

ГЕОФИЗИЧЕСКОЕ ОБСЛЕДОВАНИЕ УЧАСТКОВ АСБЕСТОВОГО КАРЬЕРА

П. И. Зуев¹, Д. В. Григорьев¹, А. С. Ведерников¹

¹ Институт горного дела Уральского отделения Российской академии наук,
Екатеринбург, Россия

Аннотация: Представлено описание применения геофизических методов для получения данных о физических свойствах горных пород, слагающих борта карьера, с целью технологической оптимизации проводимых буровзрывных работ. Рассмотрено применение геофизических методов (электротомографии в двумерном и трехмерном варианте, площадной электроразведки и сейсморазведки). Получение данных основано на полевых измерениях значений естественного электрического сопротивления пород, слагающих изучаемый массив; значений вызванной поляризации пород, эквивалентных частотной дисперсии их проводимости; скоростей продольной и поперечной сейсмических волн, распространяющихся в массиве. Далее осуществлена обработка и интерпретация полученных значений методами цифровой фильтрации и компьютерного моделирования. Расчётными способами определяется крепость пород на месторождении хризотил-асбеста, разрабатываемом открытым способом. Для обработки и интерпретации полученных значений использованы современные методы и алгоритмы цифровой обработки, широко используемые в мире. Получение физических свойств основано на сопоставлении априорных геологических данных со значениями удельного электрического сопротивления и скоростей прохождения упругих волн в массиве, на основе чего производится расчет значений модуля Юнга, характеризующего крепость слагающих массив пород.

Ключевые слова: геофизические исследования, инженерная геофизика, 3D-электротомография, электротомография, электроразведка методом сопротивлений и ВП, сейсморазведка МПВ, сейсмотомография, асбест, карьер, БВР.

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

Для цитирования: Зуев П. И., Григорьев Д. В., Ведерников А. С. Геофизическое обследование участков асбестового карьера // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2021. – № 5–1. – С. 131–141. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_51_0_131.

Geophysical survey of asbestos pit wall

P. I. Zuev¹, D. V. Grigoriev¹, A. S. Vedernikov¹

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

Abstract: The article describes the use of geophysical methods to obtain the data on physical properties of rocks in pit wall rock mass toward technological optimization of drilling and blasting operations. The case-study of 2D and 3D electrical resistivity tomography, areal electrical geophysics and seismic exploration is presented. The data are obtained from field

measurements of the natural electrical resistances in pit wall rock mass, induced polarizations equivalent to the frequency dispersion of rock conductivity as well as P-wave and S-wave velocities. Then, the obtained values are processed and interpreted using digital filtering and computer modeling. The strength of rock mass enclosing open pit chrysotile asbestos mine is calculated. The modern digital methods and algorithms commonly used worldwide are chosen for processing and interpretation of the obtained values. The physical properties of rocks are estimated from the comparison of a priori geological data with the values of the specific electrical resistance and elastic wave velocities. On this basis, The Young modulus values are calculated, which characterize the pit wall rock mass strength.

Key words: geophysical survey, engineering geophysics, 3D electrical resistivity tomography, 2D electrical resistivity tomography, electrical geophysics, induced polarization, seismic exploration, seismic refraction method, seismic tomography, asbestos, open pit mine, drilling and blasting.

Acknowledgements: The study was carried out under State Contract No. 075-00581-19-00, Topic No. 0405-2019-0007.

For citation: 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. [InRuss]. DOI:10.25018/0236_1493_2021_51_0_131.

Введение

При ведении буровзрывных работ на карьерах всегда следует ставить вопрос об оптимизации данного процесса, чтобы избежать возникновения кусков породной массы некондиционных размеров. Различными исследователями предлагаются многообразные способы оптимизации параметров буровзрывных работ (БВР) — корректировка по результатам предыдущих взрываний [Абдулкасимов, 2006], регулирование геометрии бурения и порядка взрывания скважин [Шубин, Хон и др., 2007], дополнительное обустройство зарядов в скважинах [Румянцев, 2013] и др. Однако при этом многие авторы не учитывают локальное состояние горного массива. При соблюдении постоянства в процессе бурения и зарядания сетки скважин на выход негабаритов в первую очередь влияет степень нарушенности массива. Самый достоверный способ определения состояния массива — конечно, отбор керна, но такая процедура при регулярном производстве взрывных работ нерациональна вследствие значительных замедления и удорожания

работ. Иногда состояние массива возможно определять по обратной связи в процессе бурения [Жариков, 2019], но такая методика не позволяет получать информацию заблаговременно. Наиболее оптимальным, на наш взгляд, является предварительное изучение массива пород при помощи геофизических методов. Их точность обычно достаточна при решении озвученной проблемы, а оперативность обеспечивается в том числе заблаговременным проведением исследований [1].

