



## Опыт применения геофизических методов в комплексе геодинамической диагностики горного массива

Т.Ш. Далатказин✉, А.С. Ведерников, Д.В. Григорьев, А.Л. Замятин, П.И. Зуев  
Институт горного дела Уральского отделения РАН, г. Екатеринбург, Российская Федерация  
✉9043846175@mail.ru

**Резюме:** При решении задач обеспечения безопасности объектов недропользования и повышения качества добываемого полезного ископаемого возникает необходимость структурирования горного массива. Для этого применяются определенные комплексы геофизических методов, состав которых зависит от конкретных горно-геологических условий. Геофизические методы успешно применяются при выявлении зон развития трещинообразования, карстообразования, на оползнеопасных участках. В статье рассмотрены примеры применения различных геофизических методов для определения строения и состояния массивов горных пород, которые используются в Институте горного дела Уральского отделения РАН. Приведены краткие характеристики таких методов, как инженерная сейсморазведка, спектральное сейсмопрофилирование, георадарное зондирование, сейсмическое микрорайонирование, электротомографические исследования, радонометрия. Сделаны выводы о том, что использование традиционных и современных геофизических методов в комплексе геодинамической диагностики, разработанной на основе новейших фундаментальных знаний о процессах, происходящих в геологической среде, позволяет достоверно определять структурно-геодинамическую модель горного массива для обеспечения безопасности объектов недропользования.

**Ключевые слова:** геомеханика, геодинамика, геофизика, геофизические методы, сейсморазведка, электроразведка, георадарное зондирование, радоновые эманаии

**Благодарности:** Работа выполнена в рамках государственного задания №075-00412-22 ПР. Тема 1. FUWE-2022-0005.

**Для цитирования:** Далатказин Т.Ш., Ведерников А.С., Григорьев Д.В., Замятин А.Л., Зуев П.И. Опыт применения геофизических методов в комплексе геодинамической диагностики горного массива. *Горная промышленность*. 2022;(1S): 105–110. DOI: 10.30686/1609-9192-2022-1S-105-110.

## Experience in application of geophysical methods in complex geodynamic diagnostics of rock massif

T.S. Dalatkazin✉, A.S. Vedernikov, D.V. Grigoriev, A.L. Zamyatin, P.I. Zuev  
Institute of Mining of Ural Branch of RAS, Ekaterinburg, Russian Federation  
✉9043846175@mail.ru

**Abstract:** When addressing the challenges of ensuring the safety of subsoil facilities and improving the quality of mined minerals there arises the need to structure the rock mass. Certain complexes of geophysical methods are used for this purpose, which composition depends on the specific mining and geological conditions. Geophysical methods are successfully used to identify zones of fracturing, karst formation as well as in landslide-prone areas. The paper reviews examples of applying various geophysical methods to determine the structure and state of rock masses, which are used at the Institute of Mining of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences. Brief characteristics of such methods as engineering seismic survey, spectral seismic profiling, georadar sounding, seismic microzoning, electrical tomographic studies, and radonometry are given. Conclusions are made that the use of traditional and modern geophysical methods as part of complex geodynamic investigation, developed based on the latest fundamental knowledge of the processes that take place in the geological environment, allows reliable determination of the structural-geodynamic model of the rock mass to ensure the safety of subsoil facilities.

**Keywords:** geomechanics, geodynamics, geophysics, geophysical methods, seismic survey, electrical survey, GPR sounding, radon emanations

**Acknowledgments:** Studies carried out according to the State Task No.075-00412-22 PR. Topic 1. FUWE-2022-0005.

**For citation:** Dalatkazin T.S., Vedernikov A.S., Grigoriev D.V., Zamyatin A.L., Zuev P.I. Experience in application of geophysical methods in complex geodynamic diagnostics of rock massif. *Gornaya promyshlennost = Russian Mining Industry*. 2022; (1 Suppl.):105–110. DOI: 10.30686/1609-9192-2022-1S-105-110.

