

УДК 622.51:550.3

Мельник Виталий Вячеславович

кандидат технических наук,
заведующий отделом геомеханики,
Институт горного дела УрО РАН,
620075, г. Екатеринбург,
ул. Мамина-Сибиряка д. 58
e-mail: melnikvv74@mail.ru

Далатказин Тимур Шавкатович

кандидат технических наук,
заведующий лабораторией технологий
снижения риска катастроф
при недропользовании,
Институт горного дела УрО РАН
e-mail: 9043846175@mail.ru

Замятин Алексей Леонидович

научный сотрудник,
лаборатория технологий снижения
риска катастроф при недропользовании,
Институт горного дела УрО РАН
e-mail: a.zamyatin@mail.ru

**РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ БЕЗОПАСНОСТИ
ВЕДЕНИЯ ПОДЗЕМНЫХ ГОРНЫХ РАБОТ
ПРИ ОТРАБОТКЕ УГОЛЬНЫХ ЛАВ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СОВРЕМЕННЫХ
МЕТОДОВ ГЕОФИЗИКИ****Аннотация:*

Представлен опыт использования комплекса современных методов геофизических исследований при работе в стесненных горными выработками условиях для определения возможных проявлений повышенных водопритоков в шахтное пространство. Необходимость выполнения настоящих исследований связана с резким увеличением водопритоков в забой горной выработки угольной шахты при выполнении буровзрывных работ, что привело к остановке проходки в связи с опасностью ее затопления. При выполнении исследований структурных неоднородностей призабойной части массива, определяющих его фильтрационные параметры, были использованы метод спектрального сейсмопрофилирования и георадарного зондирования.

Полученные при исследованиях данные показали высокую степень соответствия представлениям о возможных параметрах трещиноватости в изучаемом породном массиве и объясняют происхождение повышенных водопритоков в забой выработки. На основе полученной информации были разработаны рекомендации снижения опасности отработки полезного ископаемого в условиях повышения водопритоков, определены расстояния до ближайших и последующих структурных нарушений по направлению проходки штрека, что позволит вести дальнейшие горные работы с минимальными рисками.

Ключевые слова: массив горных пород, структурные нарушения, шахта, горные выработки, лава, трещиноватость, миграция подземных вод, водоприток, георадар, спектральное сейсмопрофилирование.

DOI: 10.25635/2313-1586.2022.04.122

Melnik Vitaly V.

Candidate of Technical Sciences,
Head of Department of Geomechanics,
Institute of Mining, Ural Branch of RAS,
620075 Ekaterinburg,
58 Mamina-Sibiryaka Str.
e-mail: melnikvv74@mail.ru

Dalatkazim Timur Sh.

Candidate of Technical Sciences,
Head of Laboratory of technologies reducing
the risk of disasters during mining,
Institute of Mining, Ural Branch of RAS
e-mail: 9043846175@mail.ru

Zamyatin Alexsey L.

Researcher,
Laboratory of technologies reducing
the risk of disasters during mining,
Institute of Mining, Ural Branch of RAS
e-mail: a.zamyatin@mail.ru

**PROBLEMS SOLVING FOR THE SAFETY
OF UNDERGROUND MINING OPERATIONS
DURING THE MINING OF COAL LONG
FACES USING MODERN METHODS
OF GEOPHYSICS***Abstract:*

This article presents the experience of using modern methods of geophysical research when working in conditions constrained by mining workings to determine possible manifestations of increased water flows into the mine space. The need to carry out these studies is caused by a sharp increase in the amount of water flows into the bottom of the coalmine during drilling and blasting, which led to the stopping of sinking because of the danger of its flooding. When performing studies of structural inhomogeneity of the bottom-hole part of the array, determining its filtration parameters, we used the method of spectral seismic profiling and georadar sounding.

The data obtained during the research showed a high degree of compliance with the ideas about possible parameters of fracturing in the studied rock mass and explain the origin of water manifestations in the fore-breast. Based on the information received, we developed recommendations to reduce the risk of mining under conditions of increased water flows; we determined the distances to the nearest and subsequent structural violations in direction of the roadway construction, which will allow further mining operations with minimal risks.

