

ОБОСНОВАНИЕ СИСТЕМЫ КОМПЛЕКСНОГО МОНИТОРИНГА ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ СРЕДЫ МЕСТОРОЖДЕНИЯ КАЛИЙНЫХ СОЛЕЙ

М.В. Дьяконов¹, И.Ю. Герасимова², Э.Е. Малеев², Ю.И. Степанов², Д.Ю. Шулаков²

¹ ПАО «Уралкалий, Березники, Россия

² Горный институт Уральского отделения РАН, Пермь, Россия, e-mail: maleev37@yandex.ru

Аннотация: Разработан проект комплексного мониторинга состояния породного массива в процессе эксплуатации высокогорного месторождения калийных солей, отличающегося весьма сложными и специфическими горно-геологическими условиями. В настоящее время отработка промышленных пластов осложнена наличием водопроявления, вскрытого при проходке одной из панелей шахтного поля рудника. По результатам обработки и комплексного анализа геолого-геофизических данных, полученных в условиях доизучения территории, определены особенности строения перекрывающей и продуктивной толщ месторождения, выделены потенциально опасные участки и определена степень их влияния на безопасность освоения месторождения. Положение и свойства участков с выявленными на основании комплексного анализа геофизических материалов осложнениями разреза учитываются при геомеханической оценке опасности нарушения сплошности водозащитной толщи. Проведенные исследования и всесторонний анализ данных позволили сформулировать рекомендации по параметрам ведения горных работ на перспективных участках рудного поля. Система комплексного мониторинга, создаваемая с целью контроля состояния геологической среды для обеспечения безопасности ведения горных работ и снижения вредного воздействия на окружающую среду, включает сеть базовых профилей для объектов с разной степенью рисков нарушения сплошности водозащитной толщи и предусматривает две системы режима наблюдений.

Ключевые слова: геологическая среда, водозащитная толща, система комплексного мониторинга, потенциально опасный участок, контроль состояния среды, породный массив, нарушение прочности пород, техногенный фактор.

Для цитирования: Дьяконов М. В., Герасимова И. Ю., Малеев Э. Е., Степанов Ю. И., Шулаков Д. Ю. Обоснование системы комплексного мониторинга геологической среды месторождения калийных солей // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2025. – № 3. – С. 136–152. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_3_0_136.

Justification of integrated monitoring system for geological environment of potassium salt deposit

M.V. Diakonov¹, I.Y. Gerasimova², E.E. Maleev², Y.I. Stepanov², D.Y. Shulakov²

¹ PJSC Uralkali, Berezniki, Russia

² Mining Institute of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,
Perm, Russia, e-mail: maleev37@yandex.ru

Abstract: A project system of integrated monitoring is developed for rock mass in the course of mining of a high-mountain potassium salt deposit with extremely difficult and specific geological conditions. The present-day exploitation of commercial-value seams is complicated by water ingress exposed during heading operations in an extraction panel within the test mine field. From the results of processing and comprehensive analysis of geological and geophysical data accumulated in additional appraisal of the area, the structural features of the productive and overlying strata are determined, the potentially hazardous sites are identified, and their impact on the mining safety is estimated. The positions and sizes of sites with complications revealed in the geological section by the integrated study of geophysical data are taken into account in geomechanical evaluation of risks of the impermeable strata discontinuity. The accomplished research and the comprehensive data analysis made it possible to develop recommendations on mining technologies on promising sites of the test mine field. The integrated monitoring system of geological environment control aimed at reduction of adverse environmental impact and at enhancement of mining safety includes a network of base observation lines for the impermeable strata areas of different discontinuity risks, and provides two systems of observation modes.

Key words: geological environment, impermeable strata, integrated monitoring system, potentially hazardous area, condition monitoring, rock mass, rock strength loss, manmade factor.

For citation: Diakonov M. V., Gerasimova I. Y., Maleev E. E., Stepanov Y. I., Shulakov D. Y. Justification of integrated monitoring system for geological environment of potassium salt deposit. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2025;(3):136-152. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_3_0_136.

Введение

Разработка месторождений водоразводимых полезных ископаемых шахтным способом неразрывно связана с необходимостью защиты горных выработок от проникновения пресных или слабоминерализованных вод. Опыт эксплуатации таких месторождений показывает, что основными причинами возникновения аварийных ситуаций, связанных с проникновением рассолов в калийные и соляные рудники, могут быть недостаточная информированность об особенностях геологического строения и/или необоснованная технология ведения горных работ, принятая на основе недостаточно достоверных данных [1, 2].

Снизить риски возникновения аварийных ситуаций в пределах рудников (минимизировать материальные потери) позволяют системы комплексного мониторинга, формируемые с учетом специ-

фических особенностей конкретных участков шахтных полей. Такие системы базируются на характеристиках горно-геологической, гидрогеологической, морфологической, экологической, экономической и др. составляющих и учитывают геомеханические показатели, а также технические и технологические аспекты разработки месторождения. Обоснование состава рационального комплекса мониторинговых наблюдений основывается на расчетах геологической и экономической эффективности методов (их комплексов) и анализе его изменения в зависимости от ставящихся задач [3].

Базовой функцией систем комплексного мониторинга является контроль состояния геологической среды и прогноз ее изменения под влиянием природных и техногенных факторов для обеспечения безопасности ведения горных работ

и снижения вредного воздействия на окружающую среду, а также своевременное информирование компетентных органов для принятия оперативных мер по предупреждению негативных последствий.

Основанием для проведения исследований, представленных в статье, является необходимость разработки программы комплексного мониторинга и рекомендаций по безопасному ведению горных работ для месторождения калийных солей, расположенного в горной местности. Программа формировалась в условиях доизучения горно-геологических условий месторождения, одной из основных задач которого было получение геолого-геофизических данных для выявления особенностей строения перекрывающей и продуктивной толщ и определение степени их влияния на безопасность освоения месторождения.

Общая характеристика месторождения

Разведанное в 60-х годах прошлого века месторождение калийных солей расположено в горной местности (рис. 1). Протяженность рудного поля с юго-за-

пада на северо-восток составляет 14 км, ширина колеблется от 1,5 до 3,0 км.

Район расположен в ответвлении Тянь-Шаньской горной системы, в орографическом отношении это высокогорная область, представленная грядой возвышенностей, склоны которых изрезаны сетью поперечных ущелий. Максимальная абсолютная отметка рельефа в пределах месторождения составляет 1400 м, минимальная — 830 м.

Территория отличается весьма сложными и специфическими горно-геологическими условиями. Продуктивный калиеносный горизонт приурочен к галитовой (соленосной) подцвете гаурдакской свиты (J3gd) киммеридж-титонского возраста и представлен каменной солью и сильвинитом, перекрытыми терригенными породами верхнеюрского, нижнемелового и четвертичного возраста [4].