## Введение

Институт горного дела УрО РАН обладает геофизической аппаратурой для производства исследований широким спектром методов и имеет значительный опыт в их проведении в комплексе геодинамической диагностики горного массива [1].

На объектах недропользования при решении задач обеспечения их безопасности, повышения качества добываемого полезного ископаемого и т.п. зачастую возникает необходимость структурирования горного массива. Для этого применяется ряд геофизических методов. Состав комплекса геофизических методов зависит от конкретных горно-геологических условий.

Вследствие механического воздействия в процессе формирования трещиноватости, дальнейшего влияния агентов выветривания, проникающих в массив по трещинам, происходит снижение прочностных характеристик горных пород зон структурного ослабления. В результате возникает возможность картирования таких зон вследствие контраста различных физических свойств массива.

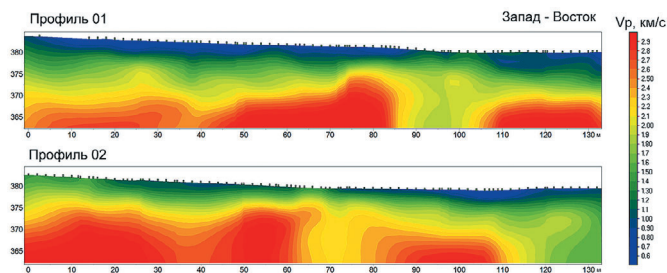
Геофизические методы успешно применяются при выявлении зон развития трещинообразования, карстообразования, на оползнеопасных участках. Определяется пространственное положение зон структурного ослабления, выполняется их ранжирование. Целью геофизических исследований являются выявление, определение пространственного положения и ранжирование зон структурного ослабления и повышенной трещиноватости в количественных значениях измеряемых физических полей [2].

Ниже представлена информация о геофизических методах, используемых в Институте горного дела УрО РАН для структурирования горного массива.

## Сейсморазведочные исследования

Результаты сейсмических работ – это сведения об упругих (акустических) свойствах изучаемого геологического разреза. Акустические свойства, в свою очередь, связаны с составом и условиями осадконакопления отложений и образования пород, что используется при геологической интерпретации сейсмических результатов для прогнозирования геологического строения изучаемой территории и месторождений полезных ископаемых (нефти, газа, угля, руды и т.п.), определения прочностных свойств пород и насыщения водой при инженерно-гидрогеологических изысканиях.

В инженерной сейсморазведке чаще всего используют метод преломленных волн (МПВ) и метод отраженных волн (МОВ). Метод преломленных волн чаще используют



**Рис. 1**  
Пример разреза распределения продольных скоростей на исследуемом участке

**Fig. 1**  
An example of a longitudinal velocity distribution profile in the surveyed area

при исследованиях массива, представляющего собой субгоризонтально слоистую среду. Метод отраженных волн более трудоемок и более требователен к аппаратуре, но в результате дает более информативную картину строения массива и неоднородностей в нем [3].

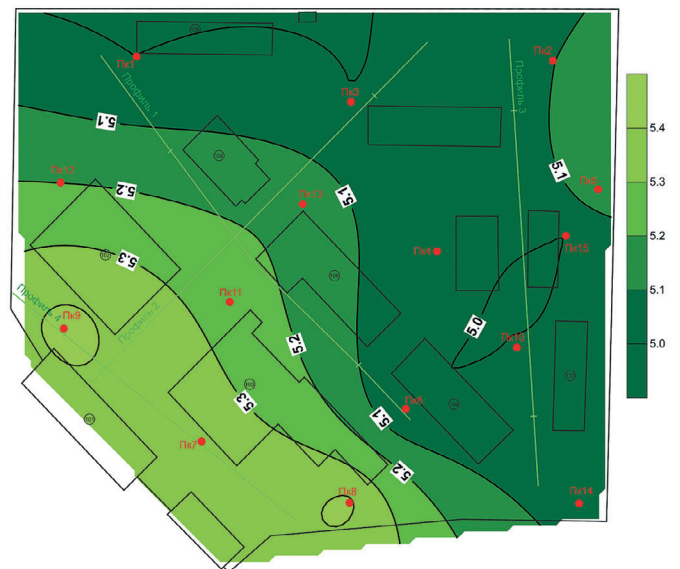
На рис. 1 показаны скоростные разрезы по двум параллельным профилям на борту карьера. На отметках 85–05 м разреза по профилю 01 отмечается некоторое снижение значений скоростей продольных волн и аналогичное снижение отмечается на профиле 02 с отметки 110 м и до конца профиля. Было высказано предположение о находящемся в этой локации ранее незакартированном тектоническом разломе. В дальнейшем данное предположение подтвердилось по результатам заверочного бурения.

