксперимента, а также поставленных в работе задач.

Специалистами Института горного дела УрО РАН геофизические методы применяются, в том числе, для решения нестандартных задач на подземных рудниках и карьерах. Одной из таких задач в 2015 г. было определение мощности пробки из грунта и обломков крепи в стволе «Шахты им. С. М. Кирова», для оценки возможности ее устранения и разработки необходимых мероприятий по ликвидации аварийного ствола [11–14].

В статье представлены исследования и сравнительный анализ геофизических методов георадарного зондирования и спектрального сейсмопрофилирования (ССП) в условиях подземного рудника с определением допустимых задач, для решения которых данные методы использованы. Измерения проводились для поиска различных объектов и под разным углом к искомому объекту, а именно:

- поиск металлической конструкции под насыпной горной массой при проведении вертикально направленных измерений с определением приблизительного расстояния до искомого объекта (рис. 1, а);

- поиск пустоты (полости, выработанного пространства) в массиве горных пород при проведении вертикально направленных измерений с определением приблизительного расстояния до искомого объекта (рис. 1, а);

Рис. 1. Схема проведения геофизических исследований
Fig. 1. Geophysical research design

- поиск пустоты (полости, выработанного пространства) в массиве горных пород при проведении измерений под углом к искомому объекту (рис. 2) с определением приблизительного расстояния до искомого объекта.

Выбор набора геофизических методов в составе георадарного зондирования и ССП обусловлен низкой трудоемкостью, высокой скоростью и технологической простотой проведения измерений, что позволяет эффективно использовать их в подземных условиях во вмещающем скальном массиве горных пород.

Методы и их описание. Метод спектрального сейсмопрофилирования основан на использовании зависимости между спектральным составом колебательно-го процесса, возникающего при ударном воздействии на обнаженную поверхность горного массива, и структурным строением этого массива. Границы, выявляемые данным методом, представляют собой поверхности, по которым возможно взаимное проскальзывание соседних сред, т. е. трещины и контакты горных пород. Основными объектами, выявляемыми методом спектрального сейс-

мопрофилирования, являются как открытые, так и сомкнутые трещины и их совокупности в виде локальных зон трещиноватости [13–15].

Метод георадарного зондирования основан на излучении сверхширокополосных наносекундных импульсов, приеме сигналов, отраженных от границ раздела пород или иных отражающих объектов, обработке принятых сигналов и последующим измерением временных интервалов между отраженными импульсами [16].

Рис. 2. Результаты геофизических исследований:
а – поиск металлического полка; б – поиск нижележащей выработки
Fig. 2. Geophysical research results:
а – metallic shelf search; б – underlying excavation search

Основная задача, решаемая с использованием данного метода, состояла в определении положения границ раздела в изучаемых средах. Модель среды представляется в виде слоистой толщи с постоянными электрофизическими свойствами внутри каждого слоя и локальных объектов, отличающихся по электрофизическим свойствам от вмещающего материала. Наиболее важными параметрами, характеризующими возможности применения метода георадиолокации в различных средах, являются удельное затухание и скорость распространения электромагнитных волн в среде, которые определяются ее электрическими свойствами. Затухание определяет глубинность зондирования, скорость – расстояние до отражающей границы [16–17].

В работе использовался георадар ОКО-2 с экранированными антенными блоками. Он позволяет исследовать горный массив на глубину до 30 м с ранжированием породного блока по изменению электромагнитных свойств.

Результаты исследований. Поиск металлической конструкции под насыпной горной массой подразумевает поиск упавшего и застрявшего в эксплуатируемом стволе проходческого металлического трехъярусного полка. Причиной падения полка является скопившаяся на нем за несколько лет, в процессе транспортирования руды в скиповом стволе, горная масса в виде россыпи, а также непредвиденная разгрузка скипа. Нижняя часть ствола на момент падения была частично затоплена, в результате чего падение полка на скопившуюся в стволе воду привело к его деформированию от удара и расклиниванию между стенок. Особенность данной ситуации в том, что объем скопившейся горной массы на полке был неизвестен и отметка, на которой он находился (застрял) после падения, не определена. Визуальное обследование пробки с ближайшего горизонта не дало положительных результатов, так как с почвы горизонтальной выработки была видна только верхняя часть горной массы, а проследить ее мощность не представлялось возможным. Каких-либо частей полка, торчащих из горной массы, также не наблюдалось. Комплекс геофизических измерений с использованием двух названных ранее методов был выполнен по схеме, представленной на рис. 1, а.

