УДК 550.8.05

Выделение глубокозалегающего рассольного водоносного горизонта в породах хемогенного разреза по данным геофизических исследований скважин и 2D-сейсморазведки

Н.А.ДАНИЛЬЕВА ✉, С.М.ДАНИЛЬЕВ, Н.В.БОЛЬШАКОВА

Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия

Как цитировать эту статью: Данильева Н.А. Выделение глубокозалегающего рассольного водоносного горизонта в породах хемогенного разреза по данным геофизических исследований скважин и 2D-сейсморазведки / Н.А.Данильева, С.М.Данильев, Н.В.Большакова // Записки Горного института. 2021. Т. 250. С. 501-511. DOI: 10.31897/PMI.2021.4.3

Аннотация. Развитие производства калийных удобрений является важной стратегической задачей, стоящей перед российской агропромышленностью. Запасы открытых месторождений калийно-магниевых солей при ежегодно растущих темпах добычи заметно снижаются, что требует обеспечения стабильного восполнения ресурсной базы как за счет открытия новых месторождений, так и освоения глубоко залегающих продуктивных горизонтов на уже разрабатываемых месторождениях. Освоение месторождений калийно-магниевых солей в большинстве случаев ведется шахтным методом. Для любого соляного месторождения основной проблемой является вода. Сухие соляные выработки не нуждаются во вспомогательных укреплениях и прекрасно выдерживают горное давление, но при поступлении воды они начинают интенсивно обрушаться, поэтому особое внимание уделяется гидроизоляции шахт. Определение пространственного положения и физико-механических свойств водоносного и водозащитного горизонтов в геологическом разрезе являются важным этапом разведки месторождения солей. Результаты этих исследований позволяют обосновать оптимальную систему разработки месторождения с целью минимизации экологических и экономических рисков. На территории России расположено уникальное по геологическому строению месторождение калийно-магниевых солей, продуктивный горизонт которого залегает на значительной глубине и имеет над кровлей региональный водоносный горизонт, что существенно ограничивает процесс разработки. Для определения параметров исследуемого объекта были проанализированы данные сейсморазведки МОВ ОГТ и комплекса скважинных методов радиоактивного и акустического каротажа с привлечением данных ВИКИЗ. В результате проведенного анализа установлено расположение водоносной толщи, определены средние мощности водоносных горизонтов и возможных водозащитных толщ. По результатам исследований были предложены методы повышения эксплуатационной надежности основного ствола проектируемой шахты с целью минимизации рисков прорыва воды в ствол шахты.

Ключевые слова: геофизические исследования скважин; водоносный горизонт; рассольный водоносный горизонт; калийно-магниевые соли; водозащитная толща; нейтрон-нейтронный каротаж; радиоактивный каротаж; акустический каротаж; ВИКИЗ; сейсморазведка МОВ ОГТ; солевая шахта; хемогенные отложения

Введение. Основным способом извлечения соли из земных недр является шахтный метод с использованием тяжелой техники. Данный способ разработки имеет ряд преимуществ: относительно быстрое извлечение соли из целика и подъем на поверхность для дальнейшей переработки и обогащения.

Соль в условиях повышенного горного давления – пластичный и текучий материал, который при контакте с водой начинает быстро размываться и обрушаться [14, 26]. Поэтому главной проблемой любого солевого промысла, разрабатывающего месторождение шахтным способом, является наличие водоносных толщ в геологическом разрезе [29]. Разработка месторождений должна сопровождаться мерами по сдерживанию водопроявлений или полной гидроизоляции выработки, что в реальных горных условиях сделать трудно [17]. Главным способом сдерживания водопритокков к продуктивному обрабатываемому горизонту является камерная система выработки с поддержанием водозащитной толщи [2].

За многолетнюю практику разработки солевых месторождений было зарегистрировано множество аварий, связанных с газодинамическими явлениями [1] и затоплением рудников рассольными водами из вышележащих карбонатных отложений, сложенных глинисто-мергелевыми толщами, доломитистыми породами и др. [11-13]. Всего история солевого промысла в настоящее время насчитывает около 100 затопленных рудников в различных странах, среди них «Унфилд» (США), «Ванской» и «Пейшнс Лейк» (Канада), «Холл» (Конго), «Фон дер Гейдт», «Агата», «Майнтейфель» (Германия). В России крупнейшими авариями на солевом промысле стали случаи

затопления первого и третьего рудников в Березниках, которые так и не были восстановлены и остались затопленными [3].

Самым экологичным способом разработки солевых месторождений является камерная разработка, при которой после извлечения и обогащения руды пустая порода возвращается в место выработки для поддержания горного давления и недопущения обрушения шахты, исключая сваливание породы на поверхности, существенно снижая при этом финансовую нагрузку на разработчика недр и экологическую нагрузку на разрабатываемую территорию [15, 22, 25].

