

УДК 622.831:550.83

Шевченко Максим Дмитриевич

младший научный сотрудник,
отдел геомеханики,
Институт горного дела УрО РАН,
620075, г. Екатеринбург,
ул. Мамина-Сибиряка, 58
e-mail: maksim_shevchenko97@inbox.ru

СОВРЕМЕННЫЕ ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ В ИЗУЧЕНИИ ГЕОМЕХАНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ГОРНОГО МАССИВА*

Аннотация:

В данной работе рассматриваются современные геофизические методы, используемые для анализа геомеханического состояния горных массивов. Основное внимание уделяется методам спектрального сейсмопрофилирования и георадарного зондирования, которые позволяют получать детальные сведения о внутренней структуре горных пород на значительных глубинах и обширных территориях без разрушения целостности массива.

Экспериментальные исследования показали высокую эффективность этих методов как при совместном, так и при раздельном использовании. Они обеспечивают подробное исследование структуры горных пород, идентификацию зон трещиноватости, тектонических разломов и карстовых пустот, что существенно повышает безопасность и продуктивность горных работ и строительство зданий и сооружений.

Несмотря на специфику каждой из указанных методик и присущие им ограничения, их совместное использование способно нивелировать отдельные недостатки и обеспечить получение более точной информации о состоянии горного массива. Так, метод спектрального сейсмопрофилирования является высокоэффективной технологией для глубинных изысканий, тогда как метод георадарного зондирования предпочтительно использовать для исследования малых глубин.

Практическая значимость этих подходов выражается в оперативном обнаружении потенциально опасных участков, разработке предупреждающих мероприятий против возникновения аварийных ситуаций и повышении устойчивости горных выработок. Применение данных технологий позволяет оптимизировать процессы извлечения полезных ископаемых и строительства объектов недропользования, минимизируя риски природно-техногенных катастроф.

DOI: 10.25635/2313-1586.2025.02.087

Shevchenko Maksim D.

Junior Researcher, Department of Geomechanics,
Institute of Mining, Ural Branch of RAS,
620075, Yekaterinburg,
Mamina-Sibiryak st., 58
e-mail: maksim_shevchenko97@inbox.ru

MODERN GEOPHYSICAL METHODS IN STUDYING THE GEOMECHANICAL STATE OF A ROCK MASS

Abstract:

This paper discusses modern geophysical methods used to analyze the geomechanical state of rock massifs. The main attention is paid to the methods of spectral seismic profiling and ground penetrating radar sounding, which allows obtaining detailed information about the internal structure of rocks at significant depths and over vast territories without destroying the integrity of the massif.

Experimental studies have shown the high efficiency of these methods both when used together and separately. They provide a detailed study of the structure of rocks, identification of fracturing zones, tectonic faults and karst voids, which significantly increases the safety and productivity of mining operations, and the construction of buildings and structures.

Despite the specifics of each of these methods and their inherent limitations, their combined use can level out individual shortcomings and provide more accurate information about the state of the rock mass. Thus, the spectral seismic profiling method is a highly effective technology for deep surveys, while the ground penetrating radar sounding method is preferably used to study shallow depths.

The practical significance of these approaches is expressed in the prompt detection of potentially hazardous areas, development of preventive measures against emergency situations and increasing the stability of mine workings. The use of these technologies allows optimizing the processes of mineral extraction and construction of subsoil use facilities, minimizing the risks of natural and man-made disasters.

The obtained results indicate that modern geophysical technologies are key tools for studying the geomechanical state of rock massifs. Further evolution and integration of these methods will open new horizons for in-depth knowledge and safe exploitation of natural resources.

* Исследование выполнено в рамках Госзадания № 075-00410-25-00. Г.р. № 1022040300093-0-1.5.1. Тема 3 (2025-2027).

Полученные результаты свидетельствуют о том, что современные геофизические технологии представляют собой ключевые инструменты для исследования геомеханического состояния горных массивов. Дальнейшая эволюция и интеграция этих методов откроют новые горизонты для углубленного познания и безопасной эксплуатации природных ресурсов.

Ключевые слова: геофизические методы, геомеханика, подземные горные выработки, сейсмические методы, аварийные ситуации, структурные особенности массива, геомеханическое состояние.

Key words: geophysical methods, geomechanics, underground mine workings, seismic methods, emergency situations, structural features of the massif, geomechanical state.