Key words: rock mass, structural disturbances, shaft, mine workings, longwall face, fracturing, groundwater migration, water flows, georadar, spectral seismic profiling.

* Исследования выполнены в рамках Госзадания № 075-00412-22 ПР, тема 3 (2022-2024).

В процессе ведения горнопроходческих работ в подземных горных выработках часто возникает необходимость получения информации о структурном и геомеханическом состоянии вмещающего породного массива, определяющего его фильтрационные параметры. Особенно явно такая проблема возникает в случае опасности резкого увеличения водопритоков, связанных с находящимися выше по горизонтам резервуарами воды (затопленными горными выработками).

В настоящее время изучение структурного и геомеханического состояния массива горных пород эффективно реализуется с применением геофизических методов исследований. Достоверность получаемых результатов зависит от многих факторов: от метода, использованного в конкретных условиях, параметров изучаемого объекта, внешних условий проведения измерений и т.д. Использование геофизики в условиях подземных горных выработок имеет ряд специфических особенностей (ограниченность пространства, обводненность и т.п.) [1, 2].

Показательными являются геофизические исследования, выполненные Институтом горного дела УрО РАН при исследовании структурно-геомеханического состояния призабойного массива в угольной шахте с целью определения условий миграции подземных вод. Здесь при ведении проходческих работ с применением БВР произошло резкое увеличение притока воды из шпура с дебитом $35 \text{ м}^3/\text{ч}$. Проходческие работы были остановлены до получения достоверной информации о состоянии массива горных пород за забоем, необходимой для оценки возможных водопроявлений при продолжении ведения горных работ.

Основная задача исследований заключалась в определении возможности дальнейшего ведения отработки полезного ископаемого в условиях возможного затопления шахтного пространства. Для решения поставленной задачи необходимы знания о структуре и параметрах трещиноватости призабойного массива горных пород, определение условий миграции подземных вод для своевременного принятия мер по обеспечению безопасности дальнейшей проходки.

Обнажение призабойного массива представлено (сверху вниз) следующими породами:

- сланцем песчано-глинистым темно-серого цвета, слоистым, равномерно трещиноватым, среднеустойчивым, контакт с нижним слоем четкий, легко отделимый;
- «ложная кровля» – сланец глинистый, присутствует фрагментарно с обилием углистого материала и отпечатков флоры, черный, слоистый, механически слабый, коэффициент крепости по Протодяконову 2 – 4, неустойчивый, мощность 0,06 – 0,07 м;
- угольный пласт k_2 представлен углем антрацитом простого строения мощностью 1,2 – 1,4 м. Угол падения пласта $8 - 9^\circ$, разбит двумя системами трещин кливажа через 0,5 – 1 см, черный, с преобладанием витринита и с примазками фюзенита по плоскостям напластования. В угольном пласте наблюдаются полости в виде линз, выполненные кальцитом с мощностью в центральной части линзы до 3 – 8 см. Контакт угольного пласта с непосредственной почвой пласта четкий и легко отделимый. Пласт в зоне обследования разбит системой микровзбросов с амплитудой смещения 0,10 – 0,20 м через 1,2 - 1,5 м, полости микровзбросов выполнены жилами и примазками кальцита с перетертым глинистым материалом и насыщены тальком, мощность жил до 1,5 – 3,0 см;
- «ложная» почва встречается на отдельных обособленных участках мощностью до 10 см и представлена пористой глинистой породой слабой механической прочности черного цвета, насыщенной углистым и слюдястым материалом, при попадании воды не размокает;
- непосредственная почва пласта представлена темно-серым сланцем песчаным, мощностью 0,1 – 0,2 м, неслоистым, комковатой текстуры, с обилием отпечатков растений. Мощность вскрытой части слоя 0,5 – 0,9 м, порода с увеличением расстояния от угольного пласта постепенно переходит в песчаник. Мощность вскрытой толщи песчаника по центру выработки составляет 0,5 м.

Наиболее крупным выявленным тектоническим нарушением является сброс с амплитудой 2 – 3 м, ограничивающий шахтное поле с восточной стороны. Также отмечается наличие внутрипластовых и малоамплитудных нарушений, с амплитудами смещения до 2 – 3 м, преимущественно субмеридионального направления.

