

ОРИГИНАЛЬНЫЕ СТАТЬИ / ORIGINAL PAPERS

DOI: 10.17073/2500-0632-2019-4-251-261

Исследование ослабленности массива пород при подземной добыче руд**Голик В. И.¹, Масленников С. А.², Нуньес Родригес Альберто Мартин³, Анищенко В. И.⁴**¹Северо-Кавказский горно-металлургический институт (СКГТУ), Владикавказ, Россия²Донской государственный технический университет (филиал), Шахты, Россия³Технический университет, Восточный Сибирь, Доминиканская республика⁴LLC "Spetsmodulproekt", Нью-Йорк, США

Аннотация: Оптимизация процессов подземной разработки месторождений осуществляется за счет рационального использования энергии для получения заданной крупности руд. Ее успех зависит от учета свойств разрушаемой среды. Важную роль в управлении энергией играет ослабленность пород природными и техногенными силовыми полями. Для внесения коррективов в общую модель управления энергией нужны сведения о строении массива, получаемые геофизическими методами. Поскольку для уменьшения выхода негабаритных или излишне измельченных фракций минералов в процессе отбойки используют регулирование затрат энергии взрыва на степень разупрочнения пород, целью исследования является определение эффективности использования геофизических методов для оперативной и корректной оценки состояния породных и закладочных массивов при подземной разработке месторождений твердых полезных ископаемых. Ослабленность массивов пород оценивается методом электрометрических исследований в бескерновых разведочных скважинах. Сопоставлением данных о степени ослабленности установлено наличие корреляционной связи между участвующими параметрами, что позволяет выразить зависимость между ними. Дана оценка эффективности использования геофизических методов для дифференциации природных и искусственных массивов по ослабленности геологическими и технологическими силовыми полями. Для определения коэффициента ослабления по кажущемуся сопротивлению пород использованы материалы электрометрического каротажа. На основе выявленной зависимости породный массив дифференцирован по степени ослабленности пород. Дифференцированы и детализированы особенности составляющих комплекса геофизических методов исследований. Приведены методология и результаты подземного электроразведывания последовательной градиент-установкой с помощью теоретических кривых на конкретном металлическом месторождении с определением проводимости пород и расстояния до выработки. Дифференцированно дана оценка корректности геофизических методов: ослабленности пород электрометрическим каротажом скважин, а опережающее оконтуривание зон неоднородностей в массивах месторождений – электроразведыванием вдоль стенок выработок. На основании проведенных опытных работ по выявлению структурных границ в массиве метод электроразведывания вдоль стенок выработок рекомендован для практического применения. При использовании скважинного электроразведывания сходимость экспериментальных кривых с теоретическими недостаточна.

Ключевые слова: разработка месторождения, порода, ослабленность, геофизические методы, электрометрия, электроразведывание.

Для цитирования: Голик В. И., Масленников С. А., Нуньес Родригес Альберто Мартин, Анищенко В. И. Исследование ослабленности массива пород при подземной добыче руд. *Горные науки и технологии*. 2019;4(4):251-261. DOI: 10.17073/2500-0632-2019-4-251-261.

Study of Rock Mass Stability Decrease due to Underground Mining

V. I. Golik¹, S. A. Maslennikov², Alberto Martin Nunez Rodriguez⁴, V. I. Anischenko⁴

¹North-Caucasian Mining and Metallurgical Institute (SKGTU), Vladikavkaz, Russia

²Don State Technical University, Shakhty, Russia

³Technical University, East Sibao, Dominican Republic

⁴LLC "Spetsmodulproekt", New York, USA

Abstract: The optimization of underground mining processes is carried out based on rational use of energy for obtaining preset broken ore size. The effective optimization requires correct assessment of the properties of the rock mass to be broken. Energy management requires assessment of rock mass stability decrease due to impact of natural and technogenic stresses. To make adjustments to the general energy management model, information on the rock mass structure is required to be obtained by geophysical methods. To optimize broken rock/ore size (to minimize oversized or excessively crushed mineral fraction yield during breaking), blasting energy application should be regulated and smart. The study is aimed at assessing the effectiveness of using geophysical methods for the prompt and correct assessment of rock and backfill mass condition during underground mining of mineral deposits. Decreasing stability of rock masses is assessed using the method of electrometric surveys in noncore exploratory boreholes. Rock mass stability study allowed revealing correlation and dependencies between the studied parameters. Effectiveness of using geophysical methods for differentiating natural and technogenic masses by degree of decreasing their stability due to geological and technogenic stresses. To determine the coefficient of decreasing rock mass stability based on rock apparent resistivity data, electrometric logging was used. This allowed to differentiate rock mass by the degree of decreasing rock mass stability based on the revealed dependency. The features of the geophysical survey components are described in details. The methodology and findings of the underground electric sounding using a sequential gradient electrode system at specific metal deposit are presented, including using theoretical curves and determining rock conductivity and the distance to workings. Besides, correctness of the geophysical method findings was assessed differentially. The assessment was prepared for decreasing rock mass stability based on electrometric logging data, and for advance outlining heterogeneity zones in rock masses by electric sounding along working walls. Based on findings of the conducted experimental work on revealing structural boundaries within rock mass, the method of electric sounding along working walls was recommended for application in practice. As for the studied borehole electric sounding application, the convergence of the experimental and theoretical curves is insufficient to recommend the method for practical application.

Keywords: deposit development, rock, decreasing stability, geophysical methods, electrometry, resistivity sounding.