Введение

В условиях интенсивного освоения природных ресурсов и развития горнодобывающей промышленности вопросы обеспечения безопасности и устойчивости горных выработок приобретают все большую актуальность [1, 2]. Одним из ключевых факторов, определяющих стабильность горных массивов, является их геомеханическое состояние, включающее в себя напряженное и деформированное состояние, трещиноватость, пористость и другие параметры [3, 4]. Традиционные методы оценки геомеханического состояния, такие как бурение скважин и лабораторные испытания, характеризуются высокими затратами, трудоемкостью и ограниченными возможностями получения информации [5 – 7].

Современные геофизические методы предлагают альтернативный подход к изучению геомеханического состояния горных массивов. Эти методы позволяют получать данные о внутреннем строении и свойствах горных пород на больших глубинах и площадях, не нарушая целостность массива. Каждый из этих методов имеет свои особенности и области применения, что делает их ценными инструментами для комплексного анализа геомеханического состояния.

Цель данной научно-исследовательской работы – рассмотреть современные геофизические методы, используемые отделом геомеханики Института горного дела Уральского отделения Российской академии наук (ИГД УрО РАН) для изучения геомеханического состояния горных массивов, и показать их возможности и ограничения. В статье будут представлены основные принципы каждого из методов, а также примеры их применения в реальных условиях.

Методы исследования

В статье представлено использование нескольких геофизических методов для прогноза геомеханического состояния горного массива, таких как спектральное сейсмопрофилирование и георадарное зондирование. Многолетний опыт использования данных методов сотрудниками отдела геомеханики ИГД УрО РАН показал, что их применение позволяет существенно повысить точность прогнозов геомеханического состояния горных массивов, обеспечивая своевременное выявление потенциально опасных зон и разработку эффективных мер по предотвращению аварийных ситуаций не только в наземных, но и в подземных условиях [8 – 10]. Рассмотрим принцип действия каждого метода и их положительные свойства.

Метод спектрального сейсмопрофилирования (метод ССП)

Спектральное сейсмопрофилирование – это метод, который позволяет исследовать внутреннее строение горных пород с помощью анализа распространения сейсмических волн.

Метод основан на зависимости спектрального состава колебаний, возникающих при ударе на поверхность, и структурой породного массива. Физические эффекты по-

дробно описаны в источнике [11]. Собственные упругие колебания массива возникают из-за наличия геологических структур, действующих как колебательные системы. Сигналы содержат гармонические затухающие колебания, связанные с размерами объектов:

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

где $V_{сдв} \approx 2500$ м/с – скорость поперечных колебаний.

Любой сигнал во времени преобразуется в спектр с помощью Фурье-преобразования. Спектральный вид сигнала (рис. 1b) дает лучшее разрешение по частоте. Видны частоты: 10, 17,8, 26, 31, 50 Гц. Используя формулу (1), получаем глубину (h) и строим разрез. С увеличением глубины разрешающая способность снижается.

Значения плотности спектра $A(f)$ соответствуют добротности Q и находятся в диапазоне от 1,2 до 12,5.

Спектральное изображение поворачивается на 90° для построения разреза (рис. 1c). На глубинах 140 и 250 м границы четче, а ближе к поверхности наблюдается снижение четкости. На глубине 50 м – слоистая структура или повышенная нарушенность.