На рис. 2, а показаны результаты поиска металлической конструкции под насыпной горной массой при проведении вертикально направленных измерений, где отображена совокупность слоев на различных отметках. На глубине около 5,5 м проявляется четкая граница нескольких сред с различной диэлектрической проницаемостью. Верхняя часть слоев до глубины 5,5 м соответствует раздробленной горной массе, состоящей преимущественно из медной руды, которая находится на третьем (верхнем) ярусе металлического полка. Нижняя часть слоев до глубины 11 м имеет иные характеристики и является водной средой, которая заполняет пространство между ярусами полка. Граница на глубине около 11 м является вторым ярусом полка (средним). Нижняя часть профиля зондирования представлена отражениями сигнала от металлических конструкций полка и скопившейся горной массы, а их интерпретация затруднительна. Результаты метода спектрального сейсмопрофилирования отображены на рис. 2, а в виде трех профилей, соответствующих трем измерениям на разных участках пробки, которые характеризуются изменением плотности спектра на различных границах, выявленных в рамках проходящего через них сигнала.

Границы, на которых происходит увеличение плотности спектра: 5,5–6,0 м, 10,5–11,0 м, около 15 м. При этом на каждом из профилей границы несколько отличаются, что скорее всего вызвано деформацией металлического полка и невысокой надежностью данного метода.

Следующие измерения выполнены для поиска пустоты, а именно нижележащей выработки в массиве горных пород, при проведении вертикально направленных геофизических измерений. Измерения проводились из горизонтальной выработки в 20 м от ствола, схема отражена на рис. 1, б. Исходя из результатов выявлено, что изменение плотности спектра прослеживается на глубине около 55 м, что совпадает с фактической отметкой расположения искомой выработки нижележащего горизонта (рис. 2, б). Георадар ОКО-2 в данном эксперименте не использовался, так как дальность его действия ограничена 30 м.

Поиск пустот в массиве горных пород при проведении измерений под углом к искомому объекту и определение расстояния до него являются наиболее сложной частью данной работы. Геофизические измерения выполнялись из горизонтальной выработки с целью поиска пустот в камерах, образование которых обусловлено усадкой закладочного материала при его затвердевании. Ширина камеры составляет около 20 м, а длина – 80 м. Расстояние от выработки, из которой проводились измерения, до пустоты в камерах предварительно оценивалось разве-

дочным бурением скважин № 1–4, оно составляет около 15–27 м в зависимости от угла наклона скважины (рис. 3). Подробная схема измерений представлена на рис. 1, б и 3.

На основании анализа результатов, полученных двумя рассматриваемыми геофизическими методами, выявлено отсутствие явных границ *массив–пустота*. Георадар обнаружил разность пород, отобразив участок с нарушенными сланцами, однако на расстоянии более 13 м сигнал затухает, и обнаружение пустот и структурных неоднородностей, находящихся глубже, не представляется возможным. Метод спектрального сейсмопрофилирования также не позволяет оценить наличие пустоты в массиве. На всем профиле измерений плотность спектра изменяется в хаотичном порядке, что делает интерпретацию результатов проблематичной.

Рис. 3. Результаты геофизических исследований при поиске пустот в камерах
Fig. 3. Results of geophysical research when searching for voids in stopes

Выводы. Метод георадарного зондирования является наиболее эффективным в подземных условиях при наличии скального массива пород. Он позволяет выявлять неоднородности, структурные нарушения и другие контрастные объекты в массиве горных пород при вертикально направленных измерениях. Измерения под углом к искомому объекту значительно осложняют выполнение поисково-оценочных задач, так как невозможно достаточно точно сориентировать прибор под необходимым углом.