Водозащитная толща (ВЗТ) сложена каменной солью с редкими пластами и прослоями ангидрита и бедного сильвинита, малая мощность последних, а также бедность сильвинитов других пластов позволяют считать ее однородной по физико-механическим свойствам. Распределение мощности ВЗТ в пределах

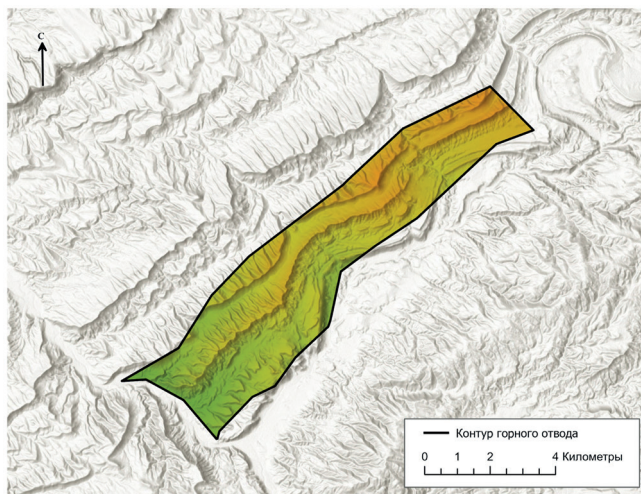


Рис. 1. Обзорная карта

Fig. 1. Overview map

участка коррелирует с общим погружением надсолевого комплекса в северо-западном направлении.

Месторождение расположено в пределах северо-западной крупной брахиантеклинальной складки, с размытой центральной частью. В ядре породы верхнеюрского возраста выходят непосредственно на земную поверхность, местами — под мощным чехлом четвертичных отложений. Региональный структурный анализ и структурное дешифрирование линеаментов позволили выявить системы тектонических нарушений, наличие которых подтверждено в ходе эксплуатационных работ.

Осложненная тектоникой блоковая структура месторождения, характерная как для покровных отложений, так и для соляной толщи, предопределила отсутствие четко выраженных региональных водоносных и водоупорных горизонтов, хотя подземные воды присутствуют как в перекрывающих, так и в подстилающих соляную толщу интервалах разреза. В надсоляной толще выделяются приуроченные к разделенным тектоническими нарушениями блокам локальные водоносные горизонты разной степени водообильности. Следует отметить, что поверхность соляной толщи осложнена наличием закарстованных зон, ширина и глубина которых достоверно неизвестна [5]. Процессы подземного выщела-

чивания солей в настоящее время происходят медленно, но непрерывно на всей площади соляного зеркала.

Перечисленные особенности геологического строения оказывают негативное влияние на безопасность ведения подземных горных работ.

Добыча калийных солей на месторождении ведется с 2010 года [6].

Промышленный пласт вскрыт с поверхности тремя главными выработками — наклонными штольнями. Минимальное значение глубины залегания промышленного пласта на участке первоочередной отработки составляло 220 м. По мере продвижения фронта горных работ в северо-западном направлении данный параметр, напрямую определяющий величину горного давления, постепенно увеличивается. На настоящий момент (2024 г.) глубина проведения горных работ достигает более 700 м от дневной поверхности.

В 2012 г. при проходке эксплуатационно-разведочной выработки в направлении одной из панелей шахтного поля рудника вскрыто водопроявление, представляющее в настоящее время угрозу для безопасной отработки месторождения (см. рис. 2).

Природа водопроявления связана преимущественно с подземными водами, поступающими, вероятно, через систему тектонических нарушений из надсолевой

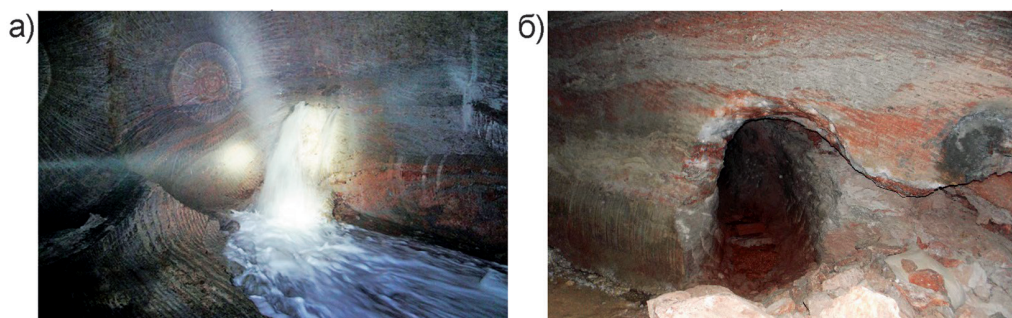


Рис. 2. Вскрытое водопроявление (а) и полость (б) в эксплуатационно-разведочной выработке
Fig. 2. Water leakage (a) and cavity (b) in a operational and exploration mine working

толщи пород [7]. Об этом свидетельствует растянутый по времени процесс образования в шахте соляных карстовых полостей (см. рис. 2, б), активизировавшийся после вскрытия водоупорной толщи и последующего многократного возрастания интенсивности фильтрации.

Таким образом, несмотря на относительно короткий период ведения горных работ (менее 15 лет), в пределах высокогорного месторождения отмечается интенсификация негативных инженерно-геологических процессов, вызванная возросшим техногенным влиянием на недра.

Формирование программы комплексного мониторинга: локализация потенциально опасных участков

Объективная оценка техногенного влияния на недра при разработке месторождений калийных солей выполняется в рамках программ комплексного мониторинга геологической среды. Мониторинг предусматривает сбор и получение геолого-геофизических данных, обработку материала, анализ и хранение информации о состоянии геологической среды в разные периоды времени, оперативную разработку рекомендаций по снижению последствий ведения горных работ. На основе результатов мониторинга могут быть установлены тенденции развития различных инженерно-геологических процессов, вскрыт их механизм и разработаны способы минимизации отрицательных эффектов [8–10].

Традиционно формирование комплексов мониторинговых наблюдений в пределах месторождений водорастворимых полезных ископаемых выполняется на основе анализа соответствия их возможностей ставящимся задачам, определяемым на основе имеющейся горно-геологической информации [3].

Как указывалось ранее, рассматриваемое месторождение разрабатывает-

ся подземным способом с 2010 г. При этом следует отметить недоизученность горно-геологических условий по широкому спектру вопросов, что, согласно современным представлениям и нормативным документам оценки рисков нарушения сплошности ВЗТ, не соответствует требованиям по безопасному и рациональному освоению недр. Слабо исследованы аспекты тектонической нарушенности массива, гидрогеологии, карстообразования, строения и состояния ВЗТ в частности и горного массива в целом, корреляции промышленных горизонтов, газоносности солей, физико-механических свойств силвинитового пласта и вмещающих пород, многие другие. Эти исходные данные лежат в основе системы комплексного мониторинга геологической среды. Ее разработка и внедрение позволяют обеспечить безопасное и рациональное освоение недр.