Непосредственно на участке исследований в пройденном перед забоем интервале штрека происходит слабый отжим и обрушение боковых стенок на 0,2 – 0,3 м по стенам двух систем трещиноватости пород непосредственной кровли пласта:

– 1-я система трещин субпараллельна длинной оси штрека. Азимут падения пород 320° , угол падения пород $70 - 80^\circ$, частота трещин через 0,5 – 0,7 м;

– 2-я система трещин характеризуется азимутом падения пород 250° , угол падения пород $80 - 90^\circ$, частота трещин через 0,7 – 1,0 м.

Стенки трещин слегка увлажнены, шероховаты, без смещения, легко отделяются друг от друга. В результате происходящего процесса стабилизации горного давления выдавливание боковых пород происходит с обеих сторон штрека.

Гидрогеологические условия отработки в районе расположения шахты характеризуются как благоприятные. Подземные воды здесь приурочены к четвертичным и каменноугольным отложениям.

В качестве источника обводнения глубокорасположенных горных выработок четвертичные водоносные горизонты угрозы не представляют.

Водоносные горизонты каменноугольных отложений

В каменноугольных отложениях водовмещающими породами являются песчаники, известняки и песчаные сланцы. В этих породах подземные воды накапливаются и циркулируют по порам и трещинам, а в известняках – в карстовых полостях.

Водовмещающие породы переслаиваются с водоупорными глинистыми сланцами, вследствие чего подземные воды карбона относятся к типу трещинно-пластовых напорных вод.

В верхней части каменноугольных отложений до глубины 30 – 50 м, в области питания, подземные воды относятся к типу напорно-безнапорных, здесь уровни подземных вод часто совпадают с глубиной залегания напорного пласта. С глубиной величина напора растет и может достигать 80 – 1000 м.

В каменноугольных отложениях выделяются следующие водоносные горизонты.

Водоносный горизонт песчаника K_2Sk_2 . Песчаник K_2Sk_2 мелкозернистый, общей мощностью до 38 м, подстилает угольный пласт k_2 .

По результатам опытных работ на поле шахты до изученной глубины 400 м коэффициент фильтрации песчаника K_2Sk_2 изменялся в пределах 0,015 – 0,00015 м/сут. Песчаник является относительно водообильным горизонтом, участвующим в формировании водопритока в горные выработки со стороны почвы пласта k_2 .

Водоносный горизонт песчаника $k_2Sk^{1H}_2$ является основным источником обводнения выработок шахты по пласту k_2 . Песчаник $k_2Sk^{1H}_2$ мелкозернистый, трещиноватый. Коэффициент фильтрации до глубины 405 м по результатам опытных работ равен 0,17 м/сут. Отмечалось поглощение промывочной жидкости при бурении в интервале песчаника $k_2Sk^{1H}_2$ до глубины 533 м. Мощность водоносного горизонта $k_2Sk^{1H}_2$ меняется от 30 м на верхних горизонтах до 38 м на нижних.

Водоносный горизонт песчаника $k^{1H}_2SK_4$ и известняка K^1_3 . Песчаник $k^{1H}_2SK_4$, мелкозернистый, трещиноватый, мощностью до 36 м. Известняк K^1_3 мелкокристаллический, монолитный, участками трещиноватый, мощностью до 1,3 м.

Отмеченная величина напора подземных вод этого горизонта достигает 520 м. Коэффициент фильтрации песчаника изменяется от 0,165 до 0,55 м/сут.

По результатам опытных работ водоносный горизонт песчаника $k^{1H}_2SK_4$ отнесен к водообильным.

Методы исследования

Основным поисковым признаком повышенных фильтрационных характеристик массива, вмещающего угольный пласт, являются зоны повышенной трещиноватости и дизъюнктивные нарушения. Для поиска таких неоднородностей наиболее оптимальным геофизическим методом является метод спектрального сейсмопрофилирования, предложенный в качестве основного [3].

Для получения дополнительной информации, характеризующей структуру призабойной части массива, использован метод георадарного зондирования [4].