Метод спектрального сейсмопрофилирования наиболее эффективен при выполнении вертикально направленных измерений, но имеющаяся погрешность требует большего количества измерений на исследуемом участке. Данный метод хорошо себя зарекомендовал как дополнительный (косвенный) с целью подтверждения или проверки результатов основного метода.

Достижение максимальной достоверности и информативности результатов геофизических исследований обеспечивается комплексированием методов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Андрианов С. В. Мониторинг состояния заобделочного пространства горных выработок методом георадиолокации // ГИАБ. 2019. № 5. С. 124–132.
2. Гапонов Д. А., Фоменко Л. Н., Шеремет Р. Д. Применение георадара для контроля качества закрепления грунтов // Инженерный вестник Дона. 2016. № 3(42). С. 68–71.
3. Серегин М. Ю. Перспективы развития георадиолокации // Наука и бизнес: пути развития. 2012. № 5(11). С. 70–72.
4. Носкевич В. В., Федорова Н. В. Использование метода георадиолокации для исследований древнего медного рудника «Воровская яма» на Южном Урале // Известия Уральского государственного горного университета. 2018. № 4(52). С. 61–67.
5. Калашник А. И., Дьяков А. Ю. Георадарное исследование геолого-структурного строения рабочего уступа карьера // Известия вузов. Горный журнал. 2015. № 6. С. 73–78.
6. Fischanger F., Morelli G., Ranieri G., Santarato G., Occhi M. 4D crossborehole electrical resistivity tomography to control resin injection for ground stabilization: a case history in Venice (Italy) // Near Surface Geophysics. 2013. Vol. 1. P. 41–50.
7. Santarato G., Ranieri G., Occhi M., Morelli G., Fischanger F., Gualerzi D. Three-dimensional Electrical Resistivity Tomography to control the injection of expanding resins for the treatment and stabilization of foundation soils // Engineering Geology. 2011. Vol. 119. P. 18–30.
8. Elsayed I. S., Alhussein A. B., Gad E., Mahfooz A. H. Shallow Seismic Refraction, Two-Dimensional Electrical Resistivity Imaging, and Ground Penetrating Radar for Imaging the Ancient Monuments at the Western Shore of Old Luxor City, Egypt // Archaeological Discovery. 2014. Vol. 2. No. 2. P. 31–43.
9. Conyers L. B. Ground-penetrating Radar for Geoarchaeology // Analytical Methods in Earth and Environmental Science. N. Y.: Wiley, 2016. 160 p.
10. Dafflon B., Leger E., Soom F., Ulrich C., Peterson J. E., Hubbard S. S. Quantification of arctic soil and permafrost properties using Ground Penetrating Radar // Proc. of 16th International Conference of Ground Penetrating Radar in the Hong Kong, 2016.
11. Харисов Т. Ф., Замятин А. Л., Ведерников А. С. Особенности ликвидации ствола шахты им. С. М. Кирова Турьинского медного рудника // Проблемы недропользования. 2015. № 2(5). С. 19–24.
12. Далатказин Т. Ш., Харисов Т. Ф. Исследование последствий затопления подземного рудника на селитебной территории // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. 2019. № 2. С. 38–51.
13. Мельник В. В., Замятин А. Л. Исследование структурных особенностей массива горных пород подземных сооружений // Известия вузов. Горный журнал. 2008. № 8. С. 165–171.
14. Мельник В. В. Применение метода спектрального сейсмопрофилирования для оценки геомеханического состояния массива горных пород вокруг шахтных выработок // ГИАБ. 2005. № 10. С. 69–74.
15. Гликман А. Г. Применение спектрально-сейсморазведочного профилирования (ССП) для поисков месторождений полезных ископаемых // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. 2001. № 3. С. 31–35.
16. Набатов В. В. Повышение эффективности георадиолокационного обследования конструкций тоннелей метрополитенов за счет уменьшения помехового влияния прямой волны // ГИАБ. 2014. № S1. С. 43–55.
17. Warren C., Giannopoulos A., Giannakis I. An advanced GPR modelling framework: the next generation of gprMax // IEEE, 2015. An advanced GPR modelling framework. P. 1–4.