## Сейсмическое микрорайонирование территорий

Микрорайонирование территорий представляет собой оценку реакции верхней части массива на внешнее воздействие, в первую очередь сейсмическое, то есть является в том числе и геомеханической задачей. Решение данной задачи практически полностью опирается на применение геофизических методов.

Существует несколько методов уточнения сейсмичности заданной площади. Один из них – это метод сейсмических жесткостей, в котором сравниваются сейсмические жесткости в исследуемой и эталонной точке территории. Для возможности вычисления сейсмической жесткости массива необходимо знание о скоростях распространения упругих (сейсмических) волн. Скорости упругих волн в массиве определяются при помощи сейсморазведочных исследований (например, методами преломленных или отраженных волн) [4].

На рис. 2 показана итоговая карта уточненной сейсмичности территории предприятия металлургической про-



**Рис. 2**  
Карта уточненной сейсмичности территории предприятия: зеленые линии – профили сейсморазведки, красные точки – пункты записи микросейсмического фона

**Fig. 2**  
A detailed seismicity map of the company's premises: green lines are seismic profiles, red dots are microseismic background recording stations



мышленности с исходной сейсмичностью 5 баллов. Эти результаты совместно с результатами геодезических измерений обеспечили необходимой информацией проектные работы на данном участке.

**Спектральная сейсморазведка**

Спектральная сейсморазведка коренным образом отличается от традиционной, лучевой сейсморазведки. В ССП среда представляется как совокупность колебательных систем, а не как слоистая система. Поэтому акустический импульс, возникающий в результате ударного воздействия, уже в самой зоне удара исчезает, превращаясь в гармонический (синусоидальный) затухающий сигнал.

Измерение осуществляется одним сейсмоприемником на каждой точке профиля. Каждый записываемый сейсмосигнал подвергается в дальнейшем преобразованию Фурье, с помощью которого любой изменяющийся во времени процесс может быть изображен на оси частот (т.е. в спектральном виде).

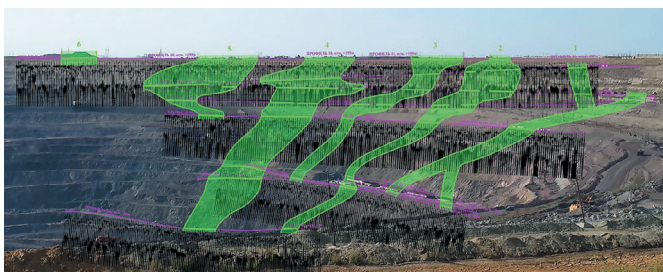
Основными объектами, выявляемыми методом ССП, являются поверхности скольжения, а также открытые и сомкнутые трещины и их совокупности, т.е. зоны трещиноватости.

Получаемые в результате обработки данные представляют собой изображение спектров сейсмосигналов и, одновременно, изображение конкретных геологических объектов в геомеханическом аспекте либо изображение разного рода подвижек.

Особенностью метода спектрального сейсмопрофилеирования является высокая мобильность при производстве измерений, что позволяет провести оперативное, детальное зондирование массива.

Например, при помощи метода ССП возможно оперативно оценить состояние бортов карьера. Для этого профили проходятся по каждому уступу один над другим и затем спектральные сейсморазрезы интерпретируются совместно, давая возможность оценить структуру массива в псевдотрехмерном виде (рис. 3). На рисунке видно, что выявленные неоднородности выстраиваются в продольную структуру, проходящую поперек направления борта.