For citation: Golik V. I., Maslennikov S. A., Nunez Rodriguez Alberto Martin, Anischenko V. I. Study of rock mass stability decrease due to underground mining. *Gornye nauki i tekhnologii = Mining Science and Technology (Russia)*. 2019;4(4):251-261. (In Russ.). DOI: 10.17073/2500-0632-2019-4-251-261.

Введение

Для оптимизации процессов подземной разработки месторождений, например выщелачивания металлов из руд, нужны надежные методы управления энергией взрыва для получения заданной крупности руд [1–3]. Качество дробления оценивают по распределению отбитой руды по фракциям крупности и характеру проработки поверхности отрыва, причем основным показателем является суммарная площадь образованных в результате взрыва кусков.

Для достижения этого параметры взрыва должны определяться в зависимости от свойств разрушаемой среды. Чтобы уменьшить выход негабаритных или излишне измельченных фракций минералов, в процессе отбойки регулируют затраты энергии взрыва на степень разупрочнения пород [4–7].

Разрушение массива горных пород при взрывании заряда происходит под воздействием изменяющихся в пространстве и времени напряжений. В новых условиях пара-





метры взрыва должны обеспечивать равномерное дробление с минимальным выходом негабаритных фракций, равномерное разрыхление взорванной руды и полную проработку рудного массива.

Увеличение выхода машинного класса имеет первостепенное значение для всех технологий добычи руд, поэтому приоритетное значение приобретает проблема учета однородности массива при организации взрывной отбойки руд. Основную роль в управлении взрывом играет ослабленность пород природными и техногенными силовыми полями. Для внесения коррективов в общую модель действия взрыва нужны сведения о внутреннем строении массива или о влиянии на него горно-геологических и горнотехнических факторов [8–13].

Решить эти проблемы могут геофизические методы исследования природных и техногенных массивов [14–19].

Цели и задачи. Целью исследования является определение в натурных условиях эффективности использования геофизических методов для оперативной оценки состояния породных и закладочных массивов при подземной разработке месторождений твердых полезных ископаемых. Для достижения поставленной цели экспериментально полученные данные сравниваются с данными расчетов. Задачей исследования является организация экспериментов по применению геофизических методов в условиях конкретного металлического месторождения.

Результаты

Изучение ослабленности массивов пород электрометрическим методом. Определение ослабленности массивов пород методом извлеченного керна предполагает керновое бурение, что не всегда возможно. Возможность изучения ослабленности массивов пород увеличивается применением геофизических методов электрометрических исследований в бескерновых разведочных скважинах, в ходе чего получены подтверждения целесообразности применения метода электрометрии

для изучения структуры и ослабленности массива пород.

Сопоставление данных о степени ослабленности по керну и электрометрическому каротажу было установлено наличие корреляционной связи между коэффициентом ослабления пород в массиве (K_0) и эффективным кажущимся сопротивлением горных пород (ρ_k). Существование такой связи может быть объяснено зависимостью обоих этих показателей от одной характеристики массива – трещиноватости пород.

Сопоставление значений K_0 и средних интегральных значений кажущегося сопротивления пород позволяет выразить зависимость между этими параметрами функцией вида:

$$K_0(\rho_k) = \{-2,148 \cdot 10^{-7} \rho_k^2 + 3,84 \cdot 10^{-4} + 0,7\}$$

для $0 < (\rho_k) < 1 \cdot 10^{-3} \text{ Ом} \cdot \text{м};$

$$K_0(\rho_k) = \{-1,545 \cdot 10^{-8} \rho_k^2 + 1,556 \cdot 10^{-4} + 1,114\}$$

для $1 \cdot 10^{-3} < (\rho_k) < 2,6 \cdot 10^{-3} \text{ Ом} \cdot \text{м}.$

Аппроксимация функции, заданной таблично, проводилась способом наименьших квадратов. Оценка найденной зависимости $K_0(\rho_k)$ дана с помощью корреляционного отношения, которое составляет не менее 0,94. Таким образом, данная связь является реальной и позволяет определить коэффициент ослабления пород в массиве по кажущемуся сопротивлению. Зависимость $K_0(\rho_k)$ приведена на рис. 1.

Для определения коэффициента ослабления по кажущемуся сопротивлению пород материалы электрометрического каротажа предварительно обрабатывали по существующим методикам. Результаты каротажа скважин гор. –155 м, –180 м, –202 м приведены на рис. 2–5.

Данные графиков (ρ_k) свидетельствуют о различии в трещиноватости пород. По ним возможно выделение интервалов скважин, различающихся значениями (ρ_k), а значит, определенной степенью трещиноватости пород и значением K_0 .