Основываясь на многолетнем опыте решения подобного сочетания задач, реализуемого в пределах Верхнекамского месторождения солей [3, 9], базовыми направлениями программы первоочередных исследований являются:

- геологические исследования выработанного пространства с оценкой структурных особенностей продуктивных пластов;
- изучение гидрогеологических условий на основе комплекса методов, включающих бурение гидрогеологических скважин и отбор керн для оценки водно-физических свойств пород;
- бурение разведочных скважин с комплексом геофизических исследований, а также получением данных для химического, физико-механического, гидрогеологического опробования (повышение плотности разведочной сети с целью получения достоверных исходных данных для проектирования горных работ; заверки зон тектонических нарушений, выявленных дистанционными методами);

- комплексные геофизические исследования (изучение строения и строения соляной залежи и надсоляных отложений; локализация неоднородностей, влияющих на безопасность ведения горных работ, оценка водно-физических параметров надсоляных отложений, др.);
- геомеханическая интерпретация результатов геолого-геофизических исследований.

Для рассматриваемой территории в рамках геологического направления выполнен комплекс полевых и лабораторных исследований, включающий бурение исследовательских скважин, литолого-стратиграфическое дешифрирование космоснимков, линейментный и структурно-геологический анализ, изучение вещественного состава соляных пород и их газоносности. В результате реконструированы тектонические события, проявившиеся в характере строения разреза месторождения. Это многократное торшение соляной толщи, во время накопления солей разбившее залежь на несколько структурных этажей, а также складчатость, приведшая к формированию, а затем гравитационному оседанию брахиантиклинальной складки. С последним связывается проникновение в соляную толщу поверхностных вод, вызвавших перекристаллизацию солей, частичное замещение сильвинитов и образование послонных водопроницаемых зон. Установлено, что надсолевая толща и верхняя часть солевой осложнены также молодыми субвертикальными разрывными нарушениями, тяготеющими к осевым зонам складок второго порядка. Минералогический состав нерастворимого остатка, содержание брома, рубидия и редких земель отражают вторичную природу сильвинитов, сформировавшихся по карналитовым пластам.

В рамках второго направления доизучения месторождения проведена гидрологическая съемка и выполнено бу-

рение скважин с отбором образцов для определения водно-физических свойств пород. В результате установлена зависимость между водопритоком в рудник и количеством атмосферных осадков. Наиболее опасным участком с точки зрения проникновения пресных или слабоминерализованных вод в шахту является осевая часть антиклинальной складки в центральной части шахтного поля.

Основная цель геофизических исследований в пределах действующего рудника — выявление аномальных геологических особенностей ВЗТ, определение степени их опасности, оценка и контроль напряженно-деформированного состояния горного массива. Согласно нормативной документации, регламентирующей проектирование, ведение горных и геологоразведочных работ, меры защиты калийных рудников от затопления надсолевыми водами и меры охраны подрабатываемых объектов, обязательной к выполнению в пределах шахтных полей Верхнекамского месторождения [8], обосновано использование сейсмоакустических, гравиметрических и электрометрических методов разведочной геофизики в комплексе с сейсмологическим контролем территории. Методики геофизических исследований, организация работ, интерпретация материалов, критерии выделения геофизических аномалий, комплексный анализ данных базируются на актуальных представлениях о геологической модели месторождения. В рамках решения задач по прогнозированию особенностей геологического строения в пределах отвода высокогорного месторождения выполнены профильные сейсмо- и электроразведочные наблюдения, а также площадная гравиметрическая съемка. С целью параметрического обеспечения интерпретационных заключений проведены скважинные геофизические исследования.

Для каждого из примененных в пределах горного отвода методов разведочной геофизики по негативным изменениям контролируемых параметров выделен ряд участков, отличающихся по своим физическим свойствам от вмещающего массива пород.

По результатам обработки и интерпретации данных малоуглубинной сейсморазведки в качестве основных признаков предполагаемых осложнений волнового поля, как техногенного, так и природного характера [11 – 13], рассматриваются: нарушение корреляции опорных отражающих горизонтов, снижение значений эффективных и интервальных скоростей; повышенное затухание сейсмической записи. Согласованность негативных изменений рассматриваемых параметров волнового поля отражается на разрезах комплексного параметра.

Согласно априорной геологической информации о строении района работ, локализованные зоны осложнений могут быть связаны с проявлениями тектонических нарушений и литологической изменчивости (зоны размыва, замещения) в исследуемом интервале геологическо-

го разреза (рис. 3). При этом, учитывая близость к поверхности растворимых (соляных) пород в пределах рудного поля, предполагается возможное наличие областей палеокарста, связанного с проникновением водных потоков вглубь соляных отложений по тектоническим нарушениям [14].

В результате интерпретации данных гравиразведки, с учетом плотностного строения изучаемого массива, пересчета аномалий силы тяжести на горизонтальную плоскость и вычисления различных трансформант поля, отчетливо выделяются три отрицательные аномалии силы тяжести (рис. 3): на северо-востоке, в центре и на юго-западе территории. Они пространственно согласуются с рядом зон сейсморазведочных аномалий. В целом отмечается «сквозной» характер предполагаемых разуплотнений — через весь исследуемый интервал геологического разреза.

Другим видом опасных зон могут являться области больших градиентов изменения трансформант поля пород на северо-востоке площади, где контактируют массы с резко различающейся плот-

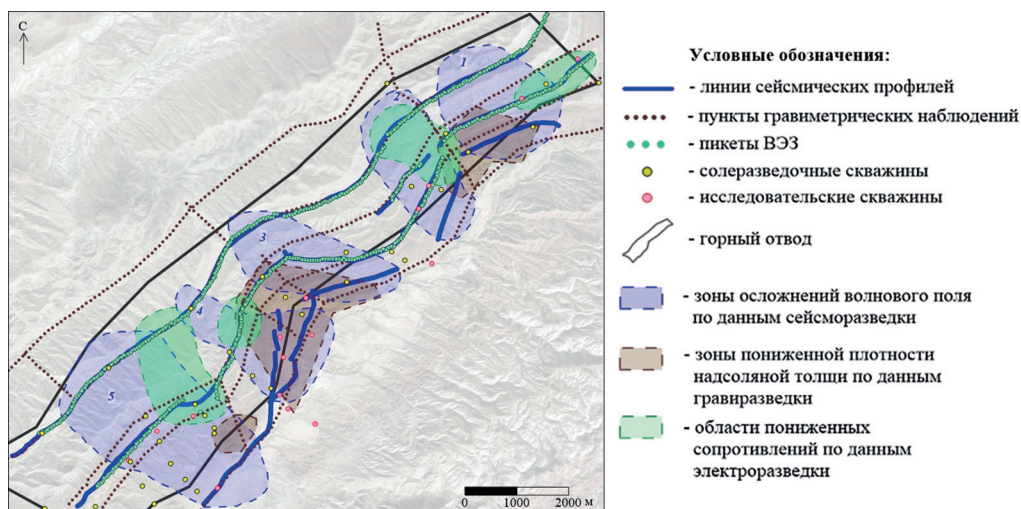


Рис. 3. Схема результатов интерпретации геофизических исследований

Fig. 3. Interpretation of the geophysical survey results

ностью и, следовательно, деформационными свойствами. Здесь при обработке горного массива, очевидно, могут возникать дополнительные механические напряжения, приводящие к повышению трещиноватости и снижению прочности пород [15].

