

ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД В УСЛОВИЯХ ПОДЗЕМНОГО РУДНИКА

Т.Ф. Харисов¹, В.В. Мельник¹, О.Д. Харисова¹, А.Л. Замятин¹

¹ Институт горного дела Уральского отделения Российской академии наук (ИГД УрО РАН)

Аннотация: Геофизические методы исследования массива горных пород являются одним из наиболее эффективных способов решения различных задач в горном деле и широко применяются в горной, газовой и нефтяной промышленности, а также в науке. Они позволяют дистанционно вести поисково-оценочные работы, выявлять структурные неоднородности, пустоты, зоны контактов различных сред в массиве горных пород с достаточно высокой точностью. В статье представлены исследования и сравнительный анализ геофизических методов георадарного зондирования и спектрального сейсмопрофилирования в условиях подземного рудника с определением допустимых задач, на решение которых данные методы способны. В комплексных геофизических исследованиях были применены методы спектрального сейсмопрофилирования и георадарного зондирования в условиях подземного рудника. Измерения проводились для поиска разных объектов и под разным углом к искомому объекту. Использование геофизических методов позволило обнаружить металлический полук под насыпной горной массой с выделением границ двух ярусов полка при проведении вертикально направленных измерений. Во время поиска нижележащей выработки в массиве при проведении в 20 метрах от ствола вертикально направленных геофизических измерений выявлено изменение амплитуды сейсмосигнала на глубине около 55 м, что совпадает с фактическим расположением искомой выработки. При проведении измерений в массиве горных пород под углом к искомому объекту достаточно явные границы пустот не обнаружены.

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

Благодарность: Работа выполнена в рамках Госзадания № 075–00581–19–00 Тема № 0405–2019–0007.

Для цитирования: Харисов Т.Ф., Мельник В.В., Харисова О.Д., Замятин А.Л. Геофизические исследования массива горных пород в условиях подземного рудника // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2020. – № 3-1. – С. 255–263. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-31-0-255-263.

Geophysical research of the rock mass in underground mine conditions

T.F. Kharisov¹, V.V. Mel'nik¹, O.D. Kharisova¹, A.L. Zamjatin¹

¹ The Institute of Mining of the Ural branch of the Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russia

Abstract: Geophysical methods of research of rock mass are one of the most effective ways of solving various problems in mining and are widely used in mining, gas and oil industry, as well as in science. They allow remote search and assessment works, detection of structural inhomogeneities, voids, contact zones of various media in the rock mass with sufficient high

accuracy. The article presents research and comparative analysis of geophysical methods of geophysical sensing and spectral seismo-profiling in underground mine conditions with determination of permissible tasks for which these methods are capable. In complex geophysical studies, methods of spectral seismo-profiling and geo-radar sensing in underground mine conditions have been applied. Measurements were made to search for different objects and at different angles to the object being searched. The use of geophysical methods made it possible to detect the metal shelf under the bulked rock mass with the separation of the boundaries of two tiers of the shelf during vertical measurements. In the process of searching for the underlying excavation in the mass during vertical geophysical measurements, which were carried out 20 meters from the shaft, a change in spectrum density at a depth of about 55 m was detected, which coincides with the actual location of the required mine working. The results of the search for caverns in the rock mass, when taking measurements at an angle to the object sought, showed the absence of sufficiently explicit boundaries of the caverns.

Key words: geo-radar, geophysical research in underground conditions, shaft, rock massif, caverns, spectral seismo-profiling.

Acknowledgments: the Work was performed under the state Task # 075-00581-19-00 Topic № 0405-2019-0007.

For citation: Kharisov T.F., Mel'nik V.V., Kharisova O.D., Zamjatin A.L. Geophysical research of the rock massif in underground mine conditions. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2020;(3-1):255-263. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-31-0-255-263.

Введение

Геофизические методы исследования массива горных пород являются одним из наиболее эффективных способов решения различных задач в горном деле, поэтому они широко применяются в горной, газовой и нефтяной промышленности, а также в науках о Земле. Современное геофизическое оборудование позволяет дистанционно вести поисково-оценочные работы природно-техногенных объектов в верхней части земной коры, выявлять структурные неоднородности, тектонические разломы, пустоты (карсты, недозаклад в камерах), зоны контактов различных сред в массиве горных пород [1–10]. Точность полученных результатов зависит от множества факторов, а именно: от метода, использованного в тех или иных условиях, характера и параметров поискового объекта, а также внешних условий проведения эксперимента и поставленных в работе задач.