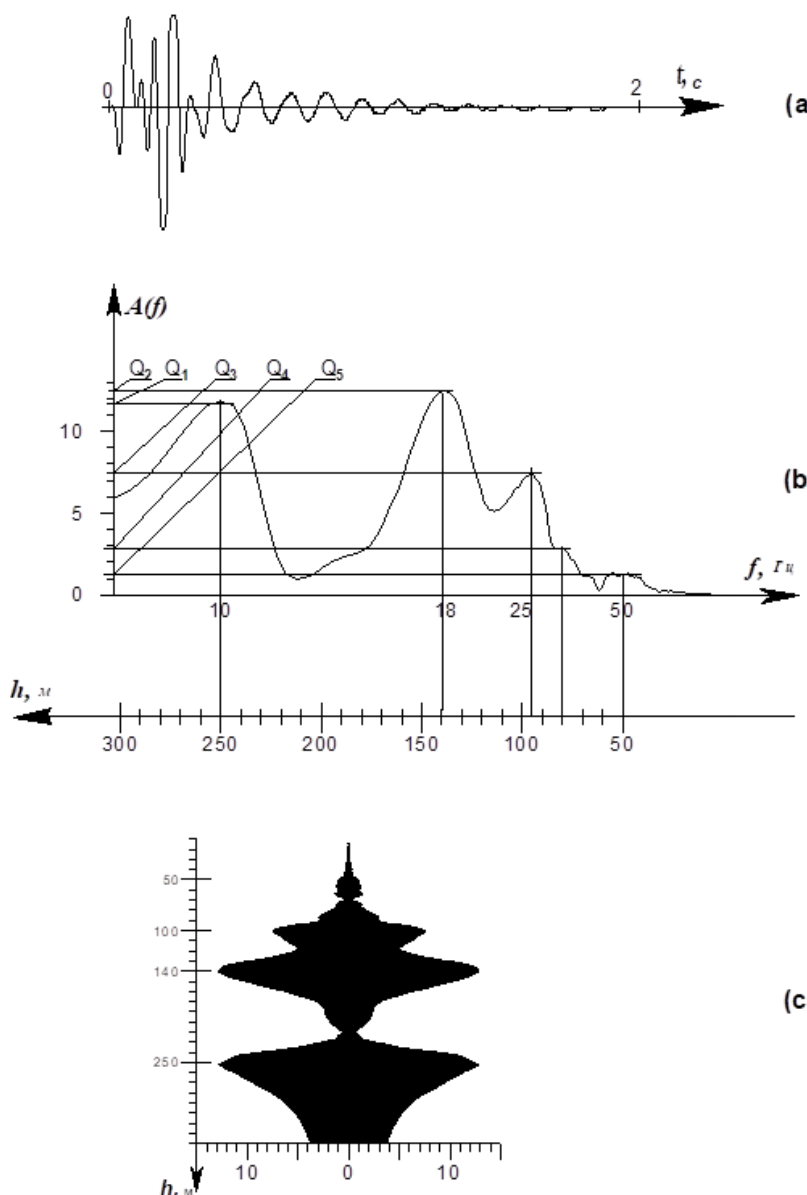


Рис. 1. Схема перехода сейсмосигнала к разрезу массива

Метод георадарного зондирования (ГРЗ)

Радиолокационный метод основан на отражении электромагнитных волн от границ сред с разными электрическими свойствами. Передающая антенна отправляет радиоволны, которые частично отражаются от слоев и возвращаются на поверхность, а другая часть проникает глубже. Время прохождения импульсов определяет глубину залегания слоев. Основные параметры – удельное затухание и скорость распространения волн – определяют глубину зондирования и необходимы для расчета расстояний до границ.

Почвы рассматриваются как диэлектрики с конечной проводимостью, их диэлектрическая проницаемость зависит от частоты и влажности. Глубина проникновения волн зависит от электрического сопротивления и диэлектрической проницаемости грунта. Георадары используют широкополосные сигналы для зондирования подповерхностных слоев. Задача реконструкции заключается в определении распределения электродинамических характеристик среды по глубине на основе наблюдаемых сигналов.

Для решения обратной задачи применяется либо сравнение временных сигналов, либо использование спектров сигналов. Первый подход сложен из-за множества локальных минимумов, второй более перспективен, но требует качественных данных. Преобразование Лапласа позволяет упростить расчеты и повысить эффективность численных методов.

Результаты исследования

В данной главе представлены результаты проведенного исследования, которые являются основой для анализа и интерпретации полученных данных.

Использование метода спектрального сейсмопрофилирования в подземных условиях

На основании полученных исследовательских данных была построена схема подземных горных выработок, интегрированная с результатами спектрального сейсмопрофилирования (рис. 2).