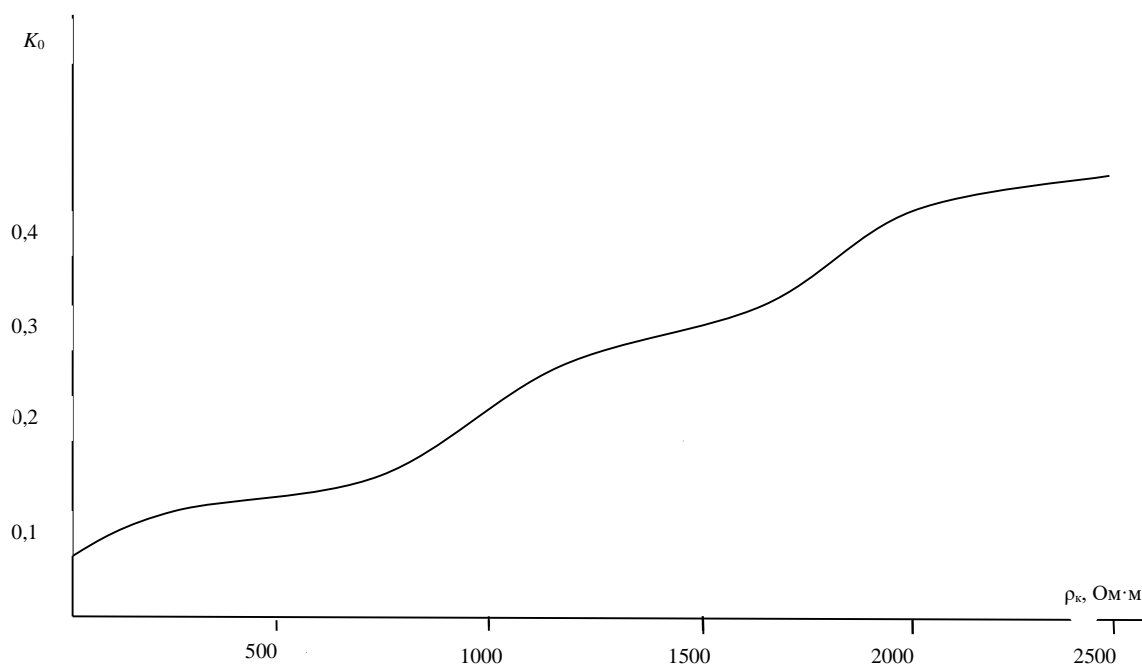


Рис. 1. График зависимости коэффициента ослабления пород в массиве (K_0) от кажущегося сопротивления (ρ_k)

Fig. 1. The dependence of coefficient of decreasing rock mass stability (K_0) on apparent resistivity (ρ_k)