Исходя из опыта применения ССП рекомендуется использовать его не как отдельный самостоятельный метод, а в комплексе с другими методами, в силу его не очень высокой разрешающей способности [5].



**Рис. 3**  
Пример использования метода ССП для определения структуры бортов карьера

**Fig. 3**  
An example of using the spectral seismic profiling method to determine the structure of the open pit walls

**Георадарное зондирование**

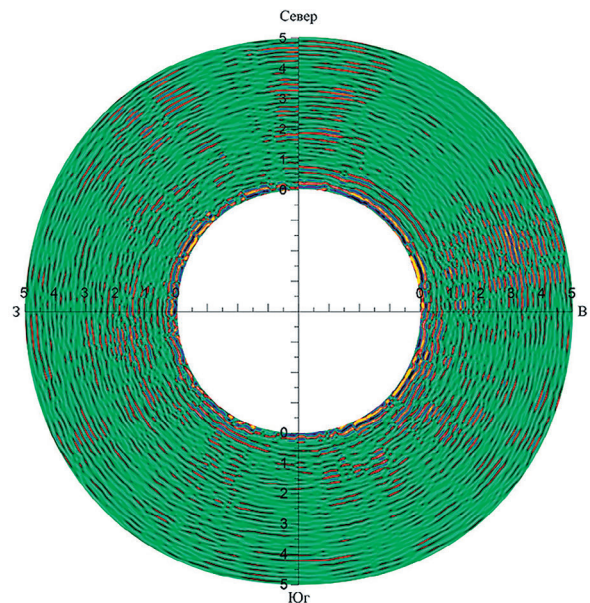
Метод георадиолокации относится к группе электромагнитных методов, то есть изучает отклик среды на излучаемое электромагнитное поле. Метод георадарного зонди-

рования относится к группе электроразведочных методов на токах высокой частоты, основан на явлении отражения электромагнитных волн от границ раздела поверхностей, обладающих различным значением комплексной диэлектрической проницаемости ( $\epsilon$ ).

Георадарное зондирование позволяет исследовать горный массив на глубину до 20 м с ранжированием породного блока по электромагнитным свойствам. Детальность исследований очень высокая за счет непрерывных измерений при прохождении профилей.

Основная цель метода состоит в определении положения границ раздела в изучаемых объектах. Такими границами раздела в исследуемых средах являются, например, контакт между материалом и воздухом, контакты между материалами различных свойств и состава.

Компактность аппаратуры для производства георадарных исследований позволяет использовать ее даже в шахтных стволах. На рис. 4 показан пример георадарного разреза в горизонтальной плоскости по профилю, выполненному по стенке шахтного ствола. Глубина прослеживаемого массива составила 5 м. На таких разрезах отмечаются неоднородности закрепного пространства [6; 7].



**Рис. 4**  
Пример применения георадарного зондирования для определения структуры закрепного пространства ствола шахты (отметки на осях в метрах)

**Fig. 4**  
An example of using the georadar sounding to determine the structure of the supported space of a mine shaft (marks on the axes are in meters)

**Электротомографические исследования**

Электроразведка методом сопротивлений остается одним из основных методов при малоуглубинных геофизических исследованиях. Основной методикой являются вертикальные электрические зондирования, применяемые при изучении горизонтально-слоистых разрезов. Развитие этого метода привело к появлению новой методики, которая нацелена на изучение сложнопостроенных сред и которая позволяет проводить интерпретацию в рамках двумерных моделей.

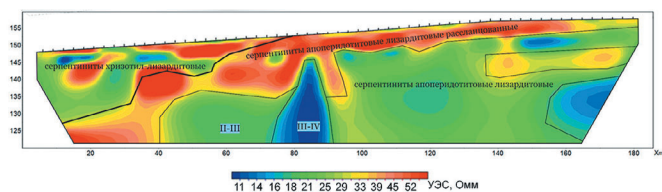
Измерения выполняются в полуавтоматическом режиме согласно заранее загруженным в коммутирующую

аппаратуру протоколам, в которых описывается порядок подключения питающих и измерительных электродов на электрометрической косе. По результатам обработки измерений электротомографии появляется возможность построить разрез удельного электрического сопротивления и разрез поляризуемости пород, что в комплексе даст устойчивые результаты по структурному расчленению разреза и геологической интерпретации полученных результатов [8].