Также, учитывая особенности геоморфологии и геологического развития территории, можно предположить, что выделяемые в гравитационном поле мелкие отрицательные аномалии отражают наличие разуплотненных участков, сформированных в зоне гипергенеза в виде локальных зон трещиноватости.

Электроразведочные исследования включали профильные работы методом зондирования становлением поля в ближней зоне (ЗСБ) и вертикального электрического зондирования (ВЭЗ). По результатам обработки и интерпретации данных выделяется несколько зон повышенной проводимости сквозного характера, частично совпадающих с областями сейсмических и гравитационных осложнений.

В пределах исследуемой территории прослеживается общий рост величин сопротивлений в юго-восточном направлении, что связано с наклонным залеганием слоев и выходом на поверхность пород с разным литологическим составом. При этом переходы от высокоомных областей к участкам с относительно невысокими значениями сопротивлений характеризуются резкими границами, что указывает на сложное неоднородное строение пород, слагающих разрез, а также наличие трещиноватых обводненных зон и разрывных нарушений.

Исходя из того, что в большинстве случаев ослабленным участкам соответствуют зоны пониженных сопротивлений, в границах исследуемой территории выделен ряд областей. Они обусловлены [16] наличием в разрезе участков с признаками литологической изменчивости,

зонами трещиноватых обводненных пород на юго-востоке территории, полем с повышенной плотностью признаков дизъюнктивных нарушений в центральной части. Подобная приуроченность признаков к зоне влияния очистных работ позволяет предположить существенную техногенную составляющую в их формировании.

Таким образом, по совокупности негативных изменений геофизических параметров в пределах горного отвода исследуемого месторождения наиболее достоверно выделяется три области (см. рис. 3):

1) на северо-востоке — зоны № 1 и № 2 сейсморазведочных аномалий, характеризующиеся пониженными значениями скорости и плотности, а также удельного электрического сопротивления;

2) в центре, на участке первоочередной отработки — зона № 4 сейсморазведочных аномалий с аналогичными признаками по негативным изменениям всех трех составляющих;

3) на юго-западе площади работ, где отмечается снижение значений упругих параметров при противоречивом поведении электрометрических параметров от незначительного понижения к преобладающему повышению значений.

Подобные сочетания рассматриваемых геофизических параметров позволяют предположить понижение прочностных свойств в целом для надсоляной и соляной толщ на всех трех участках, при этом на первых двух имеет место реализация негативных гидрогеологических процессов, а для третьего на данный момент подобная тенденция отсутствует. Геологическая природа выявленных областей связана с зонами наиболее активного проявления подземного выщелачивания, расслоения и обрушения.

Результаты цифровой обработки и комплексной интерпретации геофизиче-

ских данных подтверждены бурением. Встречены сильнодислоцированные участки и зоны интенсивного тектонического перетирания, указывающие на развитие зон трещиноватости и разломов. Отмечается кавернозность с кальцитовыми стяжениями, желваковость и прожилковатость гипсов, что свидетельствует о подверженности толщи тектоническому влиянию. Установлены признаки вторичных преобразований, обусловленных карстовыми и суффозионными процессами.

Положение и свойства участков с выявленными на основании комплексного анализа геофизических материалов осложнениями разреза учитываются при геомеханической оценке опасности нарушения сплошности ВЗТ. Для параметрического обеспечения геомеханической модели проведены экспериментальные исследования механических показателей соляных пород в условиях одноосного сжатия и одноосного растяжения, получены прочностные и деформационные показатели предоставленных разновидностей горных пород. Калибровка геомеханической модели основывалась на оценке скоростей оседаний земной поверхности, полученных методом радарной интерферометрической съемки спутника Sentinel в ИФЗ РАН [17].

Геомеханический анализ состояния ВЗТ по двум разрезам шахтного поля рудника на участках с максимальными негативными изменениями комплекса геофизических параметров, включающий как текущую, так и прогнозную критериальную оценки безопасных условий подработки, позволил получить следующие основные результаты.

Уточненная оценка состояния ВЗТ, выполненная по деформационным и прочностным критериям с учетом геофизических исследований, показала, что наиболее опасной на настоящий момент

является геомеханическая ситуация в пределах опытной панели в центральной части шахтного поля, соответствующая зоне № 4 сейсморазведочных аномалий (см. рис. 3).

На основании комплексной интерпретации геолого-геофизических и гидрогеологических исследований, а также с учетом геомеханических оценок в пределах высокогорного месторождения калийных солей выделяются группы объектов разной категории опасности возможного нарушения сплошности ВЗТ.

Категория степени опасности объектов мониторинга, набор контролируемых параметров, периодичность их оценивания определяются контрастностью негативных изменений структурно-физических параметров породного массива, обусловленной как природными, так и техногенными факторами. Все указанные аспекты учитываются при разработке программы мониторинга, формируемой с целью контроля состояния геологической среды для обеспечения безопасности ведения горных работ.

Проект программы комплексного мониторинга: ключевые аспекты

Как показывает практика функционирования систем комплекса мониторинговых исследований в пределах Верхнекамского месторождения калийных и магниевых солей, наиболее доступными для контроля параметрами являются [8, 9, 18]: деформации земной поверхности, сейсмические события, уровни подземных и поверхностных вод, геофизические аномалии.

Согласно современным представлениям и нормативным документам, в пределах рассматриваемого месторождения по степени риска нарушения сплошности ВЗТ выделяются группы объектов первой и второй категории опасности.

К первой группе следует отнести участок первоочередной отработки в цент-

ральной части шахтного поля, где на сегодняшний день ведутся горные работы. Здесь выделена зона № 4 сейсморазведочных аномалий с максимальными негативными изменениями волнового поля. Отмечаются пониженные значения скорости, плотности и удельного электрического сопротивления. Здесь же наблюдаются ускоренные оседания земной поверхности и (по геомеханической оценке) нарушена устойчивость ВЗТ, что проявляется в стабильных водопритоках в рудник начиная с 2012 г.

Вторая группа включает два участка, в пределах которых система мониторинга должна быть развернута при начале ведения горных работ. Первый участок — на северо-востоке месторождения (зоны № 1 и № 2 аномалий сейсморазведки), характеризующиеся пониженными значениями всех физических параметров. Второй участок — на юго-западе площади работ, где отмечается снижение значений упругих характеристик при противоречивом поведении электрометрических параметров от незначительного понижения к преобладающему повышению значений (зона сейсморазведочных аномалий № 5). Сочетания рассматриваемых геофизических параметров позволяют предположить понижение прочностных свойств в целом для надсоляной и соляной толщ на всех участках, при этом на северо-востоке возможно более активное проявление негативных гидрогеологических процессов, чем на юго-западе.