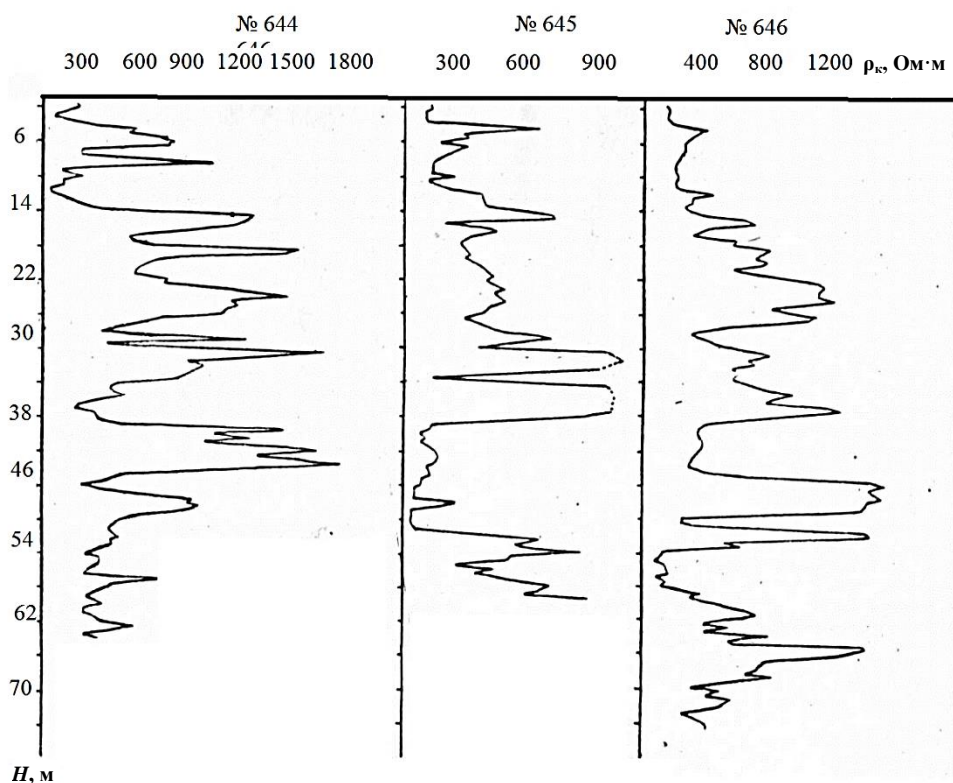


Рис. 2. Результаты электрометрического каротажа в скважинах 644...646

Fig. 2. Results of electrometric logging in boreholes 644 ... 646

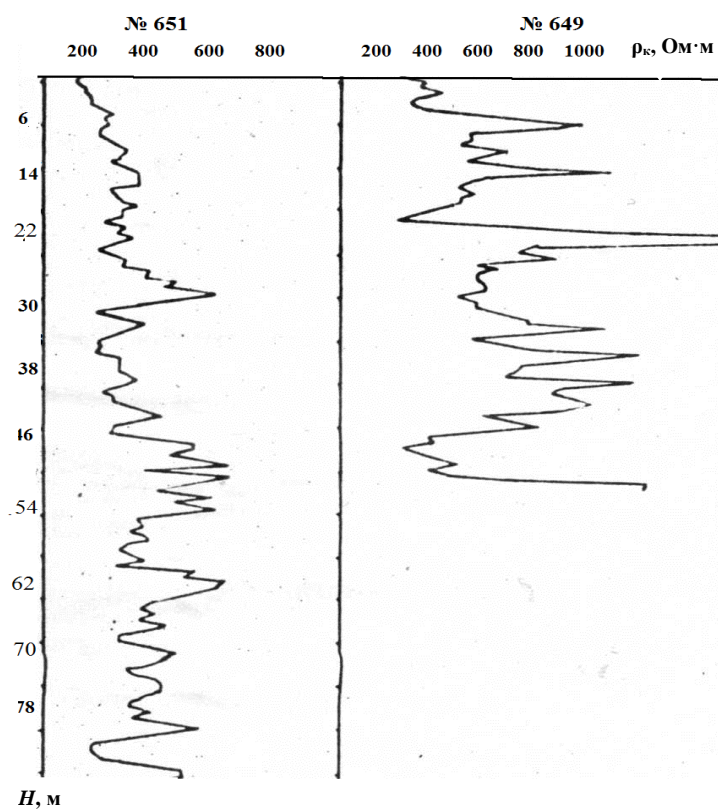


Рис. 3. Результаты электрометрического каротажа в скважинах 649 и 651

Fig. 3. Results of electrometric logging in boreholes 649 and 651

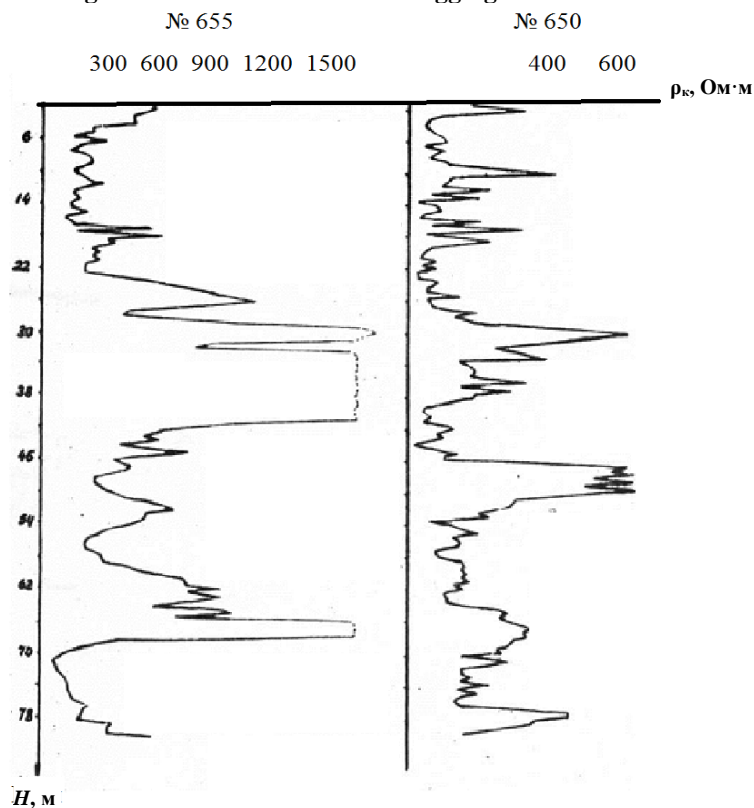


Рис. 4. Результаты электрометрического каротажа в скважинах 650 и 655

Fig. 4. Results of electrometric logging in boreholes 650 and 655

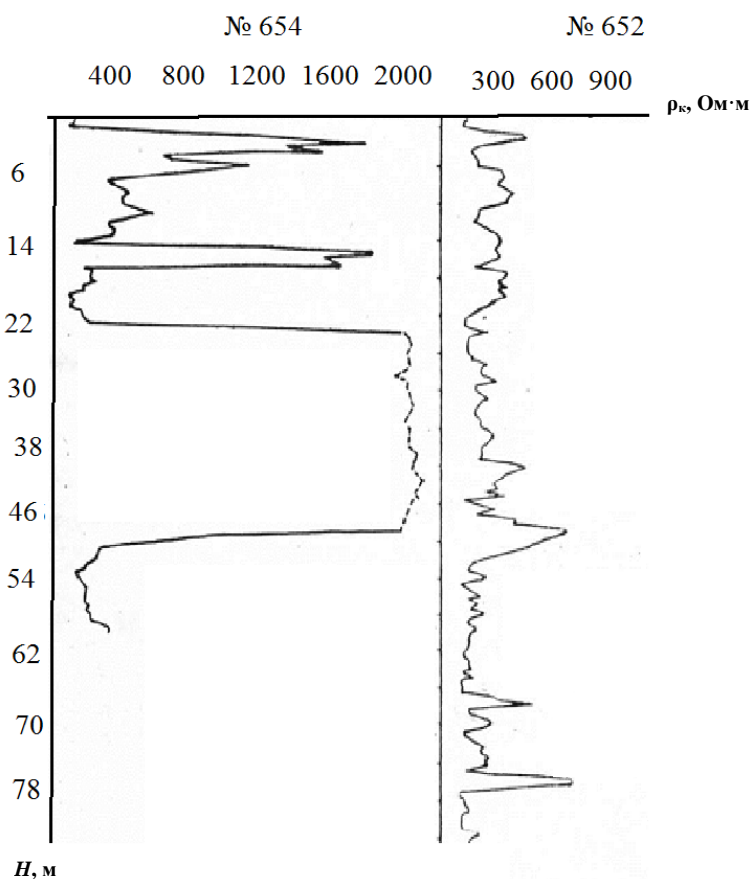


Рис. 5. Результаты электрометрического каротажа в скважинах 652 и 654

Fig. 5. Results of electrometric logging in boreholes 652 and 654

Так, интервалы 28...38, 43...53, 63...80 м скважины № 650 характеризуются низкопроводящими породами с невысокой степенью трещиноватости и более высоким значением K_0 . В скважине № 655 четко выделяется зона пород, имеющих сравнительно низкую проводимость (интервал 28–42 м).