Основными путями проникновения рассольных вод являются тектонические разломы и трещины, образовавшиеся в естественном залегании при формировании горного массива, а также техногенные трещины, возникающие вследствие нерациональной разработки месторождений и приводящие к аварийным ситуациям [7, 28]. Поэтому весьма актуальной является задача по детальному изучению месторождения на подготовительном этапе для получения априорной информации о залежи: геометрических параметрах, физико-механических свойствах, наличии тектонических трещин [8, 24, 32]. Полученные данные позволяют обосновать положение водозащитной толщи, т.е. мощного флюидоупора, который будет защищать горную выработку от проникновения рассолов. Мониторинговые геофизические работы, направленные на раннее выявление трещин, ослабленных и видоизменяющихся под действием рассолов толщ, позволяют вести оперативный контроль за выработкой и уточнять запасы месторождения.

Главными методами изучения солевых месторождений являются сейсморазведка МОВ ОГТ, электроразведка, скважинные измерения методами гамма-каротажа (ГК), нейтронный гамма-картаж (НГК), спектрометрический гамма-картаж (СГК), акустический каротаж (АК), электрокаротаж. Полный комплекс методов подбирается индивидуально для каждой залежи, основываясь на геологическом строении исследуемой территории и глубины залегания продуктивного интервала.

В настоящей работе рассматриваются особенности распространения Вятского регионального водоносного горизонта методами сейсморазведки МОВ ОГТ и каротажа скважин в пределах N-го месторождения калийно-магниевых солей.

При проведении поисково-оценочных работ на месторождении были выполнены сейсморазведочные исследования в пределах первого и второго участка недр. Были изучены материалы фондовых отчетов по геологическому строению, гидрогеологическим условиям исследуемой территории, а также результаты геофизических исследований ранее и вновь пробуренных скважин. Основной задачей изучения указанных методов является разработка критериев выделения в разрезе водонасыщенной толщи, выявление пород-флюидоупоров для обоснования водозащитной толщи, поиск зон трещиноватости в околоскважинном пространстве.

Так как N-е месторождение еще не введено в разработку, то результаты исследований будут являться априорными для дальнейшего мониторинга, и, возможно, на них будет основываться методика прохождения главного шахтного ствола.

Литературный обзор. В настоящее время большое количество российских и зарубежных исследователей изучают проблемы разработки месторождений калийных и магниевых солей со значительных глубин при наличии в геологическом разрезе водоносных горизонтов [17]. Многие работы посвящены проблемам, связанным с авариями, произошедшими при разработке месторождений [2]. Аварии на калийных и магниевых рудниках могут быть вызваны утечкой воды из водоносных горизонтов вблизи месторождения, газодинамическими явлениями [8, 10, 11]. Различные типы аварий на шахтах были зарегистрированы в Канаде, Германии, Украине и России, и некоторые из них затронули соседние шахты и территории. Например, во время аварии в Соликамске в 1995 г. земная поверхность над шахтой обрушилась за сутки на 4,5 м, а на шахте Крюгергалль в 1989 г. причиной аварии стал сейсмический сигнал магнитудой 5,5. Недостаточная информация о гидрогеологических условиях шахтного поля также привела к ряду серьезных аварий на шахтах [30]. Соляная шахта в Канаде была затоплена в 1985 г., а в 1997 г. произошла такая же авария. Однако в Канаде применялся ряд успешных мероприятий по предотвращению наводнений в шахтах путем закачки цементного раствора в подземное пространство через сеть скважин [9, 10]. В России последние аварии были зафиксированы на Верхнекамском руднике в 1986 и 2006 гг. Эти аварии связаны с затоплением двух шахт на месторождении. Оценены возможные пути проникновения воды из аномальных зон геологического массива. Такие участки представлены зонами трещиноватости водоносных горизонтов, возникающими в процессе промысловой эксплуатации [14].

Затопление шахт происходит в разных странах, и нет единого решения по предотвращению таких аварий [18, 20, 21]. Ученые предлагают внедрение геофизических методов мониторинга шахтных стволов для раннего обнаружения наличия воды в подземном пространстве, а также мониторинга напряженного состояния горного массива сейсмическими методами. Основными методами мониторинговых наблюдений на Верхнекамском месторождении являются наземная и шахтная электроразведка, сейсморазведка и гравитационная разведка [3, 27]. Однако эти методы очень дороги, и их применение в мониторинге только рекомендуется. Они не используются на многих месторождениях калийно-магниевых солей в процессе разработки, хотя их применение решило бы многие важные проблемы предотвращения аварий [4-6, 9, 31].

Большое количество исследований связано с методами математического моделирования возможного наличия воды, напряженного состояния массива и методами разработки коллекторов [23, 31]. Эти статистические оценки позволяют аппроксимировать риски, возникающие при разработке месторождений, рассчитать экономические и экологические последствия возможных аварий и предложить пути решения некоторых из них [15, 16, 19, 20].