В процессе ведения мониторинговых наблюдений возможен перевод отдельных объектов второй группы в первую. Периодичность исследований для объектов 1 категории опасности — не реже 1 раза в месяц, для сейсмологического мониторинга — постоянно. В случае нарастания скоростей изменения контролируемых параметров периодичность может меняться. Для объектов второй

группы повторяемость наблюдений, в соответствии с нормативными требованиями, определяется ходом ведения горных работ и сопутствующими изменениями состояния породного массива.

Состав комплекса мониторинговых методов для объектов первой и второй категорий опасности включает основные и дополнительные. К основным относятся: режимный контроль оседаний земной поверхности по профильным линиям и сети реперов, площадной сейсмологический контроль, профильные и площадные геофизические наблюдения, гидрогеологические наблюдения. В качестве дополнительного инструмента могут применяться профильные и скважинные газогеохимические наблюдения, а также площадной контроль сдвижений земной поверхности с использованием спутниковой радарной интерферометрической технологии.

Для режимного контроля оседаний земной поверхности в районе участка первоочередной отработки в центральной части шахтного поля предлагается заложение по профильным линиям групп грунтовых реперов (рис. 4), предназначенных для определения закономерностей изменения параметров процесса сдвижения земной поверхности во времени и в пространстве. Результаты ежемесячных наблюдений (оседания и скорости оседаний, горизонтальных сдвижений реперов, горизонтальных и вертикальных деформаций), выполняемых в соответствии с нормативными документами, являются основой для прогнозирования ожидаемых оседаний и деформаций земной поверхности. При наличии прогноза о потенциально-опасных сдвижениях рекомендуемая сеть должна дополняться наблюдательными станциями.

Профильные и площадные геофизические наблюдения, необходимые для локализации возможных зон разрушения породного массива, включают обязатель-

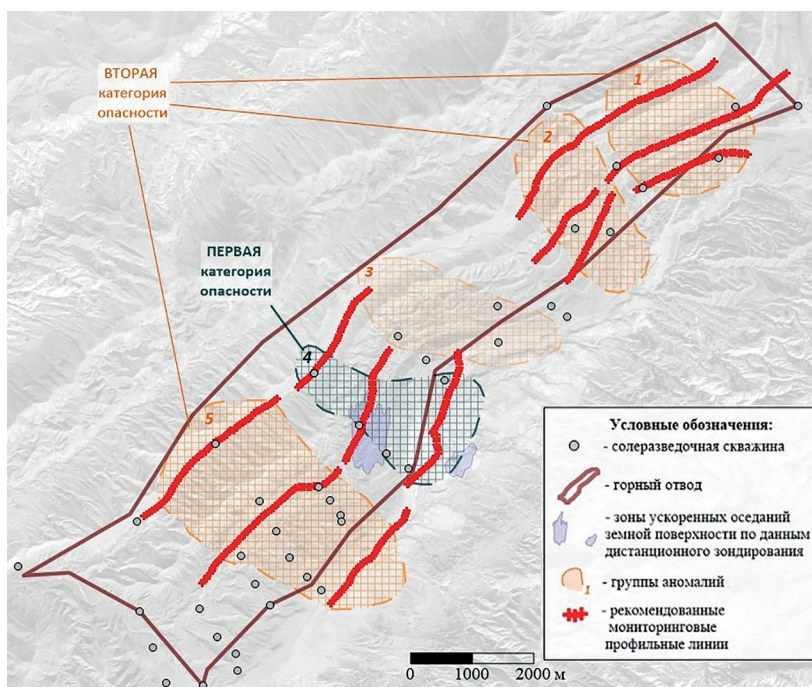


Рис. 4. Схема рекомендуемой сети мониторинговых профильных линий
 Fig. 4. Recommended layout of monitoring profile lines

ный комплекс сейсморазведочных и электроразведочных исследований и дополнительные гравиразведку, сейсмоакустику, георадар. Рекомендуется включить в мониторинговые работы базовые линии профилей (рис. 4), совмещенные с маркшейдерскими. В случае активизации развития негативных процессов, нарушающих устойчивость породного массива, детальность наблюдений повышается за счет дополнительных профильных линий, проектируемых с учетом информации по другим видам мониторинга.

Сейсморазведочные исследования рекомендуется выполнять по методике общей глубинной точки, электроразведочные — методом вертикального электрического зондирования. Для расчленения геологического разреза в интервале глубин до 100 м в районе особо ответственных поверхностных объектов возможно применение сейсмических исследований в акустическом диапазоне частот.

Участки совпадения негативных изменений сейсморазведочных параметров с отрицательными аномалиями удельного электрического сопротивления следует рассматривать как наиболее проблемные для сохранности ВЗТ.

В условиях сложного рельефа и невозможности реализации профильных сейсмо- и электроразведочных исследований возможно применение мониторинговых гравиразведочных наблюдений. Для контроля возможных деформаций приповерхностных отложений (до 3—5 м) целесообразно применять георадарное профилирование.

Площадной сейсмологический контроль является неотъемлемой составляющей программы комплексного мониторинга, позволяя лоцировать очаги динамических событий и прогнозировать реализации критических ситуаций, связанных с возможностью внезапного обрушения пород или вызванных длитель-

ными процессами разрушения массива. Для адекватной оценки сейсмической опасности, контроля отклика массива горных пород на техногенное воздействие и обеспечения безопасной и эффективной отработки абсолютно необходимым представляется создание локальной системы сейсмического мониторинга, позволяющей регистрировать как природную, так и наведенную сейсмичность в окрестностях горных выработок и своевременно принимать управляющие решения по корректировке планов ведения горных работ (рис. 5).

Для обеспечения равномерного и эффективного покрытия в пределах всей контролируемой территории, с учетом состояния разработки, рекомендуемая

система сейсмологического мониторинга включает в себя только сеймопавильоны, расположенные на земной поверхности, с автономным питанием, объединенные при помощи технологии Wi-Fi в mesh-сеть.

На основании цифровой модели рельефа местности, с учетом предельных регистрационных возможностей рекомендуемой аппаратуры для уровня горных выработок, доступности, подобрано такое расположение сеймопавильонов, чтобы они отражали временную динамику микросейсмической активности (количество событий и выделение энергии), как в целом для шахтного поля, так и для потенциально опасных участков. Проектом предусмотрена возможность