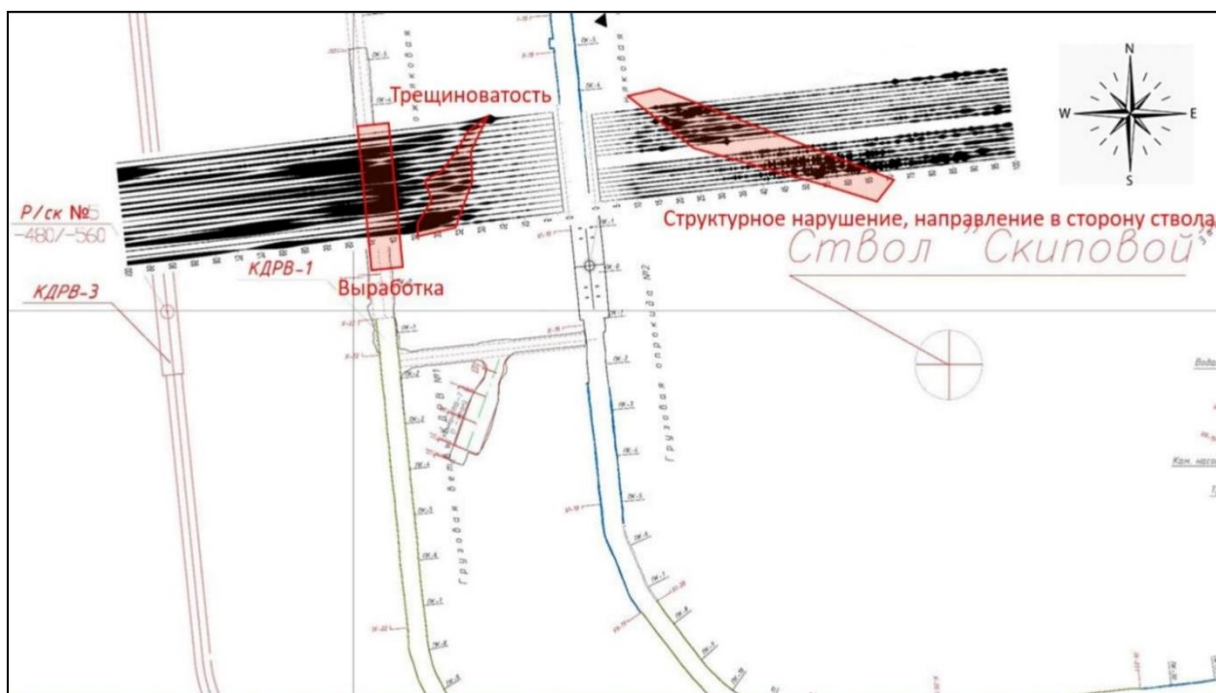


Рис. 2. Схема подземных горных выработок, совмещенная с результатами ССП

В ходе исследовательской работы на данном участке были проведены геофизические исследования по двум профилям. Первый профиль, расположенный в западной части участка, имел протяженность 50 м и глубину исследований 100 м. Второй профиль, находящийся в южной части участка, характеризовался длиной 60 м и аналогичной глубиной исследований – 100 м. Оба профиля располагались параллельно стенкам горной выработки.

В результате анализа первого профиля было установлено наличие зоны трещиноватости горных пород на глубинах от 25 до 35 м, постепенно сужающейся в северном направлении до 1 – 2 м. Дополнительно посредством данного профиля удалось зафиксировать местоположение границ смежной выработки, находящейся на удалении 40 м от экспериментальной области.

Анализ второго профиля выявил присутствие тектонического нарушения на интервале глубин от 50 до 65 м, распространяющегося по всей длине изучаемого участка. Данное разломное образование характеризуется преимущественной ориентацией с запада на восток и демонстрирует относительно стабильную мощность порядка 15 м.

Совместное использование методов спектрального сейсмопрофилирования и георадарного зондирования

В ходе проведения исследований был построен совмещенный разрез по данным метода ССП и метода ГРЗ (рис. 3).