В данной статье описывается опыт применения методики получения физических параметров горного массива (коэффициента Пуассона, модуля Юнга и др.) из результатов геофизических исследований. Идея исследования заключается в опробовании нескольких геофизических методов для определения структурно-тектонических и прочностных свойств прибортового массива карьера и выборе наиболее информативного и производительного оборудования для диагностики блоков массива, подготавливаемых к взрыванию при планировании буровзрывных работ. В основе геофизических мето-

дов лежит выделение участков с резко различающимися физическими полями и структурными нарушениями [2].

Постановка задачи

Исследования были проведены на месторождении асбеста, разрабатываемом открытым способом. Месторождение находится в республике Казахстан в районе города Житикара (ранее Джетыгара), открыто в 1916 г., разрабатывается с 1961 г. Является единственным месторождением асбеста в Казахстане.

Хризотил-асбест, или «белый асбест», причисляется к группе природных минералов, носящих коммерческое название «асбест». Он является частью серпентиновой группы и структурно относится к слоистым силикатам. Хризотил-асбест представляет собой гидросиликат магния, встречающийся в природе в виде кристалла, состоящего из полых трубочек-фибрилл диаметром 20—30 нм и длиной до 2—3 см. Минерал способен расщепляться на тончайшие хризотилевые волокна толщиной до 0,5 мкм. Хризотил-асбест обладает обширным комплексом свойств, что диктует его широкую сферу применения. Хризотилевая отрасль производит более 3000 наименований различных промышленных товаров [3].

Специфика Джетыгаринского месторождения и одноименного карьера по его разработке с позиций геомеханических проблем определяется, в первую очередь, расположением месторождения в пределах глубинного регионального разлома. Массив ультраосновных пород, включающий асбестоносные поля, вытянут в пределах разлома в меридиональном направлении приблизительно на 20 км, ширина его доходит до 6 км. Интрузиями гранитоидов массив разделен на южную, центральную и северную части. Высо-

кая геодинамическая активность, обусловленная залеганием месторождения в тектонически насыщенном районе, сопутствует изменчивости напряженно-деформированного состояния массива. В таких условиях обеспечение устойчивости бортов карьеров, особенно при стремлении к оптимальным параметрам рудоподготовительных взрывных работ, создает некоторые сложности [4].

Одной из проблем при ведении БВР является выход негабаритов, переизмельчение руды, выход бортов на проектный контур. Ситуацию осложняет присутствие в разрезе даек родингитов, наличие которых не учитывается при планировании БВР, что выливается в негабариты, а значит, и увеличение трудозатрат, что, в свою очередь, сказывается на производстве.

Предварительно были проанализированы результаты более ранних исследований. Из них было отмечено, что по физико-механическим свойствам массив пород Джетыгаринского месторождения является в значительной степени разнородным. Вследствие этого борта карьера имеют многочисленные участки разуплотнения с повышенной трещиноватостью пород, зонами расланцевания и пр. В большинстве случаев данные структурные неоднородности обусловлены тектоническими нарушениями. Горнодобывающая отрасль этого региона северного Казахстана всегда сотрудничала и продолжает сотрудничать с промышленными предприятиями и научными организациями Урала. В рамках устоявшегося сотрудничества с Институтом горного дела УрО РАН лабораторией технологий снижения риска катастроф при недропользовании была проведена экспериментальная работа с целью подбора методики исследования крепости пород месторождения, разрабаты-

ваемого открытым способом, для обеспечения рационального ведения БВР.

Задачей исследований являлась разработка методики геофизических исследований, которые бы позволяли предоставлять дополнительную геолого-геофизическую информацию для учета при планировании БВР с целью уменьшения выхода негабаритов, зон переизмельчения руды.

После проведения геолого-геофизического моделирования по априорным данным и изучения условий карьерного пространства было предложено опробовать в полевых условиях методы электроразведки и сейсморазведки, а именно электроразведку методами сопротивлений и вызванной поляризации (ВП) по методике электротомографии [5], а также сейсмотомографию по данным метода преломленных волн.