Поступила в редакцию 13 февраля 2020 года

Сведения об авторах:

Мельник Виталий Вячеславович – кандидат технических наук, заведующий отделом геомеханики Института горного дела УрО РАН. E-mail: melnikvv74@mail.ru

Харисов Тимур Фаритович – кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории геомеханики подземных сооружений Института горного дела УрО РАН, доцент кафедры шахтного строительства Уральского государственного горного университета. E-mail: timur-ne@mail.ru

Замятин Алексей Леонидович – научный сотрудник лаборатории технологии снижения риска катастроф при недропользовании Института горного дела УрО РАН. E-mail: melnikvv74@mail.ru

Харисова Ольга Дмитриевна – научный сотрудник лаборатории сдвижения горных пород. Института горного дела УрО РАН. E-mail: olgazeltysheva@gmail.com

DOI: 10.21440/0536-1028-2020-4-32-39

Assessing the efficiency of a complex of geophysical methods of rock mass research under the conditions of an underground mine

Vitalii V. Melnik¹, Timur F. Kharisov^{1, 2}, Aleksei L. Zamiatin¹, Olga D. Kharisova¹

¹ Institute of Mining UB RAS, Ekaterinburg, Russia.

² Ural State Mining University, Ekaterinburg, Russia.

Abstract

Introduction. At present, geophysical methods of rock mass research have found wide application in mining and Earth sciences. They are used to perform prospecting and evaluation work in the massif, namely, to identify structural irregularities, voids and various contact zones of the media with sufficient accuracy. The accuracy of the results obtained depends on the method used in particular conditions, the nature and parameters of the target, the external conditions of the natural experiment, as well as the tasks set in the work.

Research methodology. The work included a set of geophysical studies, namely, methods of spectral seismic profiling and GPR in an underground mine. Measurements were made to find different objects at different angles to the object in question in order to determine the distance to it.

Research results. As a result of investigating with a complex of geophysical methods, a metal shelf was found under the bulk rock mass and two shelf tiers were subsequently separated when carrying out vertically directed measurements. In the process of searching for the underlying excavation in the massif during vertically directed geophysical measurements, which were carried out in the horizontal excavation 20 meters from the shaft, changes in spectrum density at a depth of about 55 m were detected, which coincides with the actual location of the sought excavation. The results of cavity search in rock mass when making measurements at an angle to the object sought showed that there are no sufficiently clear boundaries and it is impossible to estimate the distance to the cavity in the filled stopes.

Key words: GPR; underground geophysical research; mine shaft; massif; voids; spectral seismic profiling.