Основные выводы были сделаны из анализа мировых исследований в области соляных месторождений: соляные шахты постоянно подвергаются геологическим и экономическим рискам, и эти риски следует учитывать на стадии планирования разработки. Необходимо проводить мониторинговые наблюдения за зонами проникновения воды в подземное пространство шахт и оценивать непрерывность водоохранного слоя геофизическими методами.

Методология. В рамках исследовательской работы были поставлены следующие цели и задачи:

- изучение фондовых материалов по исследуемой области, представляющих описание геологического строения, стратиграфии и гидрогеологии изучаемой площади;
- изучение отчетных материалов по выполненным сейсморазведочным работам МОВ ОГТ по площади;
- загрузка и визуализация данных каротажа 33 скважин средней протяженностью 1200-1300 м с их последующей интерпретацией;
- выявление закономерностей простираия Вятского водоносного горизонта на основе данных сейсморазведочных работ и комплекса геофизических исследований скважин.

На исследуемых участках 1 и 2 выполнен анализ имеющихся материалов геофизических исследований скважин с целью определения и уточнения геологического строения изучаемого разреза в пределах глубин 950-1200 м с последующим выделением потенциальных водоносных горизонтов.

Анализ материалов проведенных геофизических исследований скважин (ГИС) на участке 1 позволил классифицировать скважины по пяти различным комплексам ГИС. В качестве опорных скважин по изучению закономерностей распределения физических свойств Вятского водоносного горизонта взяты скважины с максимально полным комплексом ГИС и литологической колонкой: xxx1, xxx2, xxx3, xxx4 (рис.1).

В группе этих скважин были выполнены методы гамма-каротажа (ГК), нейтрон-нейтронного каротажа по тепловым нейтронам (ННКт), измерение среднего диаметра скважины (Дс), плотностной гамма-гамма каротаж (ГГК-П), каротаж сопротивлений градиент- и потенциал-зондами (ГЗ, ПЗ), высокочастотное индукционное каротажное изопараметрическое зондирование (ВИКИЗ), акустический каротаж (АК).

В остальных скважинах комплекс был существенно меньше и в некоторых скважинах представлялся лишь методами ГК, ННКт и Дс. Однако, несмотря на это, материалов было достаточно для выявления основных закономерностей распространения Вятского водоносного горизонта и определения его пространственного положения в пределах исследуемой площади.

Сейсморазведочные работы МОВ ОГТ-2D в пределах изучаемых участков были выполнены в 2014 г., также были повторно обработаны и переинтерпретированы данные сейсморазведки, выполненной ранее, еще в 1980-1990 гг. С целью достижения целей и выполнения задач, поставленных в данной работе, были использованы структурные карты, полученные в ходе обработки и интерпретации сейсморазведочных данных по основным отражающим горизонтам (кровля соли, кровля перми, подошва перми), а также для сопоставления данных и получения более достоверной информации глубинные сейсмогеологические разрезы, проходящие по исследуемой территории и пересекающие скважины.

Рис.1. Пример планшета данных ГИС по скважине xxx1 в интервале геологических интересов

В геологическом строении участка недр месторождения калийно-магниевого солей принимают участие протерозойские и фанерозойские образования различного генезиса и состава. Раннепротерозойские образования, слагающие кристаллический фундамент, залегают на глубинах 1100-3350 м с общим погружением в западном направлении. Фанерозойский осадочный чехол представлен отложениями кембрия, ордовика, силура, перми, триаса, юры, мела и образованиями четвертичной системы.

Исходя из литологии объекта исследования, изучаемый интервал в пределах 950-1200 м представлен переслаиванием ангидридов, известняков, мергелей, глин и доломитов. Водовмещающие

толщи, приуроченные к Вятскому водоносному горизонту, представлены переслаиванием доломитов, мергелей и известняков с включением глинистого материала. Особенность изучаемого интервала заключается в наличии выше и ниже исследуемых водовмещающих толщ слоя ангидритовых пород, являющихся флюидоупорами. Учитывая особенности литологии интервала исследования, водовмещающие толщи пород должны обладать интенсивной трещиноватостью с целью аккумуляции в них воды. Однако, на основе имеющейся геолого-геофизической информации можно лишь обеспечить пространственную корреляцию и интерполяцию интервалов толщи переслаивания доломитов, мергелей и известняков с включением глинистого материала без оценки пространственного распространения трещиноватости в толще пород Вятского водоносного горизонта, что напрямую влияет на изучение гидрогеологических свойств массива.