Методы исследования

Работы по методике электротомографии представляют вариант многоэлектродной электроразведки. В двумерном, т. е. в варианте профилирования, данная методика позволяет в конечном итоге восстановить разрезы распределения удельного электрического сопротивления и значений вызванной поляризации исследуемой среды. В трехмерном варианте применение методики электротомографии позволяет восстановить объемное распределение удельного электрического сопротивления и значений вызванной поляризации [6].

Первым этапом стала проверка использования электротомографии в двумерном варианте. Для получения качественных измерений необходимо, чтобы значения гальванических заземлений электродов составляли менее 5 кОм [7]. В условиях асбестового карьера оказалось достаточно просто получить требуемые параметры зазем-

лений, исключениями являются лишь редкие места размещения электродов непосредственно на родингитах. Примеры получаемого полевого материала на опытном профиле, пересекающем дайку родингитов, представлены на рис. 1.

При пропускании электрического тока через заземленные электроды возникает электрическое поле, которое зависит от распределения удельного электрического сопротивления горных пород в некоторой области вблизи установки [8]. Измерения производят с помощью питающих и измерительных электродов. В случаях, когда предполагаются геоэлектрические разрезы, в значительной мере отличающиеся от простой горизонтально-слоистой модели, рекомендуется в обязательном порядке использовать методику электротомографии — это повышает надежность получаемой в результате интерпретации информации. Сложное строение горного массива зачастую характерно для рудных зон и зон тектонических нарушений, оползней, насыпных и искусственных грунтов в зонах городской застройки, многолетнемерзлых пород и при наличии карста. Интерпретацию данных электротомографии проводят в рамках двумерных и трехмерных моделей. Качество интерпретации напрямую зависит от количества и плотности точек измерений на исследуемом участке. Обычно их число достигает первых тысяч при длинах профилей порядка 100–200 м.

В нашем случае по результатам измерений строилась двумерная модель [9], так как расстояние между профилями не превышало 5 метров и не было необходимости в создании трехмерной модели. Работа выполнялась с помощью электротомографического комплекса, состоящего из электроразведочного оборудования, предна-