REFERENCES

1. Andrianov S. V. GPR monitoring of space between lining and rock in underground mines. *Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten (nauchno-tekhnicheskii zhurnal) = Mining Informational and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*. 2019; 5: 124–132. (In Russ.)
2. Gaponov D. A., Fomenko L. N., Sheremet R. D. The use of georadar in quality control of soil stabilization. *Inzhenernyi vestnik Dona = Engineering Journal of Don*. 2016; 3(42): 68–71. (In Russ.)
3. Seregin M. Iu. Future Development of Ground-Penetrating Radars. *Nauka i biznes: puti razvitiia = Science and Business. Development ways*. 2012; 5(11): 70–72. (In Russ.)
4. Noskevich V. V., Fedorova N. V. Using the ground penetrating radar method for research of the ancient "Vorovskaya Yama" copper mine in the South Ural. *Izvestiya Uralskogo Gosudarstvennogo Gornogo Universiteta = News of the Ural State Mining University*. 2018; 4(52): 61–67. (In Russ.)
5. Kalashnik A. I., Diakov A. Iu. Georadar research of geological-structural configuration of open pit working bench. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 2015; 6: 73–78. (In Russ.)
6. Fischanger F., Morelli G., Ranieri G., Santarato G., Occhi M. 4D crossborehole electrical resistivity tomography to control resin injection for ground stabilization: a case history in Venice (Italy). *Near Surface Geophysics*. 2013; 11: 41–50.
7. Santarato G., Ranieri G., Occhi M., Morelli G., Fischanger F., Gualerzi D. Three-dimensional Electrical Resistivity Tomography to control the injection of expanding resins for the treatment and stabilization of foundation soils. *Engineering Geology*. 2011; 119: 18–30.
8. Elsayed I. S., Alhussein A. B., Gad E., Mahfooz A. H. Shallow Seismic Refraction, Two-Dimensional Electrical Resistivity Imaging, and Ground Penetrating Radar for Imaging the Ancient Monuments at the Western Shore of Old Luxor City, Egypt. *Archaeological Discovery*. 2014; 2 (2): 31–43.
9. Conyers L. B. Ground-penetrating Radar for Geoarchaeology. *Analytical Methods in Earth and Environmental Science*. N. Y.: Wiley; 2016. 160 p.
10. Dafflon B., Leger E., Soom F., Ulrich C., Peterson J. E., Hubbard S. S. Quantification of arctic soil and permafrost properties using Ground Penetrating Radar. *Proc. of 16th International Conference of Ground Penetrating Radar in the Hong Kong*, 2016.
11. Kharisov T. F., Zamiatin A. L., Vedernikov A. S. Features of elimination the shaft of the "S. M. Kirov" mine in Turyinsky copper mine. *Problemy nedropolzovaniia = The Problems of Subsoil Use*. 2015; 2(5): 19–24. (In Russ.)
12. Dalatkazin T. Sh., Kharisov T. F. Investigations of the consequences of Turyinsky copper mine flooding. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Nauki o Zemle = Proceedings of the Tula State University. Earth Sciences*. 2019; 2: 38–51. (In Russ.)
13. Melnik V. V., Zamiatin A. L. Investigation of structural peculiarities of rock massif in surrounding of underground structures. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 2008; 8: 165–171. (In Russ.)
14. Melnik V. V. Spectral seismic profiling application to assess the geomechanical state of the rock mass around shaft goafs. *Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten (nauchno-tekhnicheskii zhurnal) = Mining Informational and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*. 2005; 10: 69–74. (In Russ.)
15. Glikman A. G. Applying spectral seismic profiling (SSP) for mineral exploration. *Geologiya, geofizika i razrabotka nefiannykh i gazovykh mestorozhdenii = Geology, Geophysics and Development of Oil and Gas Fields*. 2001; 3: 31–35. (In Russ.)
16. Nabatov V. V. Improving the efficiency of GPR survey of metro tunnel structures by means of reducing the interference of a direct signal. *Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten (nauchno-tekhnicheskii zhurnal) = Mining Informational and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*. 2014; S1: 43–55. (In Russ.)

17. Warren C., Giannopoulos A., Giannakis I. An advanced GPR modelling framework: the next generation of gprMax. *IEEE, 2015. An advanced GPR modelling framework*. P. 1–4.

Received 13 February 2020

Information about authors:

Vitalii V. Melnik – PhD (Engineering), Head of Geomechanical Department, Institute of Mining UB RAS. E-mail: melnikvv74@mail.ru

Timur F. Kharisov – PhD (Engineering), senior researcher, Laboratory of Underground Structures Geomechanics, Institute of Mining UB RAS, associate professor, Department of Mine Construction, Ural State Mining University. E-mail: timur-ne@mail.ru

Aleksei L. Zamiatin – researcher, Laboratory of Disaster Risk Reduction Technology at Subsoil Use, Institute of Mining UB RAS. E-mail: melnikvv74@mail.ru

Olga D. Kharisova – researcher, Laboratory of Rock Displacement, Institute of Mining UB RAS. E-mail: olgazeltyshcheva@gmail.com

Для цитирования: Мельник В. В., Харисов Т. Ф., Замятин А. Л., Харисова О. Д. Оценка эффективности комплекса геофизических методов исследований массива в условиях подземного рудника // Известия вузов. Горный журнал. 2020. № 4. С. 32–39. DOI: 10.21440/0536-1028-2020-4-32-39

For citation: Melnik V. V., Kharisov T. F., Zamiatin A. L., Kharisova O. D. Assessing the efficiency of a complex of geophysical methods of rock mass research under the conditions of an underground mine. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 2020; 4: 32–39 (In Russ.). DOI: 10.21440/0536-1028-2020-4-32-39