Для обоснования характерных особенностей распределения геофизических данных в исследуемом интервале и выше него были выбраны три опорных горизонта:

- слой глин, залегающий выше исследуемой толщи, отличающийся повышенными значениями ГК – 9 мкР/ч, низкими значениями ННКт – 1 у.е., наличием каверн по данным кавернометрии, плотностью около 2,4 г/см³, скоростью прохождения упругой волны около 3500 м/с;
- слой ангидридов, залегающий в кровле исследуемого интервала, характеризующийся низкими значениями ГК – 2-4 мкР/ч, высокими показаниями ННКт – 60 у.е., плотностью около 3 г/см³, высокой скоростью прохождения упругой волны – около 6200 м/с;
- слой солей, залегающий под исследуемой толщей, характеризующийся низкими значениями ГК – 3-5 мкР/ч, высокими показателями ННКтб – 45-70 у.е., плотностью около 2,2 г/см³, скоростью прохождения упругой волны около 4600 м/с.

Далее требуется выявить закономерности проявления пород Вятского горизонта и ангидритов по данным ГИС. Слой ангидритов определяется следующими показаниями кривых ГИС (рис.1, интервал глубин 1008-1018 м): низкой радиоактивностью – около 1-2 мкР/ч; высоким значением ННКт (низкое водородосодержание) – около 70 у.е. в кровле и 55 у.е. в подошве слоя; низким временем пробега упругой волны – около 170 мкс/м, что соответствует скорости 5880 м/с; повышенными показаниями плотности – 3,0 г/см³ по данным ГГК-П. Мощность представленных ангидритов по данным каротажа в разных скважинах колеблется в пределах 8-20 м.

Основные особенности кривых ГИС: изменение показаний ННКт от кровли к подошве, что может быть связано с изменением минерального состава; плавное повышение значений ГК от кровли к подошве пласта; пласт однороден по скоростной характеристике и плотности.

Следующий для выявления по кривым ГИС слой – первый водоносный горизонт, представленный переслаиванием мергелей и доломитов (рис.1, интервал глубин 1018-1028 м). Данный водоносный горизонт представлен следующими геофизическими параметрами: повышенными значениями радиоактивности – 8-10 мкР/ч; низкими значениями ННКт – 2,5 у.е.; увеличенным временем пробега упругой волны по породе – около 270 мкс/м, что соответствует скорости в 3700 м/с; пониженными по сравнению с вмещающими породами значениями плотности, определяемыми по ГГК-П, равными 2,4 г/см³.

В кровле слоя наблюдаются более высокие значения радиоактивности, характеризующие прошлой мергелей. Однако не во всех скважинах отмечается данная закономерность, что затрудняет определение точной границы переслаивания мергелей и доломитов в других скважинах.

В качестве флюидоупора между первым и вторым водоносными горизонтами выступает слой ангидрита мощностью 7,6-29 м. Параметры геофизических данных у представленного слоя аналогичны вышележащему по разрезу слою ангидритов.

Вторая водоносная толща представлена переслаиванием доломитов с глинами (рис.1, интервал глубин 1044-1052 м). Она характеризуется изменчивыми параметрами от кровли до подошвы слоя по геофизическим данным.

Критерии выделения второго водоносного горизонта по каротажным данным: повышенные и средние показания радиоактивности по ГК в пределах 10,5 в кровле и 3,76 мкР/ч в подошве пласта; низкие показания ННКт в пределах 2,2 у.е.; увеличенное время пробега упругой волны от 250 мкс/м в кровле и до 200 мкс/м в подошве пласта, что соответствует скорости в 4000 и 5000 м/с; пониженные по сравнению с вмещающими породами значения плотности в пределах 2,47-2,7 г/см³ от кровли к подошве.

Особенности кривых ГИС: высокие значения ГК в кровле пласта по сравнению с подошвой; увеличение показаний кривой ННКт от кровли к подошве; уменьшение времени пробега упругой волны от кровли к подошве; увеличение плотности от кровли к подошве.

Из этого следует наличие переслаивания двух типов пород, обладающих разными физическими свойствами, причем в кровле пласта предположительно залегают глинистые породы, в подошве – доломит.

По полученным данным в ходе исследования интервала глубин была создана таблица физических свойств пород по скважинам (табл.1), в которой представлены средние значения физических параметров, регистрируемые геофизическими исследованиями скважин.

Таблица 1

Средние значения кривых ГИС напротив основных литологических типов пород в исследуемом интервале

Порода	ГК, мкР/ч	ННКт, у.е.	Плотность, г/см ³	АК, мкс/м	Скорость, м/с
Доломит	6,05	2,3	2,44	256	3906,25
Мергель	6,87	3,88	2,41	240	4166,67
Известняк	6,95	2,96	2,5	253	3952,57
Ангидрит	2,9	28,92	3,1	168	5952,38
Глина темная	12,32	2,95	2,3	202	4950,50
Соль (галит)	3,46	49	2,1	217	4608,29

На основе анализа геолого-физических данных была создана таблица физических свойств горных пород, слагающих изучаемый разрез, исходя из которой можно выделить следующее:

- породы Вятского водоносного горизонта характеризуются повышенными показаниями радиоактивности, пониженными значениями нейтронного каротажа, пониженной по сравнению с ангидритами плотностью, увеличением интервального времени пробега упругой волны по данным акустического каротажа, пониженными значениями удельного электрического сопротивления, низкими значениями каротажа потенциалов самопроизвольной поляризации (ПС);
- вмещающими толщами Вятского горизонта служит ангидрит, характеризующийся низкими значениями радиоактивности, высокими показаниями нейтронного каротажа, уменьшением интервального времени пробега упругой волны по породе, высокими значениями удельного электрического сопротивления, и ПС, повышенной плотностью;
- слой, подстилающий ангидриты, представленный черными глинистыми породами, распространен повсеместно и характеризуется локальным повышением значений ГК, средней мощностью около 2,5 м.

Основными результатами прослеживания пород Вятского водоносного горизонта стало создание собственной базы данных по всем скважинам и межскважинном пространстве, на основе которых стало возможным построение структурных карт по кровле водоносных толщ и карт эффективных толщин. Пример структурной карты по двум участкам N-го месторождения представлен на рис.2.

В базу вошла информация о литологии исследуемой толщи Вятского водоносного горизонта, средние показания кривых каротажа, зафиксированные в скважинах, глубинные отметки кровли, подошвы и мощности каждого водоносного горизонта. По комплексу ГИС и литологии скважин был прослежен маломощный пропласток глинистых пород в подошве ангидритов над отложениями солей.

Как видно из рис.2, происходит погружение кровли Вятского водоносного горизонта в юго-восточном направлении, а также прослеживается зона быстрого градиента изменения абсолютных отметок глубин в центральной части карты, что может быть связано с тектоническими особенностями формирования исследуемой территории. Перепад глубин составляет около 100 м.

На карте эффективных толщин (рис.3) наблюдается выдержанное значение мощности водоносной толщи в пределах 9-10 м. В центральной части карты, также как и на карте абсолютных глубин, наблюдается нарушение корреляции толщин, что обуславливается тектоникой данного региона.

Рис.2. Структурная карта по кровле водоносного горизонта 1

В 2019 г. в рамках проведения гидрогеологических исследований пород Вятского горизонта были проведены опытные откачки в скважинах, находящихся рядом с проектируемым стволом шахты, и отбор проб воды для химического анализа. Пробные откачки проводила подрядная организация методом желонирования в интервале залегания водоносной толщи, после чего была выполнена опытная откачка тем же методом с восстановлением уровня подземных вод до статического уровня, который установился выше поверхности земли на 43,6 и 16,9 м для первого и второго водонасыщенных горизонтов соответственно. В дальнейшем были проведены расчеты коэффициента фильтрации и прогнозный дебит каждой из водоносных толщ. Для первой водоносной толщи коэффициент водопроводимости составил $0,046 \text{ м}^2/\text{сут}$, коэффициент фильтрации $0,0055 \text{ м/сут}$, для второй водоносной толщи коэффициент водопроводимости составил $0,013 \text{ м}^2/\text{сут}$, а коэффициент фильтрации $0,0011 \text{ м/сут}$. Величина водопритока в шахту диаметром 11 м рассчитывалась по формуле «большого колодца» и составила 63 и 20 $\text{м}^3/\text{сут}$ для каждой из толщ соответственно. Все расчеты были проведены на основе гидрогеологических исследований с учетом средней мощности (около 8,3 и 11,9 м) двух водоносных горизонтов в исследуемой скважине, расположенной в непосредственной близости от проектируемого ствола шахты. По итогам анализа проб, отобранных при проведении опытных гидрогеологических работ в скважинах, выявлено, что воды исследуемых горизонтов относятся к отложениям пермского возраста, в химический состав вод входят хлоридные и натриевые крепко рассольные растворы (по Е.В.Пиннекеру) с минерализацией от 170,6-185,3 до 199,8-234,0 г/л, вода очень жесткая, по водородному показателю изменяется от нейтральной до слабощелочной.

По степени агрессивности вод к бетонным сооружениям по SO_4 к портландцементу группы сульфатостойкости I варьируются от сильноагрессивной (W4-W14) до среднеагрессивной (W16-W20), к портландцементу и шлакопортландцементу II группы определяются как среднеагрессивная (W4) и слабоагрессивная (W6). Степень агрессивности к арматуре железобетонных конструкций по Cl зоны изменяемого уровня воды является высокой. По радиологическим показателям подземные воды исследуемых водоносных горизонтов считаются безопасными.

Рис.3. Карта эффективных толщин пород первого водоносного интервала Вятского водоносного горизонта

Обсуждение. Задачей исследования являлось изучение геологического строения и гидрогеологических условий, прослеживание пород Вятского водоносного горизонта, представленного переслаиванием карбонатных и глинистых пород. На основе предоставленных исходных данных по скважинам лицензионных участков 1 и 2 была разработана методика выделения пород Вятского водоносного горизонта, представленных переслаиванием доломитов, известняка и мергелей и перекрывающих отложений, сложенных ангидритами, глинистыми породами и солевыми отложениями (галитами).