Важно, что мощность этой зоны значительно превышает расстояние между парными электродами электрометрического зонда, в связи с чем значения уменьшаются. Кроме того, уменьшение значений кажущегося сопротивления на контакте разных по проводимости пород объясняется эффектом экранной аномалии, которая связана с переходом питающих электродов через контакт существенно различающихся по проводимости пород.

Анализ результатов электрометрического каротажа скважин позволил на основе

выявленной зависимости $K_0(\rho_k)$ дифференцировать массив по степени ослабленности пород (таблица).

Выявление зон неоднородностей в массиве пород геофизическими методами. На месторождениях руд развиты мощные линейные глинисто-щебнистые обводненные коры выветривания, глубина развития которых достигает 200...400 м от поверхности земли. При отработке таких месторождений актуален опережающий прогноз таких полостей.

Задача выявления зон тектонических нарушений, линейных зон выветривания, карстовых полостей, контактов различных литотипов пород в подземных условиях решается комплексом геофизических методов, в том числе акустическим, радиоволнового просвечивания, электрометрии.

Результаты электрометрического каротажа скважин

Results of electrometric borehole logging

Номера скважин								
644	645	646	649	651	652	654	650	655
Интервал глубин, м/коэффициент ослабления								
<u>1...9</u> 0,15	<u>1...27</u> 0,16	<u>1...14</u> 0,12	<u>1...15</u> 0,18	<u>1...8</u> 0,13	<u>1...42</u> 0,14	<u>1...17</u> 0,20	<u>1...28</u> 0,12	<u>1...23</u> 0,14
<u>9...14</u> 0,12	<u>27...38</u> 0,22	<u>15...39</u> 0,18	<u>1...35</u> 0,22	<u>...35</u> 0-16	<u>4...47</u> 0,18	<u>1...23</u> 0,19	<u>2...38</u> 0,20	<u>2...28</u> 0,22
<u>14...34</u> 0,21	<u>38...52</u> 0,09	<u>39...43</u> 0,16	<u>35...39</u> 0,16	<u>35...71</u> 0,18	<u>47...80</u> 0,13	<u>23...45</u> 0,40	<u>38...46</u> 0,12	<u>28...42</u> 0,40
<u>34...38</u> 0,16	<u>52...60</u> 0,19	<u>43...53</u> 0,26	<u>39...41</u> 0,23	<u>71...77</u> 0,14		<u>45...56</u> 0,18	<u>46...53</u> 0,24	<u>42...69</u> 0,20
<u>38...50</u> 0,22	–	<u>53...58</u> 0,13	–	<u>77...80</u> 0,16	–	–	<u>53...63</u> 0,13	<u>60...78</u> 0,14
<u>50...65</u> 0,18	–	<u>58...75</u> 0,18	–	–	–	–	<u>63...80</u> 0,19	

Сущность акустического метода заключается в измерении кинематических и динамических характеристик различных типов волн. Основные модификации этого метода: прозвучивание между скважинами, профилирование вдоль стенок выработок и акустический каротаж.

Метод радиоволнового просвечивания является лучевым. В одной скважине (выработке) устанавливается передатчик радиоволн, а в соседних скважинах (выработках) измеряется напряженность электромагнитного поля. Интерпретация результатов основана на повышении коэффициента поглощения радиоволн карстовыми полостями и зонами.

Метод электрометрии основан на выделении пород с различной электропроводностью. Особого внимания при этом заслуживают участки пониженного электрического сопротивления. Резким сменам значений электрического сопротивления могут соответствовать контакты пород с сильно различающимися свойствами. Существует множество модификаций этого метода, среди которых наиболее широкое применение имеют электрометрический каротаж и электропрофилирование по стенкам выработок. Исследования методом подземного электроразведывания (ПЭЗ) проведены на месторождении Северного Казахстана. В отличие от поверхностного зондирования, в шахтных условиях предоставляется возможность проводить ПЭЗ в двух модификациях:

– опережающее скважинное зондирование – разведка зон с различной проводимостью впереди забоя;

– зондирование по стенкам выработок для определения контакта двух сред, расположенных параллельно горной выработке или под углом не более 15°.

Скважинное электроразведывание. Наибольшие искажения ρ_k при опережающем электроразведывании имеют место в случае, когда питающий либо приемный электрод находятся как можно ближе к контакту разнородных пород. В этом случае целесообразно трехэлектродное градиент-зондирование, в котором из-за малой величины приемной линии помехи невелики. Вблизи забоя скважины оставляют неподвижным приемный диполь MN , а питающий электрод A с определенным шагом перемещают к устью скважины. Другой питающий электрод относят в бесконечность, т.е. чтобы его влияние меньше сказывалось на величину потенциала при различных поведениях градиент-установки. Такую установку называют «последовательная градиент-установка» AMN (по аналогии со скважинным электрокаротажем). Наиболее удачной эта установка является еще из-за того, что один лишь питающий электрод перемещается в процессе измерений, а три других остаются неподвижными, чем достигается высокая точ-

ность измерений, поскольку переходные сопротивления неподвижных электродов остаются постоянными. Для такой установки величина коэффициента K :

$$\rho_k = \Delta U / I$$

определяется из выражения

$$K = 4\pi \frac{AM \cdot AN}{MN}$$

где ΔU – разность потенциалов на приемных электродах MN ; I – ток питающих электродов AD ; AM , AN , MN – расстояния между питающими приемными электродами.