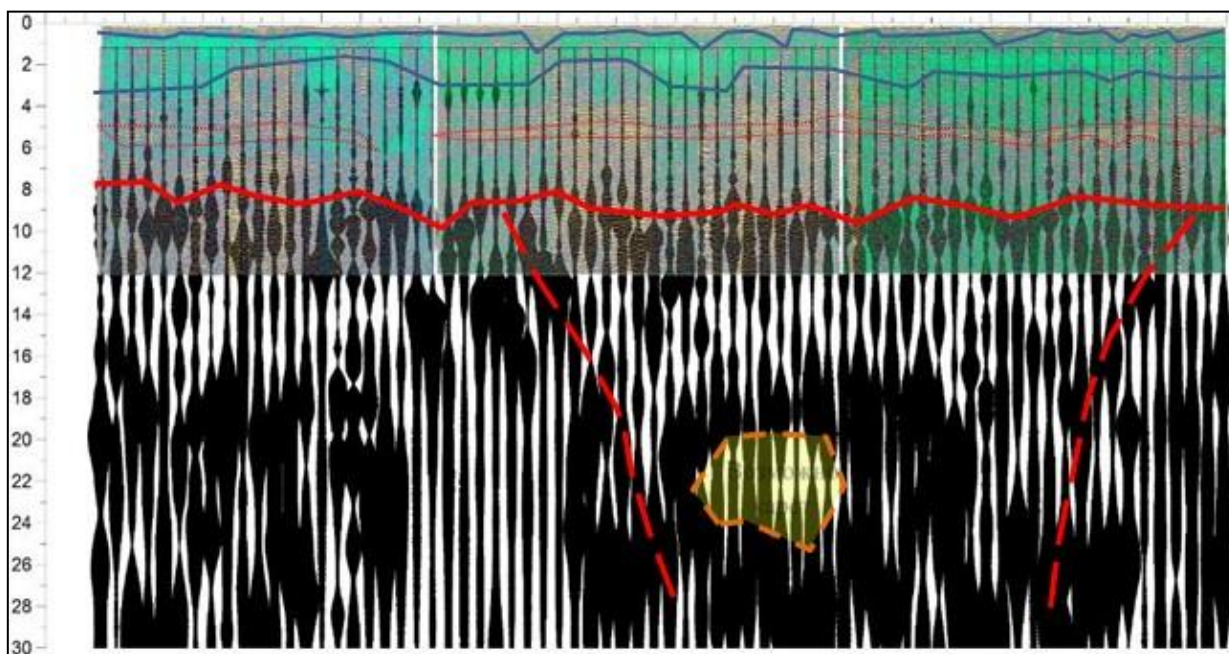


Рис. 3. Совмещенный разрез по данным метода ССП и метода ГРЗ

На исследуемом участке отмечается присутствие слоя техногенных отложений, локализованного на глубинах от 0 до 1–1,5 м. Ниже данного слоя залегают суглинистые породы, простирающиеся до отметок 8–10 м. Граница коренных скальных пород проходит на глубине 10 м и обозначается сплошной красной линией.

Одним из характерных геологических элементов данной территории являются два структурных нарушения, выявленных на глубинах свыше 10 м (субгоризонтальные красные линии). Дополнительно установлено наличие природных пустот в горных породах, отмеченных прерывистыми желтыми линиями, образующими округлый контур.

Обсуждение результатов

В рамках проведенного исследования было доказано, что методы спектрального сейсмопрофилирования и георадарного зондирования обладают высокой эффективно-

стью как при комплексном, так и при автономном применении для анализа геомеханического состояния горных массивов. Данные методики позволяют детально исследовать внутреннюю структуру массива, выявляя распределение зон трещиноватости, местоположение тектонических разломов и наличие карстовых пустот.

Метод спектрального сейсмопрофилирования продемонстрировал особую эффективность в обнаружении глубоких аномалий и тектонических разрывов, что способствует прогнозированию потенциальных зон неустойчивости. В свою очередь, георадарное зондирование обеспечивает высокое разрешение на небольших глубинах, способствуя точной локализации участков с повышенной трещиноватостью и поверхностными гетерогенностями.

Однако каждый из указанных методов имеет свои ограничения. Применение георадарного зондирования затруднено на значительных глубинах и в условиях почвы с высокой проводимостью, где повышенная влажность или солевой состав могут значительно усилить затухание радиосигнала. Спектральное сейсмопрофилирование, наоборот, менее результативно на малых глубинах из-за специфики распространения сейсмических волн. Однако комплексное применение этих методик компенсирует индивидуальные недостатки каждого из них, предоставляя всесторонний анализ геомеханического состояния массива.

Практическое значение применения данных методов заключается в повышении уровня безопасности и повышении производительности горных разработок. Своевременная идентификация зон трещиноватости и тектонических нарушений позволяет оптимизировать планирование маршрутов бурения и принятия профилактических мер по укреплению стен шахт и туннелей, оценку развития оползневых процессов и безопасное размещение объектов недропользования. Следовательно, использование спектрального сейсмопрофилирования и георадарного зондирования становится ключевым элементом устойчивого и безопасного развития горной промышленности.

