

ГЕОФИЗИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПОРОД-КОЛЛЕКТОРОВ ДЛЯ ЗАКАЧКИ ИЗБЫТОЧНЫХ РАССОЛОВ КАЛИЙНОГО ПРОИЗВОДСТВА *

А.Б. Трапезникова, Горный институт УрО РАН

А.Г. Ярославцев, Горный институт УрО РАН

И.А. Санфиоров, Горный институт УрО РАН

Ю.И. Степанов, Горный институт УрО РАН

Т.В. Байбакова, Горный институт УрО РАН

Для цитирования:

Трапезникова А.Б., Ярославцев А.Г., Санфиоров И.А., Степанов Ю.И., Байбакова Т.В. Геофизическое обоснование пород-коллекторов для закачки избыточных рассолов калийного производства // Вестник Пермского федерального исследовательского центра. – 2023. – № 1. – С. 43–50. <https://doi.org/10.7242/2658-705X/2023.1.5>

Обосновывается комплекс геофизических исследований с целью выявления коллекторов в интервале соляно-мергельной толщи надсолевого комплекса Верхнекамского месторождения калийных солей для закачки отработанных рассолов. Выбор интервала закачки и локализация мест под бурение технологических скважин обосновывается комплексной интерпретацией данных геофизических исследований скважин (ГИС), малоуглубинной сейсморазведки и вертикального электрического зондирования (ВЭЗ). Представлены примеры результатов разных геофизических методов, используемых для выделения аномалий, связанных с пластами коллекторами.

Ключевые слова: коллекторы, малоуглубинная сейсморазведка, Верхнекамское месторождение калийных солей, электроразведка, геофизические исследования скважин.

Добыча и переработка калийно-магниевых солей связаны с образованием значительного количества техногенных отходов, в том числе рассолов. Существует несколько методов утилизации техногенных рассолов: выпаривание, сброс в объекты поверхностной гидросферы и др. Поверхностная утилизация техногенных отходов оказывает негативное влияние на экологическую обстановку района проведения работ. Поэтому наиболее экологи-

ческим и перспективным является закачка (захоронение) техногенных рассолов в подземные коллекторы. Коллектором является горная порода, обладающая высокими фильтрационными свойствами: пустотным пространством (поры, трещины, каверны) и проницаемостью. Ввиду сложного геологического строения подсоляного комплекса Верхнекамского месторождения солей (ВКМС) и высокой стоимости бурения таких глубин, наиболее пер-

* Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и образования РФ (рег. номер проекта 122012000401-7).

спективным объектом подземного сброса техногенных рассолов является соляно-мергельная толща (СМТ) надсоляного комплекса ВКМС.

Для выявления коллекторов в интервале соляно-мергельной толщи надсолевого комплекса ВКМС в пределах исследуемого участка выполнен комплекс геофизических исследований, в частности: геофизические исследования в скважинах (ГИС), малоуглубинная сейсморазведка и вертикальное электрическое зондирование (ВЭЗ).

Геофизические исследования скважин

В основу интерпретации выполненного комплекса исследований заложены физико-геологические модели, построенные с учетом ранее проведенных геолого-геофизических исследований, [2, 3, 4] – разведочное бурение с комплексом ГИС, наземные сейсморазведочные и электроразведочные исследования [5–6].

Первым этапом выявления потенциальных пород коллекторов является интерпретация данных геофизических исследований в скважинах (ГИС). Интерпретация ГИС выполнена в 5 скважинах, охарактеризованных наиболее полным комплексом исследований и находящиеся вблизи участков проведения наземных геофизических работ (сейсмо- и электроразведки). Комплекс ГИС включал в себя: боковой каротаж (БК); гамма-каротаж (ГК); нейтронный каротаж (W); акустический каротаж (АК), в том числе широкополосный (ФКД); кавернометрия (КВ). Перед интерпретацией материалов ГИС выполнялись процедуры обработки и нормировки данных (рис. 1, а–г). В результате интерпретации ГИС в исследуемых скважинах выделены интервалы ослабленных карбонатных пород, которые могут выступать потенциальными коллекторами, характеризующимися повышенной трещиноватостью и кавернозностью относительно вмещающих пород.