Интерпретация экспериментальных кривых зондирования последовательной градиент-установкой проводится с помощью теоретических кривых (палеток). Для этого интерпретируемая кривая строится на билогарифмическом бланке. По оси ординат откладывается (ρ_k), по оси абсцисс – AO , расстояние от питающего электрода до центра приемного диполя MN . Накладывая на палетку и добиваясь наилучшего совмещения экспериментальной кривой с теоретической, определяют количественные результаты проводимости пород и расстояние до контакта, ближайшего к выработке.

При электроразведке по стенкам выработок методика измерений отличается. Измерения выполняются симметричной четырехэлектродной градиент-установкой $AMNB$. Величина остается постоянной (0,5 м), а расстояние между питающими электродами (разносы) постепенно увеличиваются с геометрической прогрессией 1,3. Зная разность потенциала на MN и силу тока I в AB ρ_k рассчитывают из выражения

$$\rho_k = \Delta U / I,$$

где K определяется по формуле

$$K = \pi \frac{(AB^2 / 2)^2 - (MN / 2)^2}{MN} C.$$

Входящий в формулу поправочный множитель C учитывает влияние выработки. Его величина определяется по ВНИМИ. Интер-

претация кривых симметричного электроразведки проводится аналогично описанной выше.

Симметричное последовательное электроразведывание проводилось по стенкам ортов, а скважинное опережающее зондирование – по скважине № 90. Скважинным зондированием определяли расстояние до контакта известняков, которые отличаются по проводимости от вмещающих их алевролитов и порфиритов на порядок. От контакта известняков на различном расстоянии ставились трехэлектродные зонды последовательной и обращенной установки. Полученные кривые интерпретировались с помощью специальных палеток. Однако экспериментальные кривые лишь частично совмещались с теоретическими. Соответственно линия глубин на палетке в большинстве случаев не соответствовала истинному расстоянию до контакта известняков. Для соответствия экспериментальных и теоретических кривых в формулы теоретических кривых необходимо вводить коэффициенты, учитывающие влияние горных выработок, углы наклона и простирания контактов.

По результатам электроразведки вдоль стенок выработок проводился качественный анализ наблюдаемых кривых (ρ_k), позволивший выделить геоэлектрические зоны, соответствующие контакту высокопроводящего массива из затвердевшей бетонной смеси. Подъем правой ветви кривой объясняется тем, что с увеличением разносов питающих линий на геоэлектрическое поле существенно влияют низкопроводящие зоны известняков.

В целом данные электроразведки совпадают с результатами маркшейдерских данных в контурах камер, заполненных твердеющей закладкой.

Результаты исследований по существу рассматриваемой проблемы могут быть использованы при решении проблем охраны окружающей среды от агрессивного воздействия горного производства [20...24].

Использование технологий дифференцированного назначения параметров добычи руд при соответствующих условиях формирует эколого-экономический эффект [25...27].

Выводы

Экспериментально обоснована возможность производить оценку ослабленности пород электрометрическим каротажем скважин, а электрозондированием вдоль стенок выработок – опережающее оконтуривание зон неоднородностей в массивах месторождений.

На основании проведенных опытных работ по выявлению структурных границ в массиве электрозондированием вдоль стенок выработок метод можно рекомендовать для практического использования.

Результаты же скважинного электрозондирования не позволяют судить об эффективности этого метода, поскольку экспериментальные кривые имеют недостаточную сходимость с теоретическими расчетами.