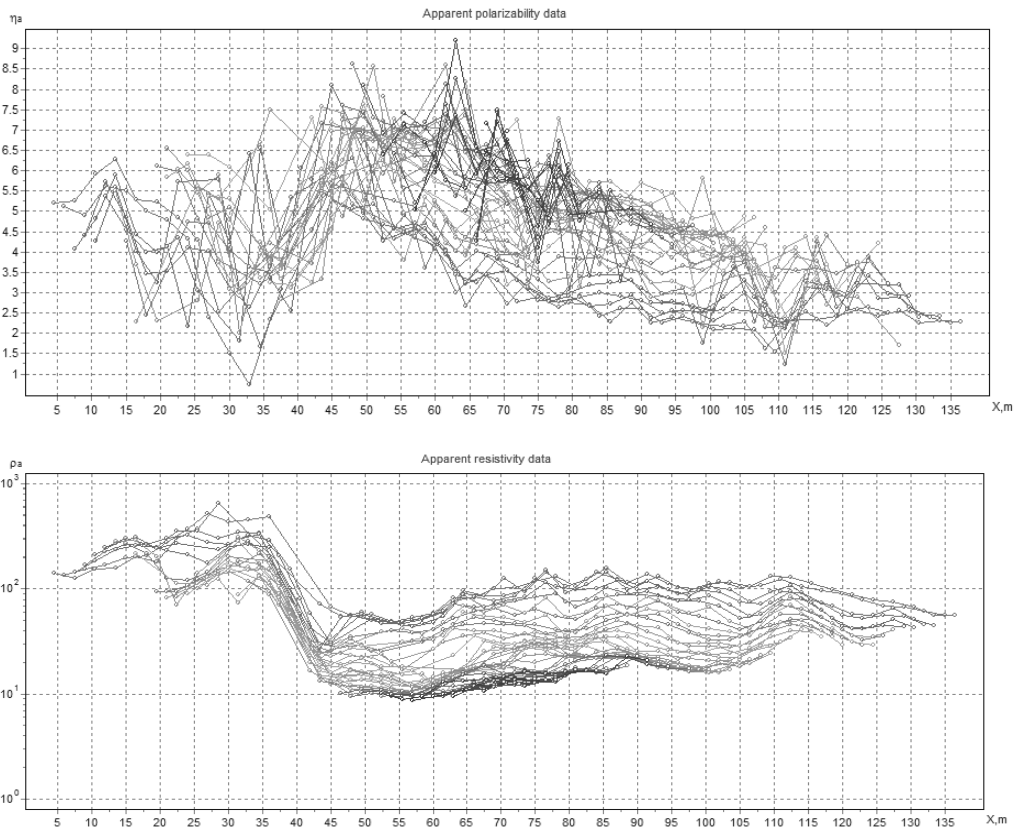


Рис. 1. Примеры получаемого полевого материала на опытном профиле. Сверху значения кажущейся поляризуемости на различных разносах, снизу значения кажущегося удельного электрического сопротивления на различных разносах
Fig. 1. Examples of the obtained field material on the experimental profile line. The values of the apparent polarizability at various spacing at the top, the values of the apparent electrical resistance at different spacing at the bottom

значенного для работ со стандартной четырехэлектродной установкой: генератора ВП-1000, измерителя SGD-EET MEDUSA, соединенных с помощью коммутатора CommDD2 – 64 с комплектом кос и электродов.

Каждый профиль состоял из 1–2 расстановок, по 32–64 электрода каждая. Шаг между электродами выбирался от 3 до 5 м, соответственно, полная длина одной расстановки составляла до 155 м. От первого до последнего электрода расстановка соединена кабелем – косой. Измерения выполнялись

в полуавтоматическом режиме согласно заранее загруженным в коммутирующую аппаратуру протоколам, в которых описывается порядок подключения питающих и измерительных электродов на электрометрической косе. В зависимости от взаимного расположения приёмных и питающих электродов различают электроразведочные установки. В данной работе были использованы дипольная осевая установка и установка Шлюмберже. Установка Шлюмберже показывает более устойчивые результаты при сложных приповерх-

ностных условиях для гальванических заземлений. Установка дипольная осевая позволяет обеспечить большую глубинность исследований относительно установки Шлюмберже при равной длине расстановки, но при этом не требует организации бесконечности, как, например, трехэлектродная установка. В условиях карьера организовать вынос в бесконечность — практически невыполнимая задача.

Для обработки результатов измерений в программе двумерной инверсии данных электротомографии и последующего построения разрезов УЭС и ВП применялся следующий стандартный алгоритм. Предварительно оценивалось качество заземлений электродов. Некорректные единичные результаты измерений удалялись из дальнейшей обработки. Была применена инверсия с фокусирующим коэффициентом, установлен коэффициент влияния топографии для учета рельефа. На примере двумерной инверсии данных измерений по опытному профилю можно отметить уверенное выделение дайки родингитов, а также некоторое изменение состава серпентинитов (рис. 2). Кроме того, заметно влияние на измерения дайки родингитов в центральной части профиля. При расчетах индекса DOI (depth of investigation index, индекс глубины исследования; рассчитывается как показатель достоверности результатов инверсии) получено, что результаты проведенной инверсии также надежны.

Для надежной интерпретации данных электротомографии использовались априорные данные, предоставленные геологической службой предприятия: геологическое описание участков с указанием горных пород, их трещиноватости, сланцеватости, ожелезненности, рудоносности, данные о крепости пород и выходов воды. В результате двумерной инверсии дан-

ных электротомографии [10] было восстановлено распределение значений удельного электрического сопротивления и вызванной поляризации (рис. 2). В большинстве случаев каждая горная порода в пределах исследуемого участка обладает своим характерным диапазоном значений удельного электрического сопротивления и ВП, соответственно этому определялся геологический состав борта и крепость вмещающих его пород. Разрезы УЭС и ВП, полученные по методике электротомографии, хорошо соотносятся с геологическими данными.

Вторым методом, опробованным на исследуемом участке, был метод сейсморазведки на преломленных волнах (МПВ) [11]. Здесь проявляется схожесть с первым методом — так же по профилю расстановивались сейсмоприемники, соединённые косой. Осуществлялась регистрация упругих волн, преломляющихся в слоях земной коры. Начало сейсмических колебаний задавалось на поверхности борта карьера. В качестве средства возбуждения волн использовались импульсные источники — как более традиционная кувалда с весом рабочей части порядка 6 кг, так и используемый в некоторых случаях цилиндрический металлический груз массой около 80 кг. Замерялись времена прохождения продольных и поперечных волн через исследуемый массив. В результате вычислений скоростей волн и их интерпретации были построены сейсмические разрезы. Аналогичным образом при наличии априорной информации соотносились полученные скорости в разрезе с имеющимися горными породами.