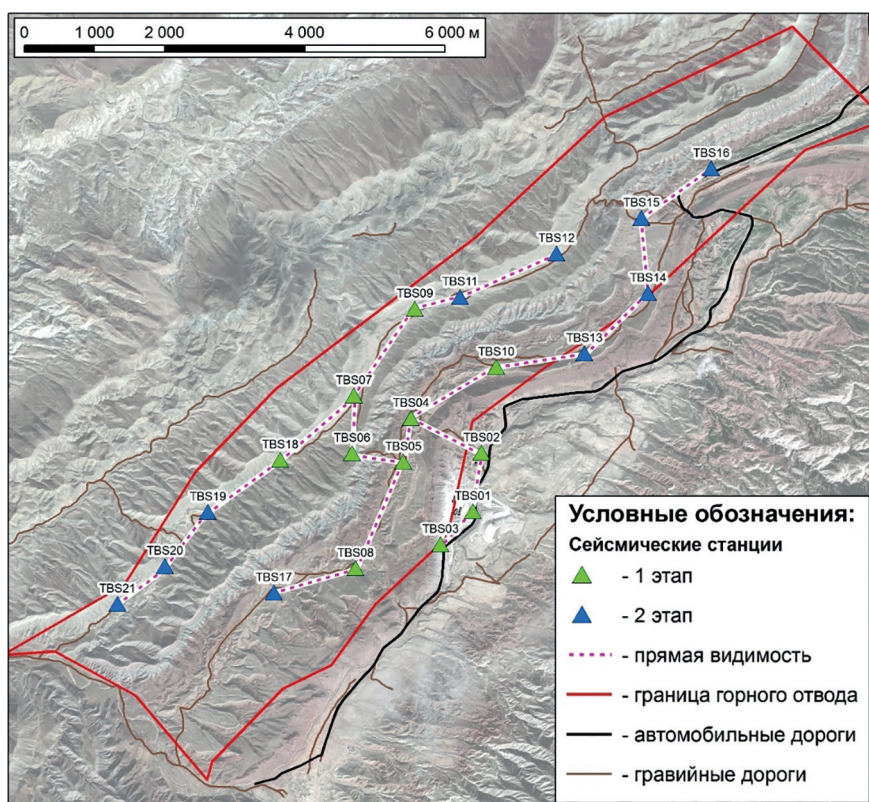


Рис. 5. Схема пространственного расположения сеймопавильонов на территории высокогорного месторождения

Fig. 5. Spatial layout of seismic stations in the territory of a highland mineral occurrence

поэтапного развития системы сейсмологического мониторинга, по мере продвижения фронта горных работ. Предлагаемая конфигурация обеспечивает уверенную регистрацию сейсмических событий с магнитудой $M > -0,2$ практически для всей территории месторождения, а для большей части минимальная регистрируемая магнитуда составляет $-0,4$ и менее. Эти величины соответствуют очаговой зоне размером порядка 10 м и сейсмической энергии от 500 до 1500 Дж. Как показывает опыт работы на других калийных рудниках [19, 20], подобной чувствительности достаточно для того, чтобы выявить негативные процессы, связанные с разрушением горных пород, на ранней стадии их развития.

Положение и свойства участков с выявленными на основании комплексного анализа геофизических материалов осложнениями разреза учитываются при геомеханической оценке опасности нарушения сплошности водозащитной толщи.

С целью изучения гидродинамического и гидрохимического режима подземных и поверхностных вод для предоставления исходных данных к комплексной (совместно с другими видами мониторинга) оценке развития процесса растворения пород, контролю целостности ВЗТ в проект мониторинга включены режимные гидрогеологические наблюдения за уровнями и химическим составом подземных вод по сети скважин и гидрологических пунктов. Объектом исследований является зона активного водообмена, в пределах которой должны изучаться природно-техногенные изменения как индикаторы процессов, представляющих потенциальную опасность для рудника. В состав гидрогеологического мониторинга также входит подсистема контроля рассолопроявлений в горных выработках (горно-капитальных, горно-подготовительных, разведочных,

разрезных, выработки, вокруг целиков и др.). Периодичность наблюдений зависит от фаз водного режима и развития аварийной ситуации.

Профильные и скважинные газеохимические наблюдения проводят по базовым линиям геофизических профилей с целью оценки и контроля флюидопроницаемости ВЗТ на участках, потенциально опасных по нарушению ее сплошности, методом газеохимического зондирования. Как показывает опыт подобных исследований, к числу наиболее информативного показателя, характеризующего поступление миграционных компонентов из соляной части разреза, относится метан, являющийся наиболее миграционно-способным компонентом рудничной атмосферы.

На этапе организации мониторинга до начала регулярных режимных геодезических наблюдений оседаний земной поверхности по профильным линиям групп грунтовых реперов как дополнительный метод может быть рекомендован площадной мониторинг оседания земной поверхности подработанной территории, основанный на сопоставительном анализе двух радарных сцен, снятых во временном интервале. Этот метод, применяемый как неотъемлемая составляющая программы наблюдения за состоянием потенциально опасных участков в пределах Верхнекамского месторождения солей, позволяет получать «портрет» фазовых отличий двух снимков (интерферограмма), из которого затем вычитается внешняя цифровая высотная модель района исследований, предварительно переведенная в систему координат радара. В этом случае получаемые интерферограммы могут интерпретироваться как оседания земной поверхности.

Таким образом, разработанный для высокогорного месторождения проект комплексного мониторинга состояния по-

родного массива включает периодические маркшейдерские, геофизические, гидрологические, гидрогеологические и газогеохимические исследования по сети профилей, а также площадные сейсмологические наблюдения в online-режиме. Для объектов с разной степенью рисков нарушенности водозащитной толщи предусматривается две системы режимных наблюдений, различающиеся периодичностью измерений. Первая группа опасностей — участок первоочередной отработки — не реже 1 раза в месяц, вторая группа опасностей — участки согласованных геофизических аномалий — по мере продвижения горных работ и в зависимости от сопутствующих изменений состояния породного массива.

Заключение

Основанием для проведения исследований в пределах высокогорного месторождения калийных солей являлась необходимость разработки программы комплексного мониторинга и рекомендаций по безопасному ведению горных работ. При этом следует отметить недоизученность горно-геологических условий месторождения по широкому спектру вопросов, что не соответствует требованиям по безопасному и рациональному освоению недр. Традиционно формирование комплексов мониторинговых наблюдений в пределах месторождений во-

дорастворимых полезных ископаемых выполняется на основе анализа соответствия их возможностей ставящимся задачам, определяемым на основе имеющейся информации. Для повышения степени изученности и минимизации рисков освоения недр, на основе многолетнего опыта решения подобного сочетания задач, реализуемого на Верхнекамском месторождении солей, для уточнения особенностей строения перекрывающей и продуктивной толщ изучаемой территории проведены геологические, гидрогеологические, геофизические и геомеханические наблюдения. По результатам обработки и комплексного анализа полученных на этапе доизучения материалов выделены потенциально опасные для отработки участки и определена степень их влияния на безопасность освоения месторождения. Это позволило разработать проект комплексного мониторинга за состоянием породного массива в процессе эксплуатации месторождения. В проекте представлена сеть базовых профилей для объектов с разной степенью рисков нарушения сплошности водозащитной толщи и предусматривается две системы режима наблюдений, позволяющих контролировать состояние геологической среды и прогнозировать ее изменения под влиянием природных и техногенных факторов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шиман М. И. Предотвращение затопления калийных рудников. — М.: Недра, 1992. — 176 с.
2. Красноштейн А. Е., Барях А. А., Санфиоров И. А. Горнотехнические аварии: затопление Первого Березниковского калийного рудника // Вестник Пермского научного центра. — 2009. — № 2. — С. 40—49.
3. Глебов С. В. Методика обоснования состава рациональных комплексов геофизических исследований при освоении соляного месторождения (на примере Верхнекамского месторождения калийных солей) / Стратегия и процессы освоения георесурсов. Материалы ежегодной научной сессии Горного института УрО РАН по результатам НИР в 2005 г. — Пермь: Горный институт УрО РАН, 2006. — С. 244—246.
4. Исаева Г. А., Молоштанова Н. Е., Малеев Э. Е. Влияние палеотектоники на строение и вещественный состав калийных солей верхнеюрской формации Среднеазиатского бассейна //

Вестник Пермского университета. Геология. — 2016. — № 3 (32). — С. 6–20. DOI: 10.17072/pu.geol.32.6.