Вятский горизонт представлен двумя водоносными толщами, первая из которых сложена мергелями в кровле пласта и доломитами в подошве, вторая сложена доломитами и глинистыми породами. Водовмещающими толщами являются трещиноватые доломиты и известняки.

Суть методики – выявление особенностей зарегистрированных кривых каротажа напротив каждого типа пород, слагающих изучаемый интервал глубин, и сопоставление этих показаний с литологическими колонками по скважинам xxx1, xxx2, xxx3, xxx4.

В последующем данная методика была применена в скважинах, где не было детального литологического описания горных пород, имелся ограниченный комплекс ГИС, и на ее основе была определена литология пород Вятского водоносного горизонта в скважинах участков 1 и 2.

Итогом исследования стала база данных скважин, в которой отображены глубины залегания кровли, подошвы и мощности пород Вятского водоносного горизонта, а также средние значения показаний кривых ГИС (табл.2).

Таблица 2

Фрагмент базы данных по первой водоносной толще Вятского горизонта

Скважина	Первая водоносная толща			Показания ГИС					
	Нк, м	h, м	Литология	ГК, мкР/ч	ННКт, у.е.	ПС, мВ	АК, мкс/м	КС, Ом·м	Плотность, г/см ³
xxx1	-1007,00	10,00	Доломиты, мергели, глины	8,45	—	—	—	—	—
xxx2	-1016,00	8,00	Доломиты, мергели, глины	7,8	1,7	-321	—	7,2	2,02
xxx3	-1020,00	9,60	Доломиты, мергели, глины	7,8	1,32	-344	—	6,16	2,33
xxx4	-1008,60	9,00	Доломиты, мергели, глины	6,88	1,68	-220	—	—	2,37
xxx5	-1019,40	9,60	Доломиты, мергели, глины	7,8	1,44	-276	—	6	2,43
xxx6	-1010,00	10,00	Доломиты, мергели, глины	6,87	1,92	-54,3	—	6,4	2,15
xxx7	-989,00	13,80	Доломиты, мергели, глины	8,43	3,61	-244	—	4,8	2,44
xxx8	-1010,00	7,60	Доломиты, мергели, глины	7,55	1,61	-265	—	2,4	2,31

Закключение. На основе созданной базы данных были построены структурные карты кровли и карты изопахит, отображающие распространение Вятского водоносного горизонта по исследуемой площади.

В ходе гидрогеологических исследований были рассчитаны параметры коэффициента фильтрации для первого Вятского водоносного горизонта, равный 0,0055 м/сут и мощности водовмещающих пород, составляющей 8,3 м, с учетом полученных параметров прогноз водопритока в шахтный ствол оценивается в 63 м³/сут.

В интервале, где расположен второй Вятский водоносный горизонт, коэффициент фильтрации равен 0,0011 м/сут, мощность водовмещающих пород достигает 11,9 м, при расчете данных параметров прогноз водопритока в шахтный ствол составляет 20 м³/сут.

В результате анализа рассчитанных данных, сделан вывод о целесообразности введения специальных методов проходки для дальнейшей постройки шахтного вертикального ствола на месторождении калийно-магниевых солей. В условиях разработки месторождений калийных солей защита от затопления обеспечивается, главным образом, за счет удержания однородной водозащитной толщи (ВЗТ) необходимой мощности над продуктивным (соляным) пластом и подборе параметров способа разработки, соответствующих действительной мощности ВЗТ. Таким образом, образуемые в процессе подземных работ водопроводящие трещины, залегающие над разрабатываемыми слоями солей, не должны доходить до кровли ВЗТ через перекрывающие слои ангидритов, доломитов и мергелей с минимальной мощностью 10-15 м.

Безопасная эксплуатация ВЗТ определяется контролем суммарной мощности слоев водозащитной толщи, в которых при деформации обрабатываемой толщи пород не образуются техногенные трещины.

Специальные меры для ликвидации притока рассолов при нарушении гидроизоляции шахты:

- строительство водонепроницаемых перемычек в подземной выработке, которые оперативно ограничат затопляемую зону от других участков;
- закупоривание техногенных трещин между подземными выработками и водоносными горизонтами с помощью закачки в них цементных растворов;
- возведение в штреках строений-ловушек для подземных вод с последующим их отводом в выработанные подземные выемки или на поверхность шахты.

Избежание затопления обеспечивается тем, что добыча калийных солей осуществляется там, где суммарная мощность слоев перекрывающих отложений, в которых не возникают трещины при деформировании толщи пород, больше минимально допустимой общей мощности переслаиваемых слоев ВЗТ.