Специалистами Института горного дела УрО РАН геофизические методы применяются для многих работ, 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 в условиях подземного рудника с определением допустимых задач, на решение которых данные методы способны. 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 (рис. 1, а);
- поиск пустоты (полости, выработанного пространства) в массиве горных пород при проведении вертикально направленных измерений (рис. 1, а);

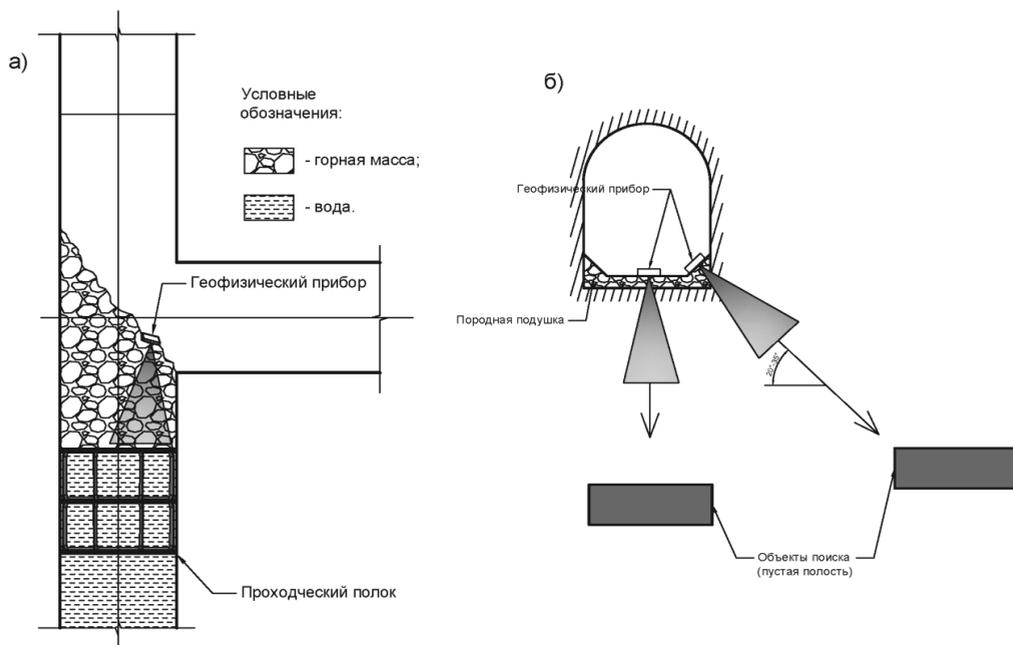


Рис. 1. Схема проведения геофизических исследований

Fig. 1. Geophysical survey diagram

- поиск пустоты (полости, выработанного пространства) в массиве горных пород при проведении измерений под углом к искомому объекту (рис. 2).

Выбор набора геофизических методов в составе георадарного зондирования и спектрального сейсмопрофилирования (ССП) обусловлен низкой трудоемкостью и технологической простотой проведения измерений, что позволяет эффективно использовать их в подземных условиях при скальном массиве горных пород.

Методы и их описание

Метод спектрального сейсмопрофилирования основан на использовании зависимости между спектральным составом колебательного 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 сейсмопрофилирования, являются как открытые, так и сомкнутые трещины, и их совокупности в виде локальных зон трещиноватости. Результаты измерений представляют собой совокупность спектральных изображений сейсмосигналов [13–15]. Амплитуда отражает различие по величине добротностей гармонических составляющих сейсмосигнала, что соответствует различию характера сцепления породного массива по каждой из его структурных границ.

Аппаратурно-программный ССП комплекс состоит из отдельно запатентованного сейсмоприемника оригинальной конструкции, 12-разрядного одноканального АЦП с широким частотным диапазоном, note-book и аккумулятора. Данный комплекс раз-

работан НПФ «Геофизпрогноз» в г. Санкт-Петербург.

Метод георадарного зондирования основан на излучении сверхширокополосных наносекундных импульсов, приеме сигналов, отраженных от границ раздела пород или иных отражающих объектов, обработке принятых сигналов и последующем измерении временных интервалов между отраженными импульсами [16]. 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 метров с ранжированием породного блока по электромагнитным свойствам.