Измерения проводились по методике встречных и нагоняющих годографов. Использовалась 24-канальная сейсмостанция. Шаг между сейсмоприемниками составлял 2 м, длина одной

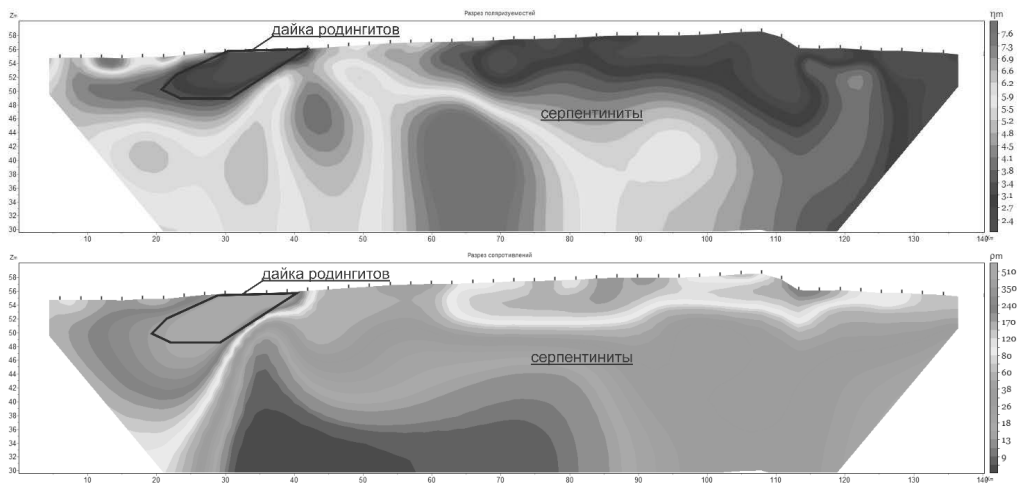


Рис. 2. Примеры результатов двумерной инверсии на опытном профиле. Сверху разрез полярности, снизу разрез удельного электрического сопротивления

Fig. 2. Examples of two-dimensional inversion results on an experimental profile line. Polarizability section at the top, resistivity section at the bottom

расстановки составляла 46 м. На каждой расстановке было 9 пунктов возбуждения (5 внутри косы, 4 выносных), максимальное удаление ПВ-ПП составило 64,4 м. Измерения выполнялись вертикальными сейсмоприемниками. На удаленных точках ПВ производилось накопление измерений с целью повышения соотношения сигнал/шум для обеспечения приемлемого качества полевого материала [12]. Обработка заключалась в загрузке результатов измерений по каждой расстановке с присвоением геометрии и топографии. Производилась предварительная фильтрация и поканальное усиление. Затем выполнялась пикировка первых вступлений преломленной продольной и поперечной волн [13]. Строилась предварительная скоростная модель, по которой производилась инверсия по методике сейсмотомографии с восстановлением сглаженного градиентного распределения значений распространения продольной и поперечных волн по разрезу [14].

Далее с использованием значения скоростей по всем точкам скоростного

разреза рассчитывался коэффициент Пуассона по известной формуле:

$$\mu = \frac{0,5 - R^2}{1 - R^2},$$

где R — отношение скорости поперечной волны C_n к скорости продольной волны C_{np} .

Полученный коэффициент Пуассона — это показатель деформируемости грунта, характеризующий отношение поперечных и продольных деформаций грунта, он необходим для расчёта динамического модуля Юнга.

Для каждой точки разреза по априорным данным и исходя из полученных при полевых наблюдениях электрического сопротивления и скоростей упругих волн определялась плотность пород. Используемый метод сейсморазведки на преломленных волнах в силу своих особенностей неполностью отражает резкие изменения свойств пород в массиве, поэтому приоритет был отдан электроразведке по методике электротомографии. По известной формуле далее рассчитывался модуль Юнга:

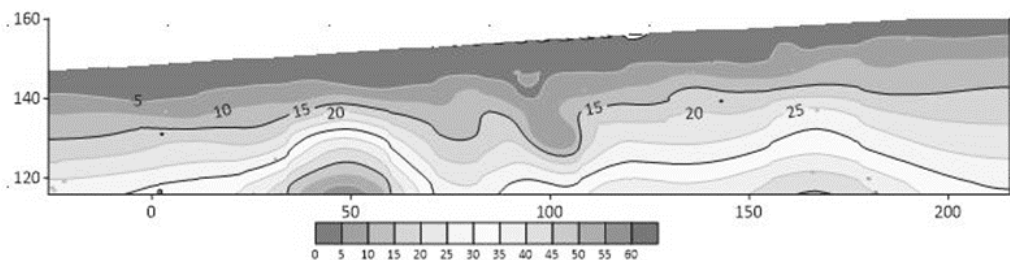


Рис. 3. Пример разреза с распределением значений модуля упругости Юнга (МПа) в исследуемом массиве, отображено в градиенте
 Fig. 3. An example of a section with the distribution of Young's modulus values (MPa) in the investigated massif, shown in the gradient

$$E_d = c_{np}^2 \rho \frac{(1-\mu)(1-2\mu)}{(1-\mu)},$$

где μ — коэффициент Пуассона, ρ — плотность породы, c_{np} — скорость продольной волны.

По результатам этих расчетов были построены двумерные разрезы с распределением значений модуля упругости Юнга в массиве, этот показатель соотносился со значениями крепости пород, и был получен искомый результат (рис. 3). Далее информация с данных разрезов передавалась специалистам для подготовки изменений в БВР для конкретных участков.

Результаты и обсуждение

По результатам исследований возможностей электротомографии на асбестовом карьере можно сказать, что применение электротомографии позволяет структурировать серпентиниты, определить положение даек родингитов. Результаты электротомографии можно использовать для корректировки проектов БВР. Стоит отметить успешное комплексное использование геофизических методов, направленное на определение и дальнейший учёт физических свойств пород, слагающих горный массив. В нашем исследовании результаты геофизических методов нашли применение в получении скорректированных результатов БВР.

Из минусов используемой методики можно отметить, что выбранные методы нельзя назвать экспресс-методами, в основном, за счет затрат времени на обработку и интерпретацию. В принципе, использование более оперативных методов вполне допускается, если они обеспечат необходимый уровень детальности получаемого разреза. Совершенствование методик измерений и интерпретации благоприятно повлияет на результат, так же, как и совместное применение методов. В частности, следует рассмотреть вариант обеспечения конвейерной работы по методике электротомографии [15]. Для этой цели предлагается на исследуемом участке борта карьера разместить электроды с выбранным шагом заранее на весь участок с помощью дополнительной бригады, в обязанности которой будет входить установка и сбор электродов на участке. Полевой бригаде останется производить измерения на профилях и перемещать только косы со станцией. По завершении измерений данная бригада сможет вернуться в здание предприятия и приступить к камеральным работам. Подобная схема увеличит производительность работ электротомографии для того, чтобы уложиться в производственный цикл отработки рудного блока.

Заключение

В результате использования разработанной методики применения электротомографии в условиях асбестового карьера появилась возможность получать оперативные данные о крепости пород, слагающих борта карьера, что позволит скорректировать БВР под конкретные условия и обеспечит снижение