Метод спектрального сейсмопрофилирования

Для определения структурно-тектонического строения массива горных пород и выявления наиболее обводненных зон на площадке изысканий проводятся исследования методом спектрального сейсмопрофилирования (ССП).

Метод спектрального сейсмопрофилирования основан на использовании зависимости между спектральным составом собственного колебательного процесса, возникающего при ударном воздействии на поверхность породного обнажения и структурным строением зондируемого массива пород. Собственные упругие колебания, наблюдаемые при ударном воздействии на дневную поверхность, возникают из-за наличия в массиве колебательных систем, в качестве которых работают залегающие там геологические структуры.

Структурные неоднородности массива, выявляемые методом СПП, представляют собой поверхности, по которым спайность или сцепление отсутствуют. То есть по этим контактам происходит проскальзывание смежных структурных блоков при возбуждении в них собственных упругих колебаний, вследствие чего можно выявлять подвижные структуры даже в тех случаях, когда они разделены сомкнутыми трещинами. Сомкнутая трещина для метода СПП является границей, тогда как при использовании традиционных методов сейсморазведки она границей не является и, таким образом, выявлена не будет. Основными объектами, выявляемыми методом СПП, являются именно сомкнутые трещины и их совокупности, то есть зоны микротрещиноватости.

Аппаратурно-методический комплекс СПП позволяет выявлять зоны тектонических нарушений (ЗТН), а также зоны повышенной трещиноватости.

Поскольку в общем случае осадочный массив является многослойным, то реакция на удар будет содержать несколько гармонических составляющих. Зависимость их частот от строения такого массива имеет следующий вид (1):

$$h_i = \frac{V_{sh}}{f_{oi}}, \quad (1)$$

где V_{sh} – скорость поперечного (сдвигового) упругого процесса. На основании акустических исследований с применением специально разработанных и запатентованных способов установлено, что величина V_{sh} в горных породах (и грунтах) не более чем на 10 % отличается от 2500 м/с.

Границы, выявляемые с помощью спектрально-акустических (спектрально-сейсморазведочных) методов, представляют собой поверхности, по которым возможно взаимное проскальзывание соседних сред. Это весьма существенное отличие. Так, сомкнутая трещина для спектральной акустики является границей, тогда как при использовании традиционных методов она границей не является и, стало быть, выявлена не будет. Основными объектами, выявляемыми методом СПП, являются как открытые, так и сомкнутые трещины и их совокупности, то есть зоны трещиноватости.

Получаемые в результате компьютерной обработки распечатки представляют собой изображение спектров сейсмосигналов и одновременно изображение конкретных геологических объектов в геомеханическом аспекте либо изображение разного рода подвижек [5 – 8].

Георадарное зондирование

Метод георадиолокации относится к группе электромагнитных методов, то есть изучает отклик среды на излучаемое электромагнитное поле. Метод георадарного зондирования относится к группе электроразведочных методов на токах высокой частоты, основан на явлении отражения электромагнитных волн от границ раздела поверхностей, обладающих различным значением диэлектрической проницаемости (ϵ). Диэлектрическая проницаемость – величина безразмерная, ее физический смысл состоит в следующем: во сколько раз скорость распространения электромагнитной волны в изучаемой среде ниже, чем в вакууме (скорости света).

Скорость распространения электромагнитной волны в среде связана с диэлектрической проницаемостью следующим уравнением (2):

$$V = \frac{c}{\sqrt{\epsilon}}, \quad (2)$$

где c – скорость распространения электромагнитной волны в вакууме.

Зная время прихода отраженной волны и определив диэлектрическую проницаемость среды, возможно определить расстояние до отражающих слоев. Немаловажными характеристиками при интерпретации данных георадарного зондирования являются параметры затухания электромагнитной волны, тангенс угла диэлектрических потерь, а также частотный состав и волновой рисунок в целом. На стадии обработки и интерпретации, как правило, оперируют действительной частью комплексной диэлектрической проницаемости среды.