Применение двумерной электроразведки целесообразно при всех детальны (масштаб 1:2000 и крупнее) геофизических исследованиях – при инженерно-геологических и гидрогеологических изысканиях, изучении геологического разреза на малых и средних глубинах при поисках и разведке полезных ископаемых, а также в менее традиционных областях применения малоглубинной геофизики – изучении археологических памятников, решении геоэкологических и других задач [9].

Для изучения геоэлектрических разрезов, значительно отличающихся от горизонтально-слоистых, применение электротомографии является необходимым условием для надежной интерпретации. Такое сложное строение обычно характерно для рудных зон и зон тектонических нарушений, оползней, насыпных и искусственных грунтов в зонах городской застройки, многолетнемерзлых пород, при крутом падении слоев и при наличии карста.

На рис. 5 показан пример геоэлектрического разреза, полученного по результатам обработки и интерпретации проведенных измерений по методике электротомографии в массиве серпентинитов. Удалось расчленить массив по разновидностям серпентинитов, имеющих отличающиеся удельные электрические сопротивления вследствие различной их нарушенности. Так, породы наибольшей III-IV категории трещиноватости имеют самое низкое УЭС – порядка 10 Ом·м (синим цветом в центре разреза). Интерпретация осуществлялась по имеющимся априорным данным о породах, слагающих массив.



**Рис. 5**  
Пример геоэлектрического разреза с расчленением пород по УЭС

**Fig. 5**  
An example of a geoelectric profile with rock stratification by specific electrical resistivity

### Радонометрия

Методика радонометрических исследований в геодинамической диагностике основана на прямой зависимости значений объемной активности радона в почвенном воздухе исследуемого горного массива от интенсивности проявления современной подвижности горного массива [10].

Наиболее оптимально использовать радонометрию при детальны площадных исследованиях для решения задач геодинамического районирования горного массива. В этом случае расстояние между профильными линиями задаётся в интервале 10–50 м, расстояние между точками

измерения 2–10 м. Детальны площадные исследования проводят в основном в масштабе 1:2000 – 1:500 и крупнее.

Измерения объемной активности радона (Бк/м<sup>3</sup>) в почвенном воздухе выполняются радиометром альфа-активных газов по профильным линиям из шпуров глубиной 0,8–1,0 м.

Для устранения влияния нетектонических факторов (площадная дифференциация по диффузионным свойствам покровных отложений, по вещественному составу горных пород и т.п.) на достоверность результатов исследований при геодинамическом районировании с использованием радонометрии используется нормирование значений объемной активности радона в почвенном воздухе. Для этого полученные в результате полевых измерений значения объемной активности радона группируются по принадлежности к однотипным участкам:

- по диффузионным свойствам покровных отложений;
- по вещественному составу горных пород;
- по положению уровня грунтовых вод;
- по влагонасыщенности почвы по площади и т.д.

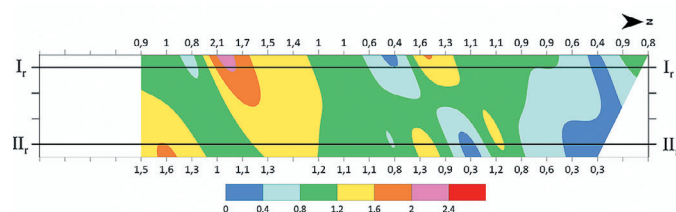
Для каждой точки измерения в группе рассчитываются нормированные значения объемной активности радона:

$$N_i = Q_i / Q_{(ср.группы)},$$

где  $N_i$  – нормированная объемная активность радона точки измерения  $i$ , безразмерная величина;  $Q_i$  – значение объемной активности радона в почвенном воздухе точки измерения на профильной линии, Бк/м<sup>3</sup>;  $Q_{(ср.группы)}$  – среднеарифметическое значение объемной активности радона в почвенном воздухе группы точек измерений, Бк/м<sup>3</sup>.