Результаты исследований

Поиск металлической конструкции под насыпной горной массой подразумевает поиск упавшего и расклиненного проходческого трёхярусного полка в эксплуатируемом стволе. Причиной падения полка явилась скопившаяся на нем за несколько лет горная масса в виде россыпи в процессе выдачи руды, а также непредви-

денная разгрузка скипа в ствол. Ствол на момент падения был частично затоплен. Падение полка на скопившуюся в стволе воду и последующая деформация металлоконструкций от удара о воду привело к его расклиниванию между стенками ствола. Отметка, на которой находился полк после падения, точно не определена. Сложность данной ситуации заключалась еще и в том, что объем скопившейся горной массы над полком был не известен. Визуальное обследование пробки с доступного горизонта не дало положительных результатов, так как с его почвы 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 представленных выше методов был выполнен по схеме, представленной на рис. 1, а.

Полученные результаты обработаны, совмещены и представлены на рис. 2, а, 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.

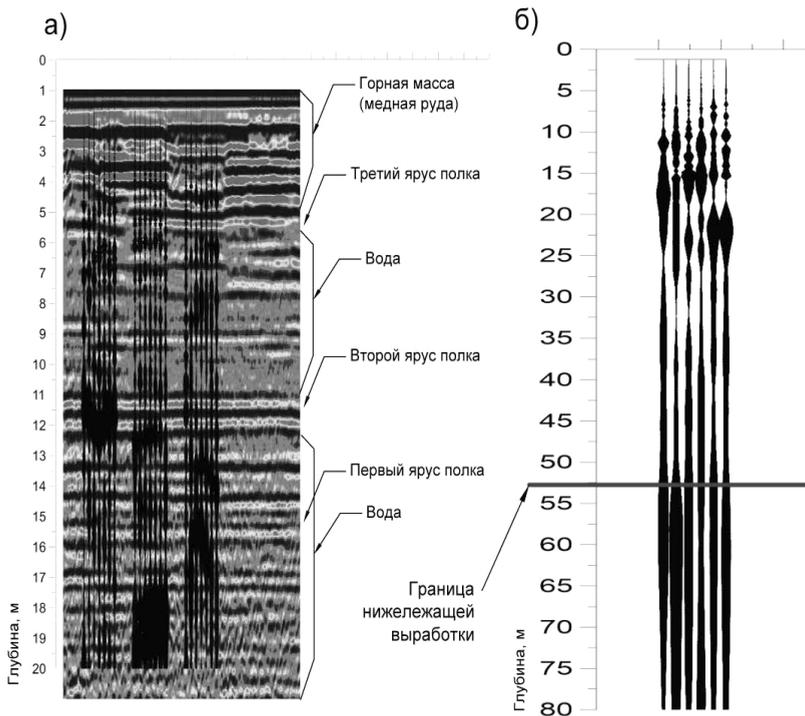


Рис. 2. Результаты геофизических исследований: а – поиск металлического полка, б – поиск нижележащей выработки

Fig. 2. Geophysical survey results: a – metal shelf search, b – underlying excavation search

Результаты метода спектрального сейсмопрофилирования представлены на рис. 2, а. Они состоят из трех профилей, которые соответствуют трем измерениям на различных участках пробки.

Приблизительные границы, на которых происходит увеличение амплитуды сейсмосигнала, а именно величины добротности его гармонических составляющих, следующие: 5,5–6,0 м, 10,5–11,0 м, 15 м. При этом на каждом из профилей границы несколько отличаются, что, скорее всего, вызвано деформацией металлического полка и возможной погрешностью данного метода.

Следующие измерения выполнены для поиска пустоты, а именно нижележащей выработки в массиве горных пород, при проведении вертикально направленных геофизических измере-

ний, которые проводились в 20 метрах от ствола. Схема, по которой производились измерения, представлена на рис. 1, б. Результаты выполненной серии измерений в почву горизонтальной выработки представлены на рис. 2, б. Изменение амплитуды сейсмосигнала прослеживается на глубине около 55 м, что совпадает с фактической отметкой расположения искомой выработки нижележащего горизонта. Гео-радар ОКО-2 в данном эксперименте не использовался вследствие ограничения его характеристик по дальности действия, составляющей не более 30 м.

Поиск пустот в массиве горных пород при проведении измерений под углом к искомому объекту оказался наиболее сложной задачей настоящих исследований. Измерения выполнялись из горизонтальной выработки для поиска пустот в камерах.