выхода негабарита и переизмельчения пород. Разработанная методика электротомографии была одобрена и рекомендована ко внедрению в технологические процессы предприятия для оптимизации буровзрывных работ. В данный момент по разработанной дорожной карте сотрудниками предприятия выполняется внедрение разработанной методики.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Vedernikov A., Zuev P., Grigoriev D.* Geophysical surveys of rock mass status of iron ore deposit with combined deep – opencast mining zone // E3S Web of Conferences 2020, Vol. 177, No. 02006, DOI <https://doi.org/10.1051/e3sconf/2020177020076>
2. *Жуков А. А., Пригара А. М., Пушкарева И. Ю., Царев Р. И.* Опыт применения комплекса геофизических методов для выявления карстовых полостей в отвалах калийных рудников // Научно-технический журнал. Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2015. – № 5. – С. 120–130
3. Что такое хризотил? [электронный ресурс] // Хризотиловая ассоциация [сайт]. URL: <https://chrysotile.ru/page/what-is-chrysotile/> (дата обращения 04.03.2021)
4. *Chalikakis, K., Plagnes, V., Guerin, R. et al.* Contribution of geophysical methods to karst-system exploration: an overview // Hydrogeology Journal 19, 1169 (2011) doi:10.1007/s10040-011-0746-x
5. *Óscar Pueyo Anchuela, Aránzazu Luzón, Héctor Gil Garbi, Antonio Pérez, Andrés Pocolvi Juan, María Asunción Soriano,* 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, Volume 102, 2014, Pages 81–95, ISSN 0926–9851, <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2014.01.002>
6. *F. J. Martínez-Moreno, J. Galindo-Zaldívar, A. Pedrera, T. Teixido, P. Ruano, J. A. Peña, L. González-Castillo, A. Ruiz-Constán, M. López-Chicano, W. Martín-Rosales,* Integrated geophysical methods for studying the karst system of Gruta de las Maravillas (Aracena, Southwest Spain) // Journal of Applied Geophysics, Volume 107, 2014, Pages 149–162, ISSN 0926–9851, <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2014.05.021>
7. *S. C. Li, Z. Q. Zhou, Z. H. Ye, L. P. Li, Q. Q. Zhang, Z. H. Xu,* Comprehensive geophysical prediction and treatment measures of karst caves in deep buried tunnel // Journal of Applied Geophysics, Volume 116, 2015, Pages 247–257, ISSN 0926–9851, <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2015.03.019>
8. *Григорьев Д. В., Ведерников А. С.* Результаты применения 3d-электротомографии для поисков карстовых пустот в условиях солеотвала // Проблемы недропользования. – 2019. – № 4 (23). С. 137–143. DOI: 10.25635/2313–1586.2019.04.137
9. *Loke M. H.* Tutorial: 2-D and 3-D electrical imaging surveys. Geotomo Software, Res2dinv 3.5 Software. – 2004
10. *Ronczka, M., Hellman, K., Günther, T., Wisén, R., Dahlin, T.,* Electric resistivity and seismic refraction tomography: a challenging joint underwater survey at Äspö Hard Rock Laboratory // Solid Earth, 8, 671–682, 2017, <https://doi.org/10.5194/se-8-671-2017>
11. *Ведерников А. С., Григорьев Д. В., Зуев П. И.* Опыт проведения геофизических исследований при сейсмомикрорайонировании территорий особо ответственных объектов // XV Уральская молодежная научная школа по геофизике. Сборник докладов. Екатеринбург, 2016. – С. 056–060.

12. Замятин А. Л. Изучение состояния массива горных пород для обеспечения устойчивости борта карьера // Сборник докладов VII Международной научно-технической конференции в рамках Уральской горнопромышленной декады. Екатеринбург, 2018. — С. 325 — 329

13. Рязанцев П. А. Геофизические методы контроля сырья на месторождениях облицовочного камня // Научно-технический журнал. Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2018. — № 4. С. 149 — 158 DOI: 10.25018/0236 — 1493 — 2018 — 4-0 — 149 — 158

14. Zhou W., Lei M. Summary editorial for karst hydrogeology: advances in karst collapse studies // *Environmental Earth Sciences* 77, 803 (2018) doi:10.1007/s12665 — 018 — 7990 — 5

15. Samgyu Park, Myeong-Jong Yi, Jung-Ho Kim, Seung Wook Shin. Electrical resistivity imaging (ERI) monitoring for groundwater contamination in an uncontrolled landfill, South Korea // *Journal of Applied Geophysics*, Vol. 135. DOI: 10.1016/j.jappgeo.2016.07.004 **VIAB**

REFERENCES

1. Vedernikov A., Zuev P., Grigoriev D. Geophysical surveys of rock mass status of iron ore deposit with combined deep opencast mining zone. *E3S Web of Conferences* 2020, Vol. 177, no. 02006, DOI <https://doi.org/10.1051/e3sconf/2020177020076>

2. Zhukov A. A., Penetration, A. M., And Pushkareva, I. Yu., Tsarev R. I. Experience in using a complex of geophysical methods to identify karst cavities in potash mine dumps. *Scientific and Technical journal. MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2015. no. 5. pp. 120 — 130 [In Russ]

3. What is chrysotile? available at: <https://chrysotile.ru/page/what-is-chrysotile>, 2021 [In Russ]

4. Chalikakis, K., Plagnes, V., Guerin, R. et al. Contribution of geophysical methods to karst-system exploration: an overview. *Hydrogeology Journal* 19, 1169 (2011) doi:10.1007/s10040 — 011 — 0746-x