Нормирование позволяет определять геодинамическую составляющую формирования поля радона. При этом  $N_i$  фактически является индексом геодинамической активности в точке измерения, что позволяет ранжировать изучаемый горный массив по степени современной геодинамической активности [11].

С применением метода интерполяции строится карта распределения нормированных значений объемной активности радона в почвенном воздухе изучаемой территории (рис. 6). Интерпретация результатов радонометрии для геодинамического районирования осуществляется по принципу прямой зависимости формирования поля радона от распределения интенсивности современной геодинамики.



**Рис. 6**  
Пример геодинамического районирования по данным радонометрических измерений. Шубаркольское месторождение угля. Борт Западного разреза

**Fig. 6**  
An example of geodynamic zoning according to radonometric measurements. Shubarkol coal deposit. Wall of the Western strip mine

Параметры поля радоновых эманацй формируются всем спектром частот геодинамических подвижек.



## Заключение

Использование традиционных и современных геофизических методов в комплексе геодинамической диагностики, разработанной на основе новейших фундаментальных знаний о процессах, происходящих в геологической среде, позволяет достоверно определять структурно-геодинамическую модель горного массива для обеспечения безопасности объектов недропользования.

## Список литературы

1. Зуев П.И., Григорьев Д.В., Ведерников А.С. Геофизическое обследование участков асбестового карьера. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2021;(5-1):131–141. [https://doi.org/10.25018/0236\\_1493\\_2021\\_51\\_0\\_131](https://doi.org/10.25018/0236_1493_2021_51_0_131)
2. Anchuela Ó.P., Luzón A., Garbi H.G., Pérez A., Juan A.P., Soriano M.A. Combination of electromagnetic, geophysical methods and sedimentological studies for the development of 3D models in alluvial sediments affected by karst (Ebro Basin, NE Spain). *Journal of Applied Geophysics*. 2014;102:81–95. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2014.01.002>
3. Li S.C., Zhou Z.Q., Ye Z.H., Li L.P., Zhang Q.Q., Xu Z.H. Comprehensive geophysical prediction and treatment measures of karst caves in deep buried tunnel. *Journal of Applied Geophysics*. 2015;116:247–257. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2015.03.019>
4. Семенова Ю.В. Методы учета влияния местных грунтовых условий на сейсмическую опасность строительной площадки. *Sciences of Europe*. 2021;(63-3):10–14. <https://doi.org/10.24412/3162-2364-2021-63-3-10-14>
5. Замятин А.Л. Изучение состояния массива горных пород для обеспечения устойчивости борта карьера. В кн.: Валиев Н.Г. (ред.) *Инновационные геотехнологии при разработке рудных и нерудных месторождений: сб. докл. 7-й Междунар. науч.-техн. конф. в рамках Уральской горнопромышленной декады, г. Екатеринбург, 10–11 апр. 2018 г.* Екатеринбург: Изд-во УГГУ; 2018. С. 325–329.
6. Feng K., Zhao Y., Wu J., Ge S. Cross-correlation attribute analysis of GPR data for tunnel engineering. In: *Proceedings of the 15<sup>th</sup> International Conference on Ground Penetrating Radar, Brussels, 30 June – 4 July 2014*. IEEE; 2014, pp. 435–440. <https://doi.org/10.1109/ICGPR.2014.6970461>
7. Poomvise N.; Kongsuk A.; Pakdeero P.; Suklim T. Application of Ground Penetrating Radar and Hilbert transformation helps revealing anomalous body of leakage in a concrete structure; A case history at Huai Mae Tor, Tak province, Thailand. In: *17<sup>th</sup> International Conference on Ground Penetrating Radar (GPR), Rapperswil, 18–21 June 2018*. IEEE; 2018, pp. 427–430. <https://doi.org/10.1109/ICGPR.2018.8441528>
8. Loke M.H. Tutorial: 2-D and 3-D Electrical Imaging Surveys. 2004. Available at: [https://www.researchgate.net/publication/264739285\\_Tutorial\\_2-D\\_and\\_3-D\\_Electrical\\_Imaging\\_Surveys](https://www.researchgate.net/publication/264739285_Tutorial_2-D_and_3-D_Electrical_Imaging_Surveys)
9. Bièvre G., Oxarango L., Günther T., Goutaland D., Massardi M. Improvement of 2D ERT measurements conducted along a small earth-filled dyke using 3D topographic data and 3D computation of geometric factors. *Journal of Applied Geophysics*. 2018;153:100–112. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2018.04.012>
10. Ульянов В.Ю. Мониторинг радона как индикатора сейсмотектонических событий на площадке АЭС «Бушер-1» и прилегающей территории провинции Бушер Исламской Республики Иран. *Глобальная ядерная безопасность*. 2017;(4):7–17. Режим доступа: <http://gns.mephi.ru/sites/default/files/journal/file/ru.2017.4.1.1.pdf>
11. Далатказин Т.Ш., Зуев П.И. Исследования геодинамической ситуации прибортовых участков с использованием радонометрии при открытом способе разработки месторождений. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2020;(3-1):46–55. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-31-0-46-55>