По результатам обработанных, данных в скважинах месторождения водозащитная толща, представленная переслаиванием доломитов, мергелей и известняков, и перекрывающие отложения толщ ангидритов и глинистых пород, залегающие над соляным пластом, в сумме имеют мощность более 15 м, создавая условия для безопасного строительства и дальнейшей разработки шахты по добыче калийно-магниевых солей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Барях А.А. Газодинамическое обрушение кровли при разработке месторождений калийных солей / А.А.Барях, С.С.Андрейко, А.К.Федосеев // Записки Горного института. 2020. Т. 246. С. 601-609. DOI: 10.31897/PMI.2020.6.1
2. Барях А.А. О мерах охраны калийных рудников от затопления / А.А.Барях, Е.А.Губанова // Записки Горного института. 2019. Т. 240. С. 613-620. DOI: 10.31897/PMI.2019.6.613
3. Вагин В.Б. Исследование и оценка состояния водозащитного слоя над калийными горизонтами геофизическими методами / В.Б.Вагин, А.М.Ефимов, Е.В.Кулагов // Горный журнал. 2014. № 2. С. 11-15.
4. Глебов С.В. Обоснование исходных данных для оценки информативности геофизических методов при разработке Верхнекамского месторождения солей // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2005. № 9. С. 75-78.
5. Зубов В.П. Снижение рисков затопления калийных шахт при прорывах в горные выработки подземных вод / В.П.Зубов, А.Д.Смычник // Записки Горного института. 2015. Т. 215. С. 29-37.
6. Квиткин С.Ю. Об экологической эффективности и правовой возможности размещения минерализованных вод в послесолевым комплексе горных пород Верхнекамского месторождения/ С.Ю.Квиткин, В.И.Трофимов, В.В.Ковальская // Записки Горного института. 2017. Т. 228. С. 731-737. DOI: 10.25515/PMI.2017.6.731
7. Кобылкин С.С. Особенности проектирования вентиляции угольных шахт, применяющих камерно-столбовую систему разработки / С.С.Кобылкин, А.Р.Харисов // Записки Горного института. 2020. Т. 245. С. 531-538. DOI: 10.31897/PMI.2020.5.4
8. Колесов Е.В. Разработка мероприятий по удалению взрывоопасных газов из выработанного пространства при затоплении калийных шахт / Е.В.Колесов, А.В.Шалимов, М.А.Семинов // Промышленная безопасность. 2019. № 12. С. 60-65. DOI: 10.24000/0409-2961-2019-12-60-65
9. Кологривко А.А. Снижение геоэкологических последствий при подземной разработке калийных месторождений // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия F. Прикладные науки. Строительство. 2014. № 16. С. 101-110.
10. Константинова С.А. К оценке геомеханической роли закладки выработанного пространства на калийных рудниках / С.А.Константинова, В.А.Соловьев, И.Б.Ваулина // Геодинамика и напряженное состояние недр Земли: Труды Всероссийской конференции, посвященной 80-летию академика М.В.Курлени (с участием иностранных ученых), 3-6 октября, 2011, Новосибирск, Россия. 2011. Т. 1. С. 394-399.
11. Лаптев Б.В. Аварийные ситуации на Верхнекамском месторождении калийно-магниевого солей // Безопасность труда в промышленности. 2009. № 8. С. 28-31.
12. Лаптев Б.В. Историография аварий при разработке соляных месторождений // Промышленная безопасность. 2011. № 12. С. 41-46.
13. Пачгин В.В. Обоснование технологии интенсивной отработки пологих калийно-магневых пластов под водоносными горизонтами // Проблемы недропользования: Сборник научных трудов. Ч. 1. Национальный минерально-сырьевой университет «Горный». СПб, 2015. С. 82-83.
14. Повышение безопасности шахт при разработке верхнекамских калийных и магниевых солей / В.П.Зубов, Е.Р.Ковальский, С.В.Антонов, В.В.Пачгин // Горный информационно-аналитический вестник. 2019. № 5. С. 22-33. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-05-0-22-33
15. Сиренко Ю.Г. Совершенствование селективной добычи калия с использованием короткостенных горных выработок с частичной засыпкой / Ю.Г.Сиренко, Е.Р.Ковальский // Горный журнал. 2016. № 1. С. 24-26. DOI: 10.17580/gzh.2016.01.05
16. Шкуратский Д.Н. Использование отходов производства калийных удобрений в породных смесях для закладки выработанных пространств / Д.Н.Шкуратский, М.И.Русаков // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. 2015. № 3. С. 87-97.
17. Экспериментальные и теоретические исследования длительной устойчивости несущих элементов камерной системы разработки калийных пластов / В.А.Асанов, И.Л.Паньков, А.В.Евсеев и др. // Вестник Пермского научного центра. 2017. № 1. С. 8-14.
18. An experimental study of strain and damage recovery of salt rock under confining pressures / C.Jie, J.-X.Liu, D.-Y.Jiang et al. // Rock and Soil Mechanics. 2016. Vol. 37. № 1. P. 105-112. DOI: 10.16285/j.rsm.2016.01.012
19. Barker J. New Mexico potash – past, present, future / J.Barker, I.Gundiler // New Mexico Earth Matters. 2008. Vol. 8. № 2. P. 1-6.
20. Belkhiri L. Using multivariate statistical analysis, geostatistical techniques and structural equation modeling to identify spatial variability of Groundwater quality / L.Belkhiri, T.S.Narany // Water Resources Management. 2015. Vol. 29. P. 2073-2089. DOI: 10.1007/s11269-015-0929-7
21. Cocker M.D. U.S. geological survey assessment of global potash production and resources – A significant advancement for global development and a sustainable future / M.D.Cocker, G.J.Orris, J.Wynn // Geoscience for the public good and global development: Toward a sustainable future: Geological Society of America Special Paper. 2016. Vol. 520. P. 89-98. DOI: 10.1130/2016.2520(10)
22. Cocker M.D. World potash developments / M.D.Cocker, G.J.Orris // Proceedings of the 48th Annual Forum on the Geology of Industrial Minerals, 30 April – 4 May, 2012, Scottsdale, Arizona, USA. Arizona Geological Survey, 2013. Chapter 1. P. 1-16.
23. DEM micromechanical modeling and laboratory experiment on creep behavior of salt rock / W.Li, Y.Han, T.Wang, J.Ma // Journal of Natural Gas Science and Engineering. 2017. Vol. 46. P. 38-46. DOI: 10.1016/j.jngse.2017.07.013
24. Khaustov V.V. Formation of drainage waters of Tyrnauz deposit in ecological aspect / V.V.Khaustov, D.L.Ustiugov // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2017. Vol. 87. Iss. 4. № 042006. DOI: 10.1088/1755-1315/87/4/042006
25. Kowalewski O. Stock market response to potash mine disasters / O.Kowalewski, P.Śpiewanowski // Journal of Commodity Markets. 2017. Vol. 20. P. 1-45. DOI: 10.1016/j.jcomm.2020.100124
26. Litvinenko V. Advancement of geomechanics and geodynamics at the mineral ore mining and underground space development // Geomechanics and Geodynamics of Rock Masses: International European Rock Mechanics Symposium (EUROCK 2018), 22-26 May, 2018, St. Petersburg, Russian Federation. OnePetro, 2018. Vol. 1. P. 3-16.
27. Ponomarenko T. Ecological, economic and social consequences of emergencies on potash mines // Management Systems in Production Engineering. 2012. Vol. 2. Iss. 6. P. 28-31.