Заключение

В ходе проведенных исследований было доказано, что методы спектрального сейсмопрофилирования и георадарного зондирования обладают высокой эффективностью как при совместном, так и при раздельном использовании для оценки геомеханического состояния горных массивов. Эти методы позволяют получить подробную информацию о внутренней структуре массива, включая распределение зон трещиноватости, тектонических разломов и карстовых пустот, что способствует повышению безопасности и эффективности горных работ.

Однако оба метода имеют свои ограничения. Георадарное зондирование ограничено в применении на больших глубинах и в условиях высокопроводящих почв, тогда как спектральное сейсмопрофилирование менее эффективно на малых глубинах. Совместное использование этих методов позволяет компенсировать их индивидуальные недостатки и обеспечить более точное представление о состоянии горного массива.

Практическая значимость применения этих методов заключается в своевременном выявлении потенциально опасных зон, разработке превентивных мер по предотвращению аварийных ситуаций и повышении общей устойчивости горных выработок. Их использование способствует оптимизации процессов добычи полезных ископаемых, снижению рисков и увеличению производственных показателей.

Результаты исследования подтверждают, что современные геофизические методы являются ключевыми инструментами для мониторинга геомеханического состояния горных массивов. Дальнейшее развитие и интеграция этих методов откроют новые возможности для углубленного понимания и безопасной эксплуатации природных ресурсов.

Список литературы

1. Новиков А.О., 2023. Математическое моделирование деформирования породных массивов, вмещающих подготовительные выработки угольных шахт, закрепленных с использованием анкерных систем. *Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук*, Т. 10, № 3, С. 78-82. DOI 10.15372/FPVGN2023100312.
2. Ткач С.М., Курилко А.С., Соловьев Д.Е., 2021. Роль теплофизических исследований в обеспечении эффективности и безопасности эксплуатации шахт и рудников криолитозоны. *Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук*, Т. 8, № 1, С. 154-160. DOI 10.15372/FPVGN2021080124.
3. Есина Е.Н., Кирков А.Е., Доскалов А.И., 2021. Оценка геомеханического состояния горнотехнической системы месторождения медно-порфириновых руд Кальмакыр. *Процессы в геосредах*, № 3(29), С. 1212-1217.
4. Рыбак Я., Хайрутдинов М.М., Кузиев Д.А. и др., 2022. Прогнозирование геомеханического состояния массива при отработке соляных месторождений с закладкой. *Записки Горного института*, Т. 253, С. 61-70. DOI 10.31897/PMI.2022.2.
5. An Insight into the Mechanical and Fracture Characterization of Minerals and Mineral Interfaces in Granite Using Nanoindentation and Micro X-Ray Computed Tomography. *Rock Mech Rock Eng* 56, 3359–3375 (2023). <https://doi.org/10.1007/s00603-023-03221-6>
6. Созонтова Е.А., 2024. Учет изменения геомеханических свойств пород по направлениям при оценке устойчивости скважин. *Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле*, № 2, С. 461-470
7. Макаров А.Б., Рассказов И.Ю., Саксин Б.Г. и др., 2016. Геомеханическое обоснование параметров камерной системы разработки при переходе на подземный способ добычи руд. *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*, № 3, С. 27-38.
8. Шевченко М.Д., Мельник В.В., 2023. Исследование геомеханического состояния породного массива в подземных условиях. *Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле*, № 1-1, С. 471-479. DOI 10.46689/2218-5194-2023-1-1-471-479.
9. Мельник В.В., Замятин А.Л., 2024. Оценка точности и информативности геофизических методов для решения задач картирования структурных неоднородностей в шахте. *Проблемы недропользования*, № 1(40), С. 90-101. DOI 10.25635/2313-1586.2024.01.090.
10. Мельник В.В., Далатказин Т.Ш., Замятин А.Л., 2022. Решение задач безопасности ведения подземных горных работ при отработке угольных лав с использованием современных методов геофизики. *Проблемы недропользования*, № 4(35), С. 122-131. DOI 10.25635/2313-1586.2022.04.122.
11. Гликман А.Г., 2002. Физика и практика спектральной сейсморазведки. НТФ "Геофизпрогноз". URL: <http://newgeophys.spb.ru/ru/book/>. (дата обращения: 27.02.2023).