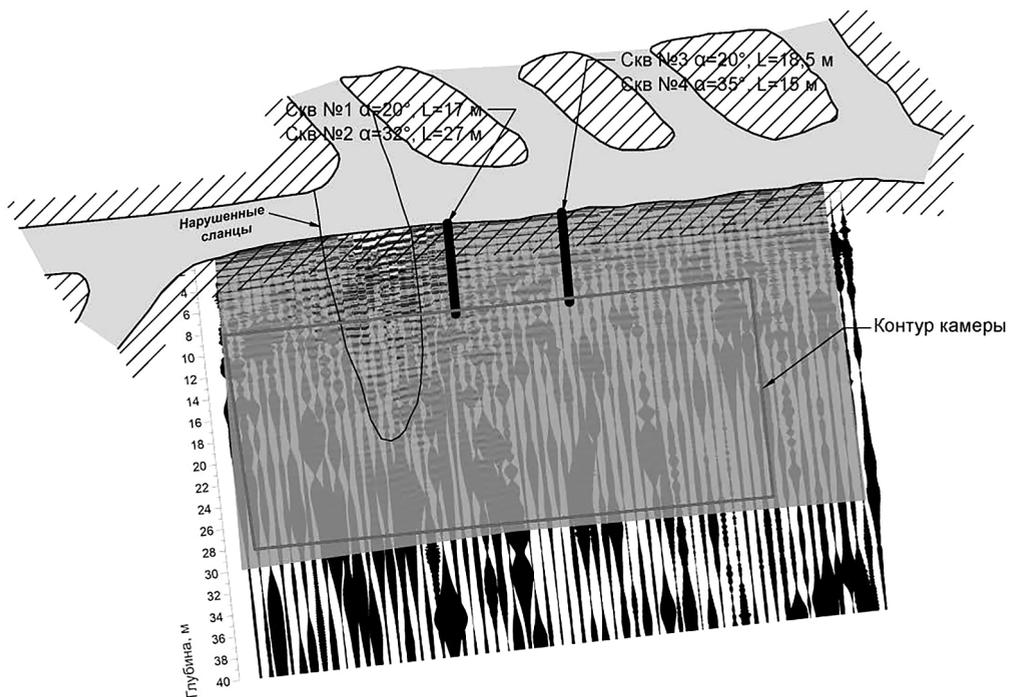


Рис. 3. Результаты геофизических исследований при поиске пустот в камере
 Fig. 3. Results of geophysical surveys when searching for caverns in chambers

Образование пустот обусловлено усадкой закладочного материала при его затвердевании. Наличие пустот недо-закладки предварительно подтвержда-лось разведочным бурением скважин №1 – 4. Ширина камеры составляет около 20 м, а длина – 80 м. Граница массив-пустота, обнаруженная раз-ведочными скважинами, находится на расстоянии 15 – 27 м от правой нижней части выработки, откуда произ-водилось бурение (рис. 3). Схема изме-рений представлена на рис. 1, б, где искомый объект расположен под углом.

Сравнительный анализ результатов, полученных двумя рассматриваемыми геофизическими методами, показал отсутствие явных границ массив-пустота. Георадар обнаружил разность пород, отобразив участок с нарушен-ными сланцами, однако на расстоянии более 13 м сигнал затухает, и обна-

ружение пустот и структурных неод-нородностей, находящихся глубже, не представляется возможным. Метод спектрального сейсмопрофилирования также не позволяет оценить наличие пустоты в массиве. На всем профиле измерений амплитуда сейсмосигнала изменяется в хаотичном порядке, что делает интерпретацию результатов про-блематичным.

По результатам выполненных иссле-дований можно сделать следующие выводы:

- 1) Метод георадарного зондиро-вания является наиболее эффективным в подземных условиях при наличии скального массива пород. Он позво-ляет выявлять неоднородности, струк-турные нарушения и другие контраст-ные объекты в массиве горных пород при вертикально направленных изме-рениях. Выполнение измерений под

углом к искомому объекту значительно осложняет выполнение поисково-оценочных задач, так как невозможно достаточно точно сориентировать прибор под необходимым углом.