Принцип действия георадара основан на излучении сверхширокополосных наносекундных импульсов электромагнитных волн и регистрации сигналов, отраженных от границ раздела слоев зондируемой среды, имеющих различные электрофизические свойства. Основная цель метода состоит в определении положения границ раздела в изучаемых конструкциях. Такими границами раздела в исследуемых средах являются, например, контакт между материалом и воздухом, контакты между материалами различных свойств и состава. Модель среды представляется в виде слоистой толщи с постоянными электрофизическими свойствами внутри каждого слоя и локальных объектов, отличающихся по электрофизическим свойствам от вмещающего материала. Наиболее важными параметрами, характеризующими возможности применения метода георадиолокации в различных средах, являются удельное затухание и скорость распространения электромагнитных волн в среде, что определяется ее электрическими свойствами. Затухание определяет глубинность зондирования, скорость – расстояние до отражающей границы.

Георадарное зондирование позволяет исследовать горный массив на глубину до 16 м с ранжированием породного блока по электромагнитным свойствам. Детальность исследований очень высокая за счет непрерывных измерений при прохождении профилей.

Метод хорошо зарекомендовал себя при поиске старых выработок на подработанных горными работами территориях и структурных неоднородностей закрепного пространства при строительстве шахтных стволов [9 – 13].

Результаты геофизических исследований

Исследования методами спектрального сейсмопрофилирования и георадарного зондирования проводились в забой штрека по трем совпадающим профильным линиям – профиль № 1 (выше угольного пласта), профиль № 2 (по угольному пласту) и профиль № 3 (под угольным пластом). Схема расположения профильных линий приведена на рис. 1.



Рис. 1. Схема расположения профильных линий в забой выработки

В результате исследований получены разрезы по глубине 20 и 100 м, дающие представления о трещиноватости, выявленной в призабойной части массива. Разрезы на глубину более 100 м полезной информации о трещиноватости не несут.

На рис. 2 (разрез по угольному пласту) четко прослеживается слоистость, отмеченная на разрезе красной пунктирной линией.

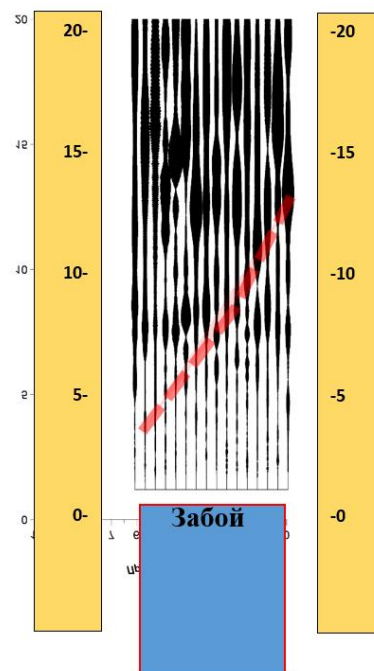


Рис. 2. Спектральный сейсморазрез по профилю 2 (20 м)

На рис. 3 (этот же разрез на глубину 100 м) хорошо видна область повышенной трещиноватости с глубины 20 – 30 м, выделяющаяся под таким же углом, что и слоистость.

На рис. 4 представлено совмещение разрезов по ССП и георадару. Согласно информации разреза георадарного зондирования до глубины 1,5 – 2,0 м, наблюдается зона повышенной трещиноватости. Предположительно, она сформировалась за счет проведения буровзрывных работ при проходке штрека.

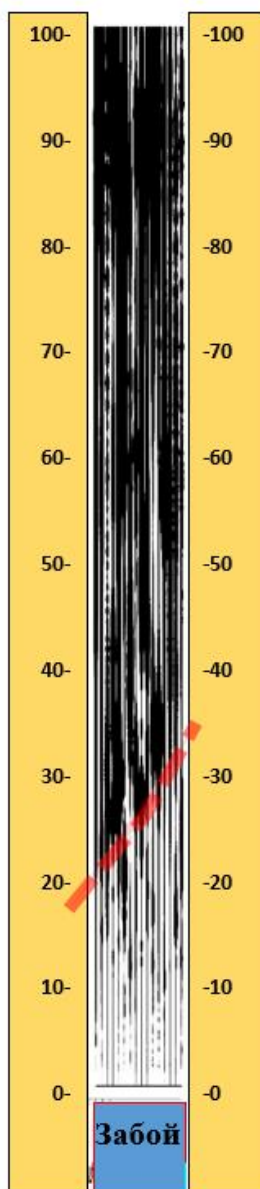


Рис. 3. Спектральный сейсморазрез по профилю 2 (100 м)

Далее, за участком повышенной трещиноватости, локальная трещиноватость прослеживается до глубины 5,0 м и затем проявляющаяся на георадарных разрезах нарушение примерно совпадает по форме и простираению с данными спектральных сейсморазрезов.