28. *Posphehov G.B.* Geoengineering researches for the restoration of the lands disturbed by mining operations / G.B.Posphehov, K.V.Pankratova, I.A.Straupnik // Engineering and Mining Geophysics 2018 – 14th Conference and Exhibition, 23-27 April, 2018, Almaty, Kazakhstan. European Association of Geoscientists & Engineers, 2018. Vol. 2018. P. 1-5. DOI: 10.3997/2214-4609.201800528
29. *Rudakov M.* Risk-based thinking as a basis for efficient occupational safety management in the mining industry / M.Rudakov, E.Gridina, J.Kretschmann // Sustainability. 2021. Vol. 13. Iss. 2. P. 470. DOI: 10.3390/su13020470
30. *Whyatt J.* Catastrophic Failures of Underground Evaporite Mines / J.Whyatt, F.Varley // Proceedings of the 27th International Conference on Ground Control in Mining, 29-31 July, 2008, Morgantown, USA. College of Engineering and Mineral Resources, West Virginia University, 2008. P. 1-10.
31. *Zubov V.P.* Exploration method of potash and magnesium salts of the complex structure at great depths / V.P.Zubov, A.D.Smychnik // Ecology, Environment and Conservation. 2017. Vol. 23, Iss. 3. P. 1697-1701.
32. *Zuev B.Y.* Application prospects for models of equivalent materials in studies of geomechanical processes in underground mining of solid minerals / B.Y.Zuev, V.P.Zubov, A.S.Fedorov // Eurasian mining. 2019. № 1. P. 8-12.

Авторы: **Н.А.Данильева**, канд. геол.-минерал. наук, доцент, *Danilieva_NA@pers.spmi.ru*, <https://orcid.org/0000-0001-7707-6204> (Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия), **С.М.Данильев**, канд. геол.-минерал. наук, доцент, *Daniliev_SM@pers.spmi.ru*, <https://orcid.org/0000-0003-3057-8527> (Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия), **Н.В.Большакова**, аспирант, *Bolshakova_NV@pers.spmi.ru*, <https://orcid.org/0000-0003-0278-8893> (Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия).

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 16.03.2021.

Статья принята к публикации 27.07.2021.