5. Кудряшов А. И., Грибков Д. С. Горно-геологические условия разработки Тюбегатанского месторождения калийных солей // Рудник будущего. — 2010. — № 1. — С. 11–14.

6. Rauche H. Die Kaliindustrie im 21. Jahrhundert: Stand der Technik bei der Rohstoffgewinnung und der Rohstoffaufbereitung sowie bei der Entsorgung der dabei anfallenden Rückstände. Berlin. — Heidelberg: Springer Vieweg, 2015, 580 p.

7. Maleev E. E., Goldyrev V. V. Isotopic composition of underground and surface waters at the Uzbekstan Tyubegatan potassium salts deposit / Mine water: Technological and Ecological Challenges. Proceedings of the IMWA 2019 Conference. Perm, 2019, pp. 632–635.

8. Белкин В. В., Коноплев А. В., Ковин О. Н., Наумова О. Б. Мониторинг и оценка состояния геологической среды Верхнекамского соленосного бассейна // Современные проблемы науки и образования. — 2014. — № 5.

9. Барях А. А., Смирнов Э. В., Квиткин С. Ю., Тенисон Л. О. Калийная промышленность России: проблемы рационального и безопасного недропользования // Горная промышленность. — 2022. — № 1. — С. 41–50. DOI: 10.30686/1609-9192-2022-1-41-50.

10. Деревяшкин И. В., Кузина А. В., Спиридонов В. П. Аналитический обзор статистических данных о причинах, вызывающих осадку поверхности калийных рудников, и эффективности применяемых мероприятий по защите рудников от затопления // Маркшейдерия и недропользование. — 2017. — № 6(92). — С. 37–40.

11. Bobrov V. Y. Gerasimova I. Y. The investigation of shallow structure inhomogeneities by 2D and 3D seismic engineering techniques. The analysis of the head waves registered in crosshole survey for calculation velocities in the vicinity of boreholes / 16th Conference and Exhibition Engineering Geophysics. Perm, 2020. DOI: 10.3997/2214-4609.202051022.

12. Жикин А. А. Оценка информативности сейсморазведочных исследований в зонах развития соляного карста на основе математического моделирования // Горное эхо. — 2020. — № 3(80). — С. 66–71. DOI: 10.7242/echo.2020.3.13.

13. Санфиоров И. А., Жикин А. А., Богданов Р. А., Фатькин К. Б. Развитие интерпретационных возможностей сейсморазведочных исследований при освоении месторождений водорастворимых полезных ископаемых // Горный журнал. — 2021. — № 4. — С. 28–33. DOI: 10.17580/gzh.2021.04.03.

14. Никифорова А. И., Чугаев А. В., Лисин В. П. Картирование вертикально-ориентированных зон нарушения породного массива скважинными и наземными сейсморазведочными исследованиями // Горное эхо. — 2022. — № 2(87). — С. 78–84. DOI: 10.7242/echo.2022.2.13.

15. Симанов А. А. Использование глобальных цифровых моделей рельефа при обработке гравиметрических данных в горной местности // Горное эхо. — 2023. — № 4(93). — С. 69–72. DOI: 10.7242/echo.2023.4.10.

16. Тайницкий А. А., Степанов Ю. И., Зубрикова Е. С., Лучников М. С. Оценка результатов мониторинговых электроразведочных наблюдений надсолевых отложений Верхнекамского месторождения на участке техногенной нарушения породного массива // Геофизика. — 2022. — № 5. — С. 27–33.

17. Барях А. А., Санфиоров И. А., Дьяконов М. В., Лобанов С. Ю., Никифорова А. И. Информационное обеспечение геомеханических расчетов устойчивости подработанного породного массива со сложным тектоническим строением // Russian Journal of Earth Sciences. — 2024. — Т. 24. — № 1. ES1012. DOI: 10.2205/2024es000894.

18. Федосеев А. К. О возможности минимизации риска нарушения сплошности водозащитной толщи на потенциально опасных участках // Горное эхо. — 2021. — № 2(83). — С. 27–31. DOI: 10.7242/echo.2021.2.7.

19. Шулаков Д. Ю., Бутырин П. Г., Верхоланцев А. В. Сейсмологический мониторинг Верхнекамского месторождения: задачи, проблемы, решения // Горный журнал. — 2018. — № 6. — С. 25–29.

20. Shulakov D. Y., Verkholantsev F. G., Zvereva A. S. Detailed seismological monitoring technology based on observations in the Krasnoslobodsky fault zone of the Starobinsk potash deposit / European Association of Geoscientists & Engineers. Conference Proceedings, Engineering and Mining Geophysics, 2020. DOI: 10.3997/2214-4609.202051057. **ИТАБ**