Гидрогеологическая и геомеханическая ситуация на шахте определяет потенциальную опасность в обеспечении эффективности и безопасности ее работы. Результаты выполненных геофизических исследований соответствуют имеющейся информации о пространственных параметрах трещиноватости вмещающего горного массива месторождения в целом.

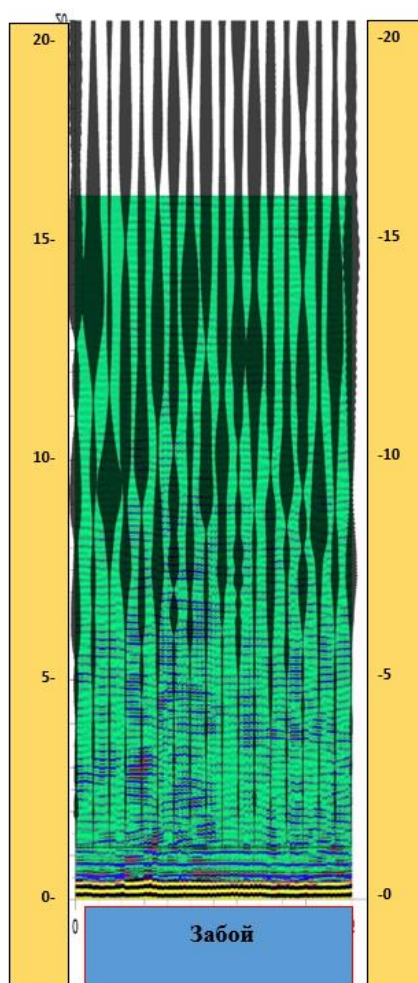


Рис. 4. Спектральный сейсморазрез № 1, совмещенный с георадарным разрезом

Выводы

При выполнении проходческих работ рекомендуется учитывать полученную в результате исследований информацию о распределении фильтрационных свойств в массиве перед забоем подготовкой соответствующих мероприятий по водоотведению.

Выявленные интервалы выхода зон повышенной трещиноватости следует отрабатывать с применением опережающего бурения в режиме максимальной осторожности проходки выявленных возможных водопроявлений.

В существующих горно-геологических условиях ведения подземных горных работ рекомендуется рассмотреть вариант защиты горных выработок от сверхпрогнозируемых водопритокков применением для их изоляции водонепроницаемой перемычки или системы водонепроницаемых перемычек [14, 15].

Список литературы

1. Мельник В.В., Замятин А.Л., 2005. Исследование и создание геолого-структурной и геомеханической модели участка недропользования. *Горный информационно-аналитический бюллетень*, № 4, С. 226 – 230.
2. Далатказин Т.Ш., Харисов Т.Ф., 2019. Исследование последствий затопления подземного рудника на селитебной территории. *Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле*, № 2, С. 38 – 51.
3. Гликман А.Г., 2018. *Физика и практика спектральной сейсморазведки*. URL: <http://www.newgeophys.spb.ru/ru/book/index.shtmс> (дата обращения 2.09.2022)