Пласты-коллекторы выделяются на диаграммах ГИС по общепринятым качественным признакам: низкие значения естественной гамма-активности по данным

ГК; наличие градиента электрического сопротивления, фиксируемое зондами бокового каротажного зондирования (БК); уменьшенный или близкий к номинальному диаметр скважины на кривой кавернометрии (КВ); повышенные показания водородосодержания (W) относительно вмещающих глинистых пород; пониженные значения интервальных времен продольной волны по данным акустического каротажа (АК); затухание фронта акустической волны и последующих фаз, с появлением гидроволны на фазо-корреляционной диаграмме (ФКД).

Выделение коллекторов контролируется количественными критериями, т.е. граничными значениями пористости и глинистости, принятыми по справочным материалам для трещиноватых типов карбонатных коллекторов. Пример выделения коллекторов в скважине Б по комплексу методов ГИС в отложениях соляно-мергельной толщи представлен на рис. 1, д. В разрезе СМТ по данным ГИС выделяется 9 интервалов с наиболее ослабленными породами, которые потенциально могут являться коллекторами.

Согласно результатам интерпретации ГИС установлено, что наиболее контрастными сейсмическими границами, на которых возможно формирование отражения внутри СМТ, являются кровли соляно-мергельной толщи, первого пласта-коллектора, относительно мощного реперного пласта гипсовой породы, а также подошва соляно-мергельной толщи (рис. 1, д). Потенциальный интервал исследований ограничивается кровлей первого пласта-коллектора и реперным гипсовым пластом, поскольку залегающие ниже пласты-коллекторы обладают менее выраженными коллекторскими свойствами и как следствие менее дифференцированы по акустическим и геоэлектрическим свойствам.

Сейсморазведочные работы

Для межскважинного анализа геологического строения целевого интервала выполнены малоуглубинные сейсморазведоч-