REFERENCES

1. Shiman M. I. *Predotvrashchenie zatopleniya kaliynykh rudnikov* [Avoiding of flooding of potassium mines], Moscow, Nedra, 1992, 176 p.
2. Krasnoshtein A. E., Baryakh A. A., Sanfirov I. A. Mining accidents: flooding of the First Beznikovskiy potash mine. *Perm scientific center journal*. 2009, no. 2, pp. 40–49. [In Russ].
3. Glebov S. V. Methodology for substantiating the composition of rational complexes of geophysical research during the development of a salt deposit (using the example of the Verkhnekamsk deposit of potassium salts). *Strategiya i protsessy osvoeniya georesursov. Materialy ezhegodnoy nauchnoy sessii Gornogo instituta UrO RAN po rezul'tatam NIR v 2005 g.* [Strategy and processes of development of georesources. Materials of the annual scientific session of the Mining Institute of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences on the results of research in 2005], Perm, 2006, pp. 244–246. [In Russ].
4. Isaeva G. A., Moloshtanova N. E., Maleev E. E. Influence of paleotectonics on the structure and mineral composition of potash salts of the upper jurassic formation of Central Asian basin. *Bulletin of Perm University. Geology*. 2016, no. 3 (32), pp. 6–20. [In Russ]. DOI: 10.17072/psu.geol.32.6.
5. Kudryashov A. I., Gribkov D. S. Mining and geological conditions of development of the Uzbekstan Tyubegatan potassium salts deposit. *Rudnik budushchego*. 2010, no. 1, pp. 11–14. [In Russ].
6. Rauche H. *Die Kaliindustrie im 21. Jahrhundert: Stand der Technik bei der Rohstoffgewinnung und der Rohstoffaufbereitung sowie bei der Entsorgung der dabei anfallenden Rückstände*. Berlin. Heidelberg: Springer Vieweg, 2015, 580 p.
7. Maleev E. E., Goldyrev V. V. Isotopic composition of underground and surface waters at the Uzbekstan Tyubegatan potassium salts deposit. *Mine water: Technological and Ecological Challenges. Proceedings of the IMWA 2019 Conference*. Perm, 2019, pp. 632–635.
8. Belkin V. V., Konoplev A. V., Kovin O. N., Naumova O. B. Monitoring and Evaluation of Geological Environment of Upper Kama Salt Basin. *Modern problems of science and education*. 2014, no. 5. [In Russ].
9. Baryakh A. A., Smirnov E. V., Kvitkin S. Yu., Tenison L. O. Russian potash industry: Issues of rational and safe mining. *Russian Mining Industry Journal*. 2022, no. 1, pp. 41–50. [In Russ]. DOI: 10.30686/1609-9192-2022-1-41-50.
10. Derevyashkin I. V., Kuzina A. V., Spiridonov V. P. Analytical review of statistical data on the causes of surface settlement of potash mines and the effectiveness of measures taken to protect mines from flooding. *Mine Surveying and Subsurface Use*. 2017, no. 6(92), pp. 37–40. [In Russ].
11. Bobrov V. Y. Gerasimova I. Y. The investigation of shallow structure inhomogeneities by 2D and 3D seismic engineering techniques. The analysis of the head waves registered in crosshole survey for calculation velocities in the vicinity of boreholes. *16th Conference and Exhibition Engineering Geophysics*. Perm, 2020. DOI: 10.3997/2214-4609.202051022.
12. Zhikin A. A. Assessing the information content of seismic surveys in salt karst development zones based on mathematical modeling. *Gornoe ekho*. 2020, no. 3(80), pp. 66–71. [In Russ]. DOI: 10.7242/echo.2020.3.13.
13. Sanfirov I. A., Zhikin A. A., Bogdanov R. A., Fatkin K. B. Evolvement of interpretation capacities of seismic measurements in mining of water-soluble minerals. *Gornyi Zhurnal*. 2021, no. 4, pp. 28–33. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2021.04.03.
14. Nikiforova A. I., Chugaev A. V., Lysin V. P. Mapping of vertically oriented zones of rock mass disturbance by borehole and surface seismic surveys. *Gornoe ekho*. 2022, no. 2(87), pp. 78–84. [In Russ]. DOI: 10.7242/echo.2022.2.13.
15. Simanov A. A. Using global digital relief models in processing gravimetric data in mountainous areas. *Gornoe ekho*. 2023, no. 4(93), pp. 69–72. [In Russ]. DOI: 10.7242/echo.2023.4.10.
16. Tainickiy A. A., Stepanov Yu. I., Zubrikova E. S., Luchnikov M. S. Evaluation of the results of monitoring electrical exploration observations of post-salt deposits of the verkhnekamskoye deposit in the area of technogenic disturbance of the rock mass. *Geophysics*. 2022, no. 5, pp. 27–33. [In Russ].
17. Baryakh A. A., Sanfirov I. A., D'yakov M. V., Lobanov S. Yu., Nikiforova A. I. Informatsionnoe obespechenie geomekhanicheskikh raschetov ustoychivosti podrabotannogo porodnogo massiva so slozhnym tektonicheskim stroeniem. *Russian Journal of Earth Sciences*. 2024, vol. 24, no. 1. [In Russ]. ES1012. DOI: 10.2205/2024es000894.
18. Fedoseev A. K. On the possibility of minimizing the risk of violation of the continuity of the water-protective layer in potentially dangerous areas. *Gornoe ekho*. 2021, no. 2(83), pp. 27–31. [In Russ]. DOI: 10.7242/echo.2021.2.7.

19. Shulakov D. Y., Butyrin P. G., Verkholtantse A. V. Seismological monitoring at the Upper Kama potash deposit: Objectives, problems, solutions. *Gornyi Zhurnal*. 2018, no. 6, pp. 25 – 29. [In Russ].

20. Shulakov D. Y., Verkholtantsev F. G., Zvereva A. S. Detailed seismological monitoring technology based on observations in the Krasnoslobodsky fault zone of the Starobinsk potash deposit. *European Association of Geoscientists & Engineers. Conference Proceedings, Engineering and Mining Geophysics*, 2020. DOI: 10.3997/2214-4609.202051057.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Дьяконов Максим Владимирович – руководитель проектного офиса по строительству нового рудника СКРУ-2, ПАО «Уралкалий», e-mail: Maksim.Dyakov@uralkali.com, ORCID ID:0009-0009-0423-5660,

*Герасимова Ирина Юрьевна*¹ – канд. геол.-минерал. наук, доцент, старший научный сотрудник, e-mail: gerasimova@mi-perm.ru, ORCID ID: 0000-0002-8860-9261,

*Малеев Эдуард Егорович*¹ – ведущий инженер, e-mail: maleev37@yandex.ru, ORCID ID: 0009-0004-8933-2913,

*Степанов Юрий Иванович*¹ – канд. геол.-минерал. наук, доцент, зав. лабораторией, e-mail: stepanov@mi-perm.ru, ORCID ID: 0000-0002-8107-6562,

*Шулаков Денис Юрьевич*¹ – канд. техн. наук, зав. лабораторией, e-mail: shulakov@mi-perm.ru, ORCID ID: 0000-0002-5673-8819,

¹ Горный институт Уральского отделения РАН.

Для контактов: Малеев Э.Е., e-mail: maleev37@yandex.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

M.V. Diakov, Head of the Project Office for the Construction of New Solikamsk-2 Mine, PJSC Uralkali, Berezniki, 618426, Russia, e-mail: Maksim.Dyakov@uralkali.com, ORCID ID:0009-0009-0423-5660,

*I.Y. Gerasimova*¹, Cand. Sci. (Geol. Mineral.), Assistant Professor, Senior Researcher,

e-mail: gerasimova@mi-perm.ru, ORCID ID: 0000-0002-8860-9261,

*E.E. Maleev*¹, Leading Engineer, e-mail: maleev37@yandex.ru, ORCID ID: 0009-0004-8933-2913,

*Y.I. Stepanov*¹, Cand. Sci. (Geol. Mineral.), Assistant Professor, Head of Laboratory, e-mail: stepanov@mi-perm.ru, ORCID ID: 0000-0002-8107-6562,

*D.Y. Shulakov*¹, Cand. Sci. (Eng.), Head of Laboratory, e-mail: shulakov@mi-perm.ru, ORCID ID: 0000-0002-5673-8819,

¹ Mining Institute of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 614007, Perm, Russia.

Corresponding author: E.E. Maleev, e-mail: maleev37@yandex.ru.

Получена редакцией 18.06.2024; получена после рецензии 17.07.2024; принята к печати 10.02.2025.

Received by the editors 18.06.2024; received after the review 17.07.2024; accepted for printing 10.02.2025.