References

1. Novikov A.O., 2023. Matematicheskoe modelirovaniye deformirovaniya porodnykh massivov, vmeshchayushchikh podgotovitel'nye vyrabotki ugol'nykh shakht, zakreplennykh s ispol'zovaniem ankernykh system [Mathematical modeling of deformation of rock massifs containing development workings of coal mines, reinforced using anchor systems]. *Fundamental'nye i prikladnye voprosy gornykh nauk*, Vol. 10, № 3, P. 78-82. DOI 10.15372/FPVGN2023100312.
2. Tkach S.M., Kurilko A.S., Solov'ev D.E., 2021. Rol' teplofizicheskikh issledovaniy v obespechenii effektivnosti i bezopasnosti ekspluatatsii shakht i rudnikov kriolitozony [The role of thermophysical studies in ensuring the efficiency and safety of operation of

mines and pits in the cryolithozone]. *Fundamental'nye i prikladnye voprosy gornykh nauk*, Vol. 8, № 1, P. 154-160. DOI 10.15372/FPVGN2021080124.

3. Esina E.N., Kirkov A.E., Doskalov A.I., 2021. Otsenka geomekhanicheskogo sostoyaniya gornotekhnicheskoi sistemy mestorozhdeniya medno-porfiritovykh rud Kal'-makyr [Assessment of the geomechanical state of the mining system of the Kalmakyr copper-porphyry ore deposit]. *Protsessy v geosredakh*, № 3(29), P. 1212-1217.

4. Rybak Ya., Khairutdinov M.M., Kuziev D.A. i dr., 2022. Prognozirovanie geomekhanicheskogo sostoyaniya massiva pri otrabotke solyanykh mestorozhdenii s zakladkoi [Forecasting the geomechanical state of the massif during the development of salt deposits with backfill]. *Zapiski Gornogo instituta*, Vol. 253, P. 61-70. DOI 10.31897/PMI.2022.2.

5. An Insight into the Mechanical and Fracture Characterization of Minerals and Mineral Interfaces in Granite Using Nanoindentation and Micro X-Ray Computed Tomography. *Rock Mech Rock Eng* 56, 3359–3375 (2023). <https://doi.org/10.1007/s00603-023-03221-6>

6. Sozontova E.A., 2024. Uchet izmeneniya geomekhanicheskikh svoistv porod po napravleniyam pri otsenke ustoichivosti skvazhin [Accounting of changes in geomechanical properties of rocks in directions when assessing well stability]. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Nauki o Zemle*, № 2, P. 461-470

7. Makarov A.B., Rasskazov I.Yu., Saksin B.G. i dr., 2016. Geomekhanicheskoe obosnovanie parametrov kamernoi sistemy razrabotki pri perekhode na podzemnyi sposob dobychi rud [Geomechanical substantiation of the parameters of the chamber mining system during the transition to underground ore mining]. *Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh*, № 3, P. 27-38.

8. Shevchenko M.D., Mel'nik V.V., 2023. Issledovanie geomekhanicheskogo sostoyaniya porodnogo massiva v podzemnykh usloviyakh [Study of the geomechanical state of the rock mass in underground conditions]. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Nauki o Zemle*, № 1-1, P. 471-479. DOI 10.46689/2218-5194-2023-1-1-471-479.

9. Mel'nik V.V., Zamyatin A.L., 2024. Otsenka tochnosti i informativnosti geofizicheskikh metodov dlya resheniya zadach kartirovaniya strukturnykh neodnorodnostei v shakhte [Assessment of the accuracy and information content of geophysical methods for solving problems of mapping structural heterogeneities in a mine]. *Problemy nedropol'zovaniya*, № 1(40), P. 90-101. DOI 10.25635/2313-1586.2024.01.090.

10. Mel'nik V.V., Dalatkazin T.Sh., Zamyatin A.L., 2022. Reshenie zadach bezopasnosti vedeniya podzemnykh gornykh rabot pri otrabotke ugol'nykh lav s ispol'zovaniem sovremennykh metodov geofiziki [Solving the safety problems of underground mining operations during coal face development using modern geophysical methods]. *Problemy nedropol'zovaniya*, № 4(35), P. 122-131. DOI 10.25635/2313-1586.2022.04.122.

11. Glikman A.G., 2002. Fizika i praktika spektral'noi seismorazvedki [Physics and praxis of spectral seismic exploring]. NTF "Geofizprognoz". URL: <http://newgeophys.spb.ru/ru/book/>. (data obrashcheniya: 27.02.2023).