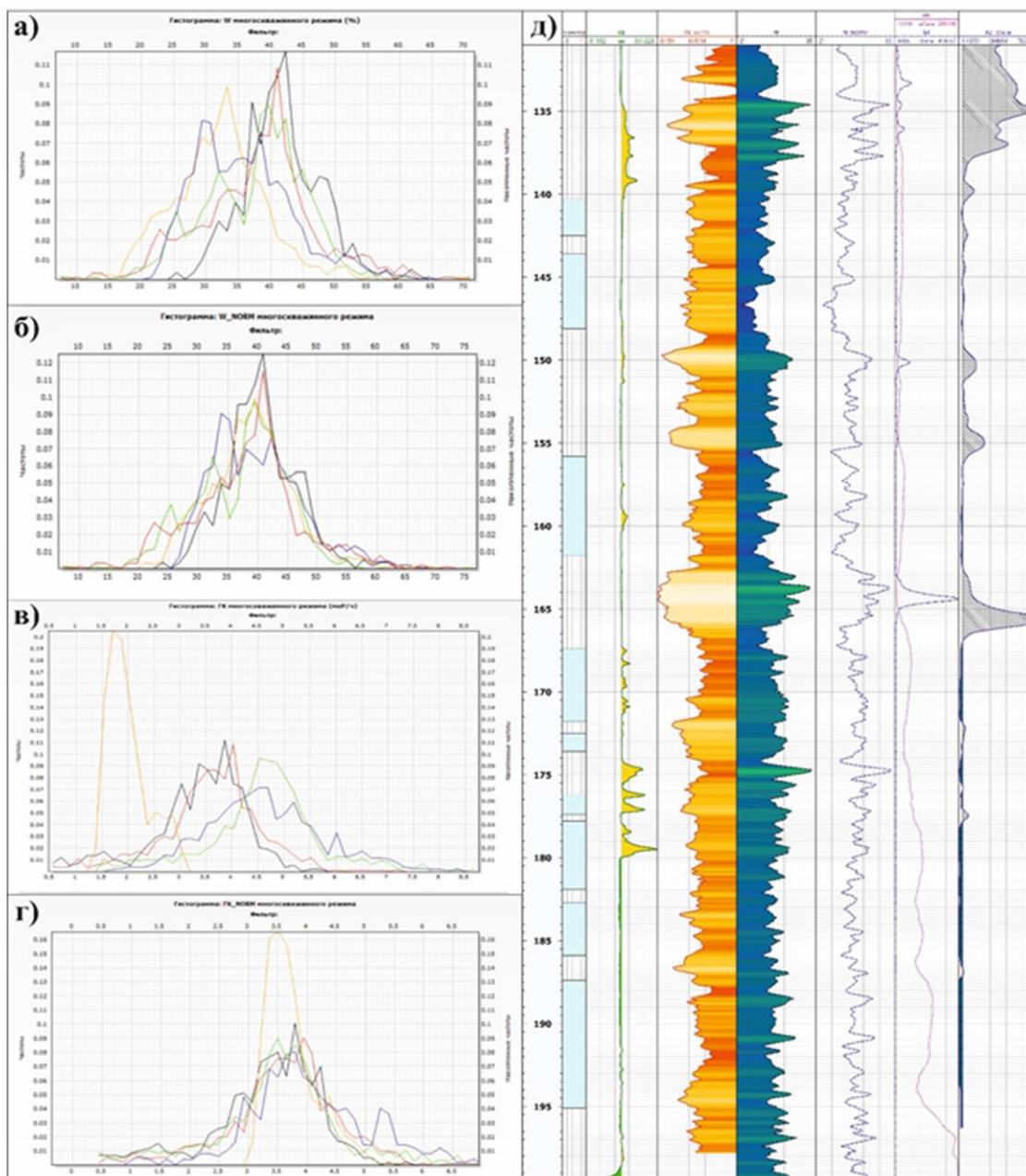


Рис. 1. Скважина Б пример выполнения процедуры нормировки и интерпретации:
 а) W до нормировки; б) W после нормировки; в) GK до нормировки; г) GK после нормировки;
 д) пример выделения пластов коллекторов

ные наблюдения высокого разрешения по трем профилям. Обоснование параметров систем наблюдений строится на общепринятых принципах невзрывной мало-глубинной сейсморазведки высокого разрешения с использованием интерференционной системы наблюдений по методу общей глубинной точки [8]. При полевых экспериментах для изучения целевых глубин до 200-250 м выбрана система на-

блюдений со следующими параметрами: шаг пунктов возбуждения (ПВ) – 4 м, шаг пунктов приема (ПП) – 4 м, максимальное удаление ПП-ПВ – 252 м, шаг дискретизации при записи данных – 200 мкс, источник возбуждения – импульсный [9].

В результате обработки сейсморазведочных данных получены суммарные временные разрезы (рис. 2, а), на которых выделяется ряд наиболее динамически выра-