Библиографический список

1. Goodarzi A., Oraee-Mirzamani N. Assessment of the Dynamic Loads Effect on Underground Mines Supports. In: *30th International Conference on Ground Control in Mining*. 2011. P. 74–79.
2. Woodward K., Wesseloo J. Observed spatial and temporal behaviour of seismic rock mass response to blasting. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. 2015;115(11):1044–1056.
3. Голик В. И., Савелков В. И., Гашимова З. А., Келехсаев В. Б. Модели взаимодействия природных и технических систем на основе геомеханической сбалансированности при добыче руд. *Вектор ГеоНаук*. 2018;(1(2)):21–28.
4. Голик В., Комашченко В., Моркун В., Ирина Г. Повышение эффективности взрывного разрушения на руднике новых методов инициирования скважинных зарядов в карьерах. *Металлургическая и горнодобывающая промышленность*. 2015;7(7):383–387.
5. Cardu M., Seccatore J., Vaudagna A., Rezende A., Galvão F., Bettencourt J. S., Tomi de G. *Evidences of the influence of the detonation sequence in rock fragmentation by blasting*. Part I. REM: Revista Escola de Minas. 2015;68(3):337–342.
6. Khani A., Baghbanan A., Norouzi S., Hashemolhosseini H. Effects of fracture geometry and stress on the strength of a fractured rock mass. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*. 2013;(60):345–352.
7. Kidybinski A. The role of geo-mechanical modelling in solving problems of safety and effectiveness of mining production. *Archives of Mining Sciences*. 2010;55(2):263–278.
8. Najafi A. B., Saeedi G. R., Farsangi M. A. E. Risk analysis and prediction of out-of-seam dilution in longwall mining. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2014;70:115–122.
9. Oraee-Mirzamani K., Ping Y. J., Zhong C. W., Sen Y. D., Qiang Y. J. Numerical determination of strength and deformability of fractured rock mass by FEM modeling. *Computers and Geotechnics*. 2015;64:20–31.
10. Golik V., Komashchenko V., Morkun V., Irina G. Improving the effectiveness of explosive breaking on the bade of new methods of borehole charges initiation in quarries. *Metallurgical and Mining Industry*. 2015;7(7):383–387.
11. Молев М. Д., Страданченко С. Г., Масленников С. А. Теоретическое и экспериментальное обоснование построения региональных систем мониторинга безопасности техносферы. *Журнал инженерных и прикладных наук АРПН*. 2015;10(16):6787–6792.
12. Golik V., Komashchenko V., Morkun V., Zaalishvili V. Enhancement of lost ore production efficiency by usage of canopies. *Metallurgical and Mining Industry*. 2015;7(4):325–329.
13. Molev M. D., Stradanchenko S. G., Maslennikov S. A. Theoretical and experimental substantiation of construction regional security monitoring systems technospheric. *ARPJ Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2015;10(16):6787–6792.
14. Голик В. И., Савелков В. И., Гашимова З. А., Келехсаев В. Б. К мониторингу состояния массива пород при освоении недр в течение неопределенно долгого периода времени. *Вектор ГеоНаук*. 2018;(1(2)):48–60.
15. Семенова И. Э., Аветисян И. М., Земцовский А. В. Геомеханическое обоснование отработки запасов глубокого горизонта в сложных горно-геологических и геодинамических условиях. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2018;(12):65–73.
16. Куранов А. Д. Методика прогнозирования напряженно-деформированного состояния горного массива при комбинированной разработке Коашвинского месторождения. *Горный журнал*. 2015;(1):67–71.

17. Заалишвили В. Б., Бурдзиева О. Г., Закс Т. В., Кануков А. С. Информационный мониторинг распределённых физических полей в пределах урбанизированной территории. *Геология и геофизика Юга России*. 2013;(4):8-16.
18. Плешко М., Панкратенко А., Ревякин А., Щекина Е., Холодова С. Новые технологии подземных сооружений в условиях сдержанных городских условий. In: *E3S Web of Conferences*. 2018;33:02036. DOI: 10.1051/e3sconf/20183302036.
19. Дмитрак Ю. В., Логачева В. М., Подколзин А. А. Геофизическое прогнозирование нарушенности и обводненности массива горных пород. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2006;(11):35–36.
20. Качурин Н. М., Стась Г. В., Корчагина Т. В., Змеев М. В. Геомеханические и аэрогазодинамические последствия подработки территорий горных отводов шахт Восточного Донбасса. *Известия Тул. гос. ун-та. Сер. «Науки о Земле»*. 2017;(1):170–182.
21. Качурин Н. М., Стась Г. В., Калаева С. З., Корчагина Т. В. Геоэкологическая оценка эффективности защиты окружающей среды и природо-охранительных мероприятий при подземной добыче угля. *Известия Тульского государственного университета. Сер. Науки о Земле*. 2016;(3):62-79.
22. Дмитрак Ю. В., Логачева В. М., Подколзин А. А. Геофизическое прогнозирование нарушенности и обводненности массива горных пород. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2006;(11):35–36.
23. Заалишвили В. Б., Бурдзиева О. Г., Закс Т. В., Кануков А. С. Информационный мониторинг распределённых физических полей в пределах урбанизированной территории. *Геология и геофизика Юга России*. 2013;(4):8–16.
24. Комащенко В. И., Васильев П. В., Масленников С. А. Технологиям подземной разработки месторождений КМА – надёжную сырьевую основу. *Известия Тул. гос. ун-та. Сер. «Науки о Земле»*. 2016;(2):101-114.
25. Snelling P. E., Godin L., McKinnon S. D. The role of geologic structure and stress in triggering remote seismicity in Creighton Mine, Sudbury, Canada. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*. 2013;58:166–179.
26. Каплунов Д. Р., Рыльникова М. В., Радченко Д. Н. Расширение сырьевой базы горнорудных предприятий на основе комплексного использования минеральных ресурсов месторождений. *Горный журнал*. 2013;(12):29–33.
27. Грязев М. В., Качурин Н. М., Захаров Е. И. Тульский государственный университет: 85 лет на службе отечеству. *Горный журнал*. 2016;(2):25–29.