4. Гапонов Д.А., Фоменко Л.Н., Шерemet P.Д., 2016. Применение георадара для контроля качества закрепления грунтов. *Инженерный вестник Дона*, № 3 (42), С. 68 - 71.
5. Мельник В.В., 2005. Применение метода спектрального сейсмопрофилирования для оценки геомеханического состояния массива горных пород вокруг шахтных выработок. *Горный информационно-аналитический бюллетень*, № 10, С. 69 – 74.
6. Мельник В.В., Замятин А.Л., 2008. Исследование структурных особенностей массива горных пород подземных сооружений. *Известия вузов. Горный журнал*, № 8, С. 165 – 171.
7. Мельник В.В., 2005. Применение метода спектрального сейсмопрофилирования для оценки геомеханического состояния массива горных пород вокруг шахтных выработок. *Горный информационно-аналитический бюллетень*, № 10, С. 69 – 74.
8. Гликман А.Г., 2001. Применение спектрально-сейсморазведочного профилирования (ССП) для поисков месторождений полезных ископаемых. *Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений*, № 3, С. 35 – 35.
9. Fishanger F., Morelli G., Ranieri G., Santarato G., Occhi M., 2013. 4D cross-borehole electrical resistivity tomography to control resin injection for ground stabilization: a case history in Venice (Italy). *Near Surface Geophysics*, Vol. 11, p. 41 – 50.
10. Conyers L.B., 2016. *Ground-penetration Radar for Geoarchaeology*. Analytical Methods in Earth and permafrost properties using Ground Penetrating Radar. Proc. Of 16th international Conference of Ground Penetrating Radar in The Hong Kong. URL: <https://litportal.ru/avtory/lawrence-conyers-b/kniga-ground-penetrating-radar-for-geoarchaeology-920909.html?ysclid=lai1hqcrbi764300480> (дата обращения 28.08.2022)
11. Носкевич В.В., Федорова Н.В., 2018. Использование метода георадиолокации для исследований древнего медного рудника «Воровская яма» на Южном Урале. *Известия Уральского государственного горного университета*, № 4 (52), С. 61 – 67.
12. Warren C., Giannopoulos A., Giannacis I., 2015. An advanced GPR modelling framework, p. 1 – 4. URL: https://www.researchgate.net/publication/286442676_An_advanced_GPR_modelling_framework_The_next_generation_of_gprMax (дата обращения 20.08.2022)
13. Elsayed I.S., Alhussein A.B., Gad E., Mahfooz A.H., 2014. Shallow Seismic Refraction, Two-Dimensional Electrical Resistivity Imaging, and Ground Penetrating Radar for Imaging the Ancient Monuments at the Western Shore of Old luxor City, Egipt. *Archaeological Discovery*, Vol. 2, № 2, p. 31 – 43.
14. Казикаев Д.М., Савич Г.В., 2012. *Практический курс геомеханики подземной и комбинированной разработки руд: учебное пособие*. Москва: Горная книга, 224 с.
15. Рыльникова М.В., Олизаренко В.В., Зубков А.А., Михальчук А.П., 2015. Методика расчета клиновой водонепроницаемой перемычки с распашными створками ворот для движения самоходной техники. *Горный информационно-аналитический бюллетень. Условия устойчивого функционирования минерально-сырьевого комплекса России*, СВ № 15, С. 70 – 85.

References

1. Mel'nik V.V., Zamyatin A.L., 2005. Issledovanie i sozдание geologo-strukturnoi i geomekhanicheskoi modeli uchastka nedropol'zovaniya [Research and creation of a geological-structural and geomechanical model of a subsurface use site]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'*, № 4, P. 226 – 230.
2. Dalatkazin T.Sh., Kharisov T.F., 2019. Issledovanie posledstviia zatopleniya podzemnogo rudnika na selitebnoi territorii [Research of the effects of an underground mine flooding in a residential area]. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Nauki o Zemle*, № 2, P. 38 – 51.
3. Glikman A.G., 2018. Fizika i praktika spektral'noi seismorazvedki [Research of the effects of an underground mine flooding in a residential area]. URL: <http://www.newgeophys.spb.ru/ru/book/index.shtml> (data obrashcheniya 2.09.2022)