## References

1. Zuev P.I., Grigoriev D.V., Vedernikov A.S. Geophysical survey of asbestos pit wall. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021;(5-1):131–141. (In Russ.) [https://doi.org/10.25018/0236\\_1493\\_2021\\_51\\_0\\_131](https://doi.org/10.25018/0236_1493_2021_51_0_131)
2. Anchuela Ó.P., Luzón A., Garbi H.G., Pérez A., Juan A.P., Soriano M.A. Combination of electromagnetic, geophysical methods and sedimentological studies for the development of 3D models in alluvial sediments affected by karst (Ebro Basin, NE Spain). *Journal of Applied Geophysics*. 2014;102:81–95. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2014.01.002>
3. Li S.C., Zhou Z.Q., Ye Z.H., Li L.P., Zhang Q.Q., Xu Z.H. Comprehensive geophysical prediction and treatment measures of karst caves in deep buried tunnel. *Journal of Applied Geophysics*. 2015;116:247–257. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2015.03.019>
4. Semenova Yu.V. Methods for taking into account the influence of local ground conditions on the seismic hazard of a construction site. *Sciences of Europe*. 2021;(63-3):10–14. (In Russ.) <https://doi.org/10.24412/3162-2364-2021-63-3-10-14>
5. Zamyatin A.L. The study of the state of rocks to ensure the stability of pit edges. In: Valiev N.G. (ed.) *Innovative geotechnologies in mining of ore and nonmetallic deposits: Proceedings of the 7<sup>th</sup> International Scientific and Technical Conference within the Ural Mining Decade, Ekaterinburg, 10–11 April 2018*. Ekaterinburg: Ural State Mining University; 2018, pp. 325–329. (In Russ.)
6. Feng K., Zhao Y., Wu J., Ge S. Cross-correlation attribute analysis of GPR data for tunnel engineering. In: *Proceedings of the 15<sup>th</sup> International Conference on Ground Penetrating Radar, Brussels, 30 June – 4 July 2014*. IEEE; 2014, pp. 435–440. <https://doi.org/10.1109/ICGPR.2014.6970461>
7. Poomvise N.; Kongsuk A.; Pakdeero P.; Suklim T. Application of Ground Penetrating Radar and Hilbert transformation helps revealing anomalous body of leakage in a concrete structure; A case history at Huai Mae Tor, Tak province, Thailand. In: *17<sup>th</sup> International Conference on Ground Penetrating Radar (GPR), Rapperswil, 18–21 June 2018*. IEEE; 2018, pp. 427–430. <https://doi.org/10.1109/ICGPR.2018.8441528>