References

1. Goodarzi A., Oraee-Mirzamani N. Assessment of the Dynamic Loads Effect on Underground Mines Supports. In: *30th International Conference on Ground Control in Mining*. 2011. P. 74–79.
2. Woodward K., Wesseloo J. Observed spatial and temporal behaviour of seismic rock mass response to blasting. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. 2015;115(11):1044–1056.
3. Golik V.I., Savelkov V.I., Gashimova Z.A., Kelekhsaev V.B. Models of natural and technical systems interaction based on geotechnical sustainability in ore mining. *Vector of Geosciences*. 2018;(1(2)):21–28. (In Russ.).
4. Golik V., Komashchenko V., Morkun V., Irina G. Increasing effectiveness of explosive rock breakage at mines using new methods for initiating blasthole charges in open pits. *Metallurgical and Mining Industry*. 2015;7(7):383–387. (In Russ.).
5. Cardu M., Seccatore J., Vaudagna A., Rezende A., Galvão F., Bettencourt J. S., Tomi de G. *Evidences of the influence of the detonation sequence in rock fragmentation by blasting*. Part I. REM: Revista Escola de Minas. 2015;68(3):337–342.
6. Khani A., Baghbanan A., Norouzi S., Hashemolhosseini H. Effects of fracture geometry and stress on the strength of a fractured rock mass. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*. 2013;(60):345–352.
7. Kidybinski A. The role of geo-mechanical modelling in solving problems of safety and effectiveness of mining production. *Archives of Mining Sciences*. 2010;55(2):263–278.
8. Najafi A. B., Saeedi G. R., Farsangi M. A. E. Risk analysis and prediction of out-of-seam dilution in longwall mining. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2014;70:115–122.
9. Oraee-Mirzamani K., Ping Y. J., Zhong C. W., Sen Y. D., Qiang Y. J. Numerical determination of strength and deformability of fractured rock mass by FEM modeling. *Computers and Geotechnics*. 2015;64:20–31.
10. Golik V., Komashchenko V., Morkun V., Irina G. Improving the effectiveness of explosive breaking on the bade of new methods of borehole charges initiation in quarries. *Metallurgical and Mining Industry*. 2015;7(7):383–387. (In Russ.).
11. Molev M. D., Stradanchenko S. G., Maslennikov S. A. Theoretical and experimental substantiation for creating regional systems for technosphere safety monitoring. *Journal of Engineering and Applied Sciences of Russian Academy of Technologies*. 2015;10(16):6787–6792. (In Russ.).

12. Golik V., Komashchenko V., Morkun V., Zaalishvili V. Enhancement of lost ore production efficiency by usage of canopies. *Metallurgical and Mining Industry*. 2015;7(4):325–329. (In Russ.).
13. Molev M. D., Stradanchenko S. G., Maslennikov S. A. Theoretical and experimental substantiation of construction regional security monitoring systems technospheric. *ARN Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2015;10(16):6787–6792. (In Russ.).
14. Golik V. I., Savelkov V. I. Gashimova Z. A., Kelekhsaev V. B. On monitoring of rock mass conditions during subsoil use for indefinite period of time. *Vector of Geosciences*. 2018;(1(2)):48–60. (in Russ.).
15. Semenova I. E., Avetisyan I. M., Zemtsovsky A. V. Geotechnical substantiation of extraction of deep level reserves under complicated mining, geological and geodynamic conditions. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2018;(12):65–73. (in Russ.).
16. Kuranov A. D. Technique for predicting rock mass stress-strain state during combined mining of the Koshvinskoye deposit. *Mining Journal*. 2015;(1):67–71. (In Russ.).
17. Zaalishvili V. B., Burdzieva O. G., Zaks T. V., Kanukov A. S. Informational monitoring of distributed physical fields within an urbanized area. *Geology and Geophysics of the South of Russia*. 2013;(4):8–16. (In Russ.).
18. Pleshko M., Pankratenko A., Revyakin A., Schekina E., Kholodova S. New technologies for underground structures in restrained urban conditions. In: *E3S Web of Conferences*. 2018;33:02036. DOI: 10.1051/e3sconf/20183302036. (In Russ.).
19. Dmitrak Yu. V., Logacheva V. M., Podkolzin A. A. Geophysical prediction of broken condition and watering of rock mass. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2006;(11):35–36. (In Russ.).
20. Kachurin N. M., Stas G. V., Korchagina T. V., Zmeev M. V. Geotechnical and gas dynamic consequences of undermining of mining lease areas for Eastern Donbass mines. *Proceedings of Tula State University. Series "Earth Sciences"*. 2017;(1):170–182. (In Russ.).
21. Kachurin N. M., Stas G. V., Kalayeva S. Z., Korchagina T. V. Geocological assessment of environmental protection effectiveness and environmental protection measures in the process of underground coal mining. *Proceedings of Tula State University. Series "Earth Sciences"*. 2016;(3):62–79. (In Russ.).
22. Dmitrak Yu. V., Logacheva V. M., Podkolzin A. A. Geophysical prediction of broken condition and watering of rock mass. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2006;(11):35–36. (In Russ.).
23. Zaalishvili V. B., Burdzieva O. G., Zaks T. V., Kanukov A. S. Informational monitoring of distributed physical fields within an urbanized area. *Geology and Geophysics of the South of Russia*. 2013;(4):8–16. (In Russ.).
24. Komashchenko V. I., Vasiliev P. V., Maslennikov S. A. Reliable raw material base for KMA deposit underground mining. *Proceedings of Tula State University, Series "Earth Sciences"*. 2016;(2):101–114. (in Russ.).
25. Snelling P. E., Godin L., McKinnon S. D. The role of geologic structure and stress in triggering remote seismicity in Creighton Mine, Sudbury, Canada. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*. 2013;58:166–179.
26. Kaplunov D. R., Rylnikova M. V., Radchenko D. N. Expansion of resources base of mining enterprises based on multiple use of deposit mineral resources. *Mining Journal*. 2013;(12):29–33. (In Russ.).
27. Gryazev M. V., Kachurin N. M., Zakharov E. I. Tula State University: 85 years in the service of the motherland. *Mining Journal*. 2016;(2):25–29. (In Russ.).