5. Óscar Pueyo Anchuela, Aránzazu Luzón, Héctor Gil Garbi, Antonio Pérez, Andrés Pocolví Juan, María Asunción Soriano, 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*, Volume 102, 2014, Pages 81 — 95, ISSN 0926 — 9851, <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2014.01.002>

6. F. J. Martínez-Moreno, J. Galindo-Zaldívar, A. Pedrera, T. Teixido, P. Ruano, J. A. Peña, L. González-Castillo, A. Ruiz-Constán, M. López-Chicano, W. Martín-Rosales, Integrated geophysical methods for studying the karst system of Gruta de las Maravillas (Aracena, Southwest Spain), *Journal of Applied Geophysics*, Volume 107, 2014, Pages 149 — 162, ISSN 0926 — 9851, <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2014.05.021>

7. S. C. Li, Z. Q. Zhou, Z. H. Ye, L. P. Li, Q. Q. Zhang, Z. H. Xu, Comprehensive geophysical prediction and treatment measures of karst caves in deep buried tunnel, *Journal of Applied Geophysics*, Volume 116, 2015, Pages 247 — 257, ISSN 0926 — 9851, <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2015.03.019>

8. Grigoriev D. V., Vedernikov A. S. Results of using 3d-electrotomography to search for karst voids in salt dump conditions. *Problemy nedropolzovania*. 2019. no. 4 (23). Pp. 137 — 143. DOI: 10.25635/2313 — 1586.2019.04.137 [In Russ]

9. Loke M. H. Tutorial: 2-D and 3-D electrical imaging surveys. Geotomo Software, Res2dinv 3.5 Software. 2004

10. Ronczka, M., Hellman, K., Günther, T., Wisén, R., Dahlin, T., Electric resistivity and seismic refraction tomography: a challenging joint underwater survey at Äspö Hard Rock Laboratory, *Solid Earth*, 8, 671 — 682, 2017, <https://doi.org/10.5194/se-8 — 671 — 2017>

11. Vedernikov A. S., Grigoriev D. V., Zuev P. I. Experience in conducting geophysical surveys during seismic micro-zoning of territories of particularly important objects. *XV Uralskaya molodezhnaya nauchnaya shkola po geofizike* [XV Ural Youth Scientific School of Geophysics]. Ekaterinburg, 2016. p. 056–060 [In Russ]

12. Zamyatin A. L. Study of the state of the rock mass to ensure the stability of the side of the quarry. *Sbornik dokladov VII Mezhdunarodnoi nauchno-tehnicheskoi konferentsii v ramkakh Ural'skoi gornopromyshlennoi dekady*. Ekaterinburg, 2018. pp. 325–329 [In Russ]

13. Ryazantsev P. A. Geophysical methods of raw material control in the deposits of facing stone. Scientific and technical journal. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2018. no. 4. S. 149–158 DOI: 10.25018/0236–1493–2018–4-0–149–158 [In Russ]

14. Zhou W., Lei M. Summary editorial for karst hydrogeology: advances in karst collapse studies. *Environmental Earth Sciences* 77, 803 (2018) doi:10.1007/s12665–018–7990–5

15. Samgyu Park, Myeong-Jong Yi, Jung-Ho Kim, Seung Wook Shin. Electrical resistivity imaging (ERI) monitoring for groundwater contamination in an uncontrolled landfill, South Korea. *Journal of Applied Geophysics*, Vol. 135. DOI: 10.1016/j.jappgeo.2016.07.004

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

*Зуев Павел Игоревич*¹ – научный сотрудник, zuev@igduran.ru;

*Григорьев Данила Вячеславович*¹ – младший научный сотрудник, danilging@gmail.com;

*Ведерников Андрей Сергеевич*¹ – научный сотрудник, avedernikov@igduran.ru;

¹ Институт горного дела УрО РАН, Екатеринбург, Россия.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*Zuev P. I.*¹, researcher, Institute of mining, zuev@igduran.ru;

*Grigoriev D. V.*¹, researcher, Institute of mining, danilging@gmail.com;

Vedernikov A. S., researcher, avedernikov@igduran.ru;

¹ Institute of Mining of Ural branch of RAS, Ekaterinburg, Russia.

Получена редакцией 16.12.2020; получена после рецензии 26.03.2021; принята к печати 10.04.2021.

Received by the editors 16.12.2020; received after the review 26.03.2021; accepted for printing 10.04.2021.