2) Метод спектрального сейсмопрофилирования наиболее эффективен при выполнении вертикально направленных измерений, но имеющаяся погрешность требует большее

количество измерений на исследуемом участке. Данный метод хорошо себя зарекомендовал как дополнительный с целью подтверждения или проверки результатов основного метода.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Андрианов С.В. Мониторинг состояния заобделочного пространства горных выработок методом георадиолокации // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). — 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 высших учебных заведений. 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. 11, pp. 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, pp. 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, № 2, pp. 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., E. Leger, F. Soom, C. Ulrich, J.E. Peterson, S.S. Hubbard. 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 // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 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 // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). — 2014. — № 51. — 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. — pp. 1–4. 

REFERENCES

1. Andrianov S.V. Monitoring of space between lining and rock in underground mines. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2019. no 5. pp. 124–132. [In Russ]

2. Gaponov D.A., Fomenko L.N., SHERemet R.D. The use of georadar in quality control of soil stabilization. *Inzhenernyj vestnik Dona.* 2016. no 3 (42). pp. 68–71. [In Russ]

3. Seregin M.Yu. Future Development of Ground-Penetrating Radars. *Nauka i biznes: puti razvitiya.* 2012. no 5 (11). pp. 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 Ural'skogo gosudarstvennogo gornogo universiteta.* 2018. no 4 (52). pp. 61–67. [In Russ]

5. Kalashnik A.I., D'yakov A.Yu. Georadar research of geological-structural configuration of open pit working bench. *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Gornyj zhurnal.* 2015. no 6. pp. 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, Vol. 11, pp. 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, pp. 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, pp. 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., E. Leger, F. Soom, C. Ulrich, J.E. Peterson, S.S. Hubbard. 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. Harisov T.F., Zamyatin A.L., Vedernikov A.S. Features of elimination the shaft of the “S.M. Kirov” mine in Turyinsky copper mine. *Problemy nedropol'zovaniya.* 2015. no 2 (5). pp. 19–24. [In Russ]

12. Dalatkazin T.S.H. Harisov T.F., Research of consequences of flooding of the underground mine in the residential territory. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Nauki o Zemle.* 2019. no 2. pp. 38–51. [In Russ]

13. Mel'nik V.V., Zamyatin A.L. Investigation of structural peculiarities of rock massifs in surrounding of underground structures. *Izvestiya vuzov. Gornyj zhurnal.* 2008. no 8. pp. 165–171. [In Russ]

14. Mel'nik V.V. Application of spectral seismoprofylation method for assessment of geomechanical state of rock mass around mine workings. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2005. no 10. pp. 69–74. [In Russ]

15. Glikman A.G. Application of spectral-seismic profiling (SSP) for exploration of mineral deposits. *Geologiya, geofizika i razrabotka neftyanyh i gazovyh mestorozhdenij.* 2001. no 3. pp. 31–35. [In Russ]

16. Nabatov V.V. Increase of GPR survey effectiveness of subway tunnels construction elements by direct signal minimization. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2014. no S1. pp. 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. pp. 1–4.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

*Харисов Тимур Фаритович*¹ – канд. техн. наук, старший научный сотрудник лаборатории геомеханики подземных сооружений, доцент кафедры шахтного строительства,

*Мельник Виталий Вячеславович*¹ – канд. техн. наук, заведующий отдела геомеханики
*Харисов Ольга Дмитриевна*¹ – научный сотрудник лаборатории сдвижения горных пород,

*Замятин Алексей Леонидович*¹ – научный сотрудник лаборатории технологии снижения риска катастроф при недропользовании.

¹ Институт горного дела Уральского отделения Российской академии наук (ИГД УрО РАН), 620075 г. Екатеринбург, ГСП-219, Мамина-Сибиряка 58.

Контактное лицо: Харисов Т.Ф. e-mail: Timur-ne@mail.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*Kharisov T.F.*¹, Cand. Sci. (Eng.), senior researcher, associate Professor of Mine Construction,

*Mel'nik V.V.*¹, Cand. Sci. (Eng.), head of the Department of Geomechanical,

*Kharisova O.D.*¹, researcher of ground rock displacement laboratory,

*Zamyatin A.L.*¹, researcher of laboratory of technology for disaster risk reduction in subsoil use,

¹ The Institute of Mining of the Ural branch of the Russian Academy of Sciences, 620075, Ekaterinburg, Russia.

Corresponding author: Kharisov T.F. e-mail: Timur-ne@mail.ru.

Получена редакцией 21.11.2019; получена после рецензии 12.02.2020; принята к печати 20.03.2020.

Received by the editors 21.11.2019; received after the review 12.02.2020; accepted for printing 20.03.2020.