8. Loke M.H. *Tutorial: 2-D and 3-D Electrical Imaging Surveys*. 2004. Available at: [https://www.researchgate.net/publication/264739285\\_Tutorial\\_2-D\\_and\\_3-D\\_Electrical\\_Imaging\\_Surveys](https://www.researchgate.net/publication/264739285_Tutorial_2-D_and_3-D_Electrical_Imaging_Surveys)
9. Bièvre G., Oxarango L., Günther T., Goutaland D., Massardi M. Improvement of 2D ERT measurements conducted along a small earth-filled dyke using 3D topographic data and 3D computation of geometric factors. *Journal of Applied Geophysics*. 2018;153:100–112. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2018.04.012>
10. Ulyanov V.Y. Radon monitoring as an indicator of seismotectonic events at the Bushehr-1 NPP site and Bushehr Province Adjoining Territory of the Islamic Republic of Iran. *Global Nuclear Safety*. 2017;(4):7–17. Available at: <http://gns.mephi.ru/sites/default/files/journal/file/ru.2017.4.1.1.pdf>
11. Dalatkazin T.Sh., Zuev P.I. Study of geodynamic situation cut off parts of the plots using ergonometry with the open method of field development. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2020;(3-1):46–55. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-31-0-46-55>

#### **Информация об авторах**

**Далатказин Тимур Шавкатович** – кандидат технических наук, заведующий лабораторией технологий снижения риска катастроф при недропользовании, Институт горного дела Уральского отделения Российской академии наук, г. Екатеринбург, Российская Федерация; e-mail: 9043846175@mail.ru

**Ведерников Андрей Сергеевич** – научный сотрудник лаборатории технологий снижения риска катастроф при недропользовании, Институт горного дела Уральского отделения Российской академии наук, г. Екатеринбург, Российская Федерация; e-mail: avedernikov@igduran.ru

**Григорьев Данила Вячеславович** – младший научный сотрудник лаборатории технологий снижения риска катастроф при недропользовании, Институт горного дела Уральского отделения Российской академии наук, г. Екатеринбург, Российская Федерация; e-mail: danilging@gmail.com

**Замятин Алексей Леонидович** – научный сотрудник лаборатории технологий снижения риска катастроф при недропользовании, Институт горного дела Уральского отделения Российской академии наук, г. Екатеринбург, Российская Федерация; e-mail: a.zamyatin@mail.ru

**Зуев Павел Игоревич** – научный сотрудник лаборатории технологий снижения риска катастроф при недропользовании, Институт горного дела Уральского отделения Российской академии наук, г. Екатеринбург, Российская Федерация; e-mail: zuev@igduran.ru

#### **Information about the authors**

**Timur Sh. Dalatkazin** – Cand. Sc. (Eng.), Head of the Laboratory of Technologies of Decrease in Risk of Accidents at Mineral Development, Institute of Mining of Ural Branch of RAS, Ekaterinburg, Russian Federation; e-mail: 9043846175@mail.ru

**Andrey S. Vedernikov** – Researcher of the Laboratory of Technologies of Decrease in Risk of Accidents at Mineral Development, Institute of Mining of Ural Branch of RAS, Ekaterinburg, Russian Federation; e-mail: avedernikov@igduran.ru

**Danila V. Grigoriev** – Junior Researcher of the Laboratory of Technologies of Decrease in Risk of Accidents at Mineral Development, Institute of Mining of Ural Branch of RAS, Ekaterinburg, Russian Federation; e-mail: avedernikov@igduran.ru

**Alexey L. Zamyatin** – Researcher of the Laboratory of Technologies of Decrease in Risk of Accidents at Mineral Development, Institute of Mining of Ural Branch of RAS, Ekaterinburg, Russian Federation; e-mail: a.zamyatin@mail.ru

**Pavel I. Zuev** – Researcher of the Laboratory of Technologies of Decrease in Risk of Accidents at Mineral Development, Institute of Mining of Ural Branch of RAS, Ekaterinburg, Russian Federation; e-mail: a.zamyatin@mail.ru

#### **Article info**

Received: 27.09.2021

Revised: 22.10.2021

Accepted: 26.10.2021

#### **Информация о статье**

Поступила в редакцию: 27.09.2021

Поступила после рецензирования: 22.10.2021

Принята к публикации: 26.10.2021