4. Gaponov D.A., Fomenko L.N., Sheremet R.D., 2016. Primenenie georadara dlya kontrolya kachestva zakrepleniya gruntov [Use of ground-penetrating radar to control the quality of soil stabilization]. *Inzhenernyi vestnik Dona*, № 3 (42), P. 68 – 71.
5. Mel'nik V.V., 2005. Primenenie metoda spektral'nogo seismoprofilirovaniya dlya otsenki geomekhanicheskogo sostoyaniya massiva gornyx porod vokrug shakhtnykh vyrabotok [Application of the spectral seismic profiling method to assess the geomechanical state of the rock mass around mine workings]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'*, № 10, P. 69 – 74.
6. Mel'nik V.V., Zamyatin A.L., 2008. Issledovanie strukturnykh osobennosti massiva gornyx porod podzemnykh sooruzhenii [Study of structural features of the rock mass of underground constructions]. *Izvestiya vuzov. Gornyi zhurnal*, № 8, P. 165 – 171.
7. Mel'nik V.V., 2005. Primenenie metoda spektral'nogo seismoprofilirovaniya dlya otsenki geomekhanicheskogo sostoyaniya massiva gornyx porod vokrug shakhtnykh vyrabotok [Application of the spectral seismic profiling method to assess the geomechanical state of the rock mass around mine workings]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'*, № 10, P. 69 – 74.
8. Glikman A.G., 2001. Primenenie spektral'no-seismorazvedochnogo profilirovaniya (SSP) dlya poiskov mestorozhdenii poleznykh iskopaemykh [Application of spectral seismic-exploration shooting (SSS) for prospecting mineral deposits]. *Geologiya, geofizika i razrabotka neftyanykh i gazovykh mestorozhdenii*, № 3, P. 35 – 35.
9. Fishanger F., Morelli G., Ranieri G., Santarato G., Occhi M., 2013. 4D cross-borehole electrical resistivity tomography to control resin injection for ground stabilization: a case history in Venice (Italy). *Near Surface Geophysics*, Vol. 11, p. 41 – 50.
10. Conyers L.B., 2016. *Ground-penetration Radar for Geoarchaeology*. Analytical Methods in Earth and permafrost properties using Ground Penetrating Radar. Proc. Of 16th international Conference of Ground Penetrating Radar in The Hong Kong. URL: <https://litportal.ru/avtory/lawrence-conyers-b/kniga-ground-penetrating-radar-for-geoarchaeology-920909.html?ysclid=lai1hqrcbi764300480> (дата обращения 28.08.2022)
11. Noskevich V.V., Fedorova N.V., 2018. Ispol'zovanie metoda georadiolokatsii dlya issledovani drevnego mednogo rudnika "Vorovskaya yama" na Yuzhnom Urale [Use of the geo-radio-location method for the researching of the ancient copper mine "Vorovskaya Yama" in the Southern Urals]. *Izvestiya Ural'skogo gosudarstvennogo gornogo universiteta*, № 4 (52), P. 61 – 67.
12. Warren C., Giannopoulos A., Giannacis I., 2015. An advanced GPR modelling framework, p. 1 - 4. URL: https://www.researchgate.net/publication/286442676_An_advanced_GPR_modelling_framework_The_next_generation_of_gprMax (дата обращения 20.08.2022).
13. Elsayed I.S., Alhussein A.B., Gad E., Mahfooz A.H., 2014. Shallow Seismic Refraction, Two-Dimensional Electrical Resistivity Imaging, and Ground Penetrating Radar for Imaging the Ancient Monuments at the Western Shore of Old luxor City, Egipt. *Archaeological Discovery*, Vol. 2, № 2, p. 31 – 43.
14. Kazikaev D.M., Savich G.V., 2012. *Prakticheskii kurs geomekhaniki podzemnoi i kom-binirovannoi razrabotki rud: uchebnoe posobie* [Practical course of geomechanics of sub-surface and combined ore mining: textbook]. Moscow: Gornaya kniga, 224 p.
15. Ryl'nikova M.V., Olizarenko V.V., Zubkov A.A., Mikhal'chuk A.P., 2015. Metodika rascheta klinovoi vodonepronitsaemoi peremychki s raspashnymi stvorkami vorot dlya dvizheniya samokhodnoi tekhniki [The calculation method of a wedge-type waterproof dum with pivoted wing gates for the movement of self-propelled vehicles]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'*. Usloviya ustoichivogo funktsionirovaniya mineral'no-syr'evogo kompleksa Rossii, SV № 15, P. 70 – 85.