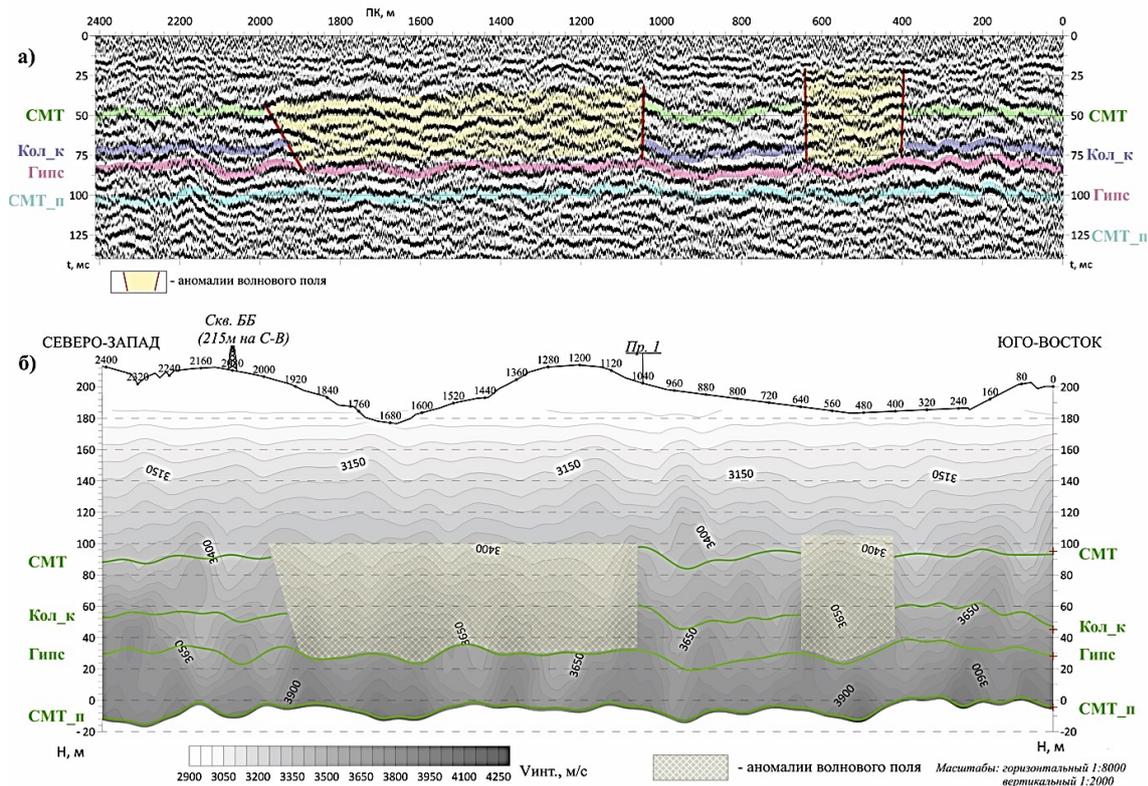


Рис. 2. Фрагмент разрезов цифровой обработки по профилю 2: а) временной разрез ОГТ, б) сейсмогеологический разрез

женных осей синфазности целевых сейсмических отражающих горизонтов (ОГ), соответствующих сейсмогеологическим границам. Согласно прогнозу, основанному на результатах интерпретации данных ГИС и предыдущих исследований, выполненных на участке работ, установлены отражающие горизонты (рис. 2, б), соответствующие: кровле соляно-мергельной толщи (СМТ), кровле пласта-коллектора (Кол_к), кровле реперного пласта гипсовой породы (Гипс), подошве соляно-мергельной толщи (СМТ_П). Для полученных отражающих горизонтов построены карты площадного распределения основных структурно-физических параметров исследуемого интервала (рис. 3, а-е)

На структурных картах кровли коллектора (рис. 3, а) и гипсового репера (рис. 3, б) не наблюдается градиента в падении структурных отметок в отличие от поверхностей отражающих горизонтов (СМТ и СМТ_П), залегающих выше и ниже данного интервала. Это отличие мо-

жет свидетельствовать о региональной невыдержанности лито-физических границ кровли коллектора и гипсового репера. Отчасти это же подтверждается распределением по площади упругих характеристик в интервале коллектора (ОГ Кол_к – ОГ Гипс) (рис. 3, в). Нижележащие горизонты относительно интервала ОГ Кол_к – ОГ Гипс характеризуются относительно высокими скоростями упругих волн, что свидетельствует о повышенной прочности породного массива и хороших изоляционных свойствах (рис. 3, з).

Согласно картам мощности, в интервале отражающих горизонтов ОГ Кол_к – ОГ СМТ_П наблюдается общее увеличение мощности пласта-коллектора в восточном направлении (рис. 3, д). Однако, изменение мощности верхней части интервала, соответствующей ОГ Кол_к – ОГ Гипс – имеет волнообразный характер в субширотном направлении и более выдержанный в меридиональном (рис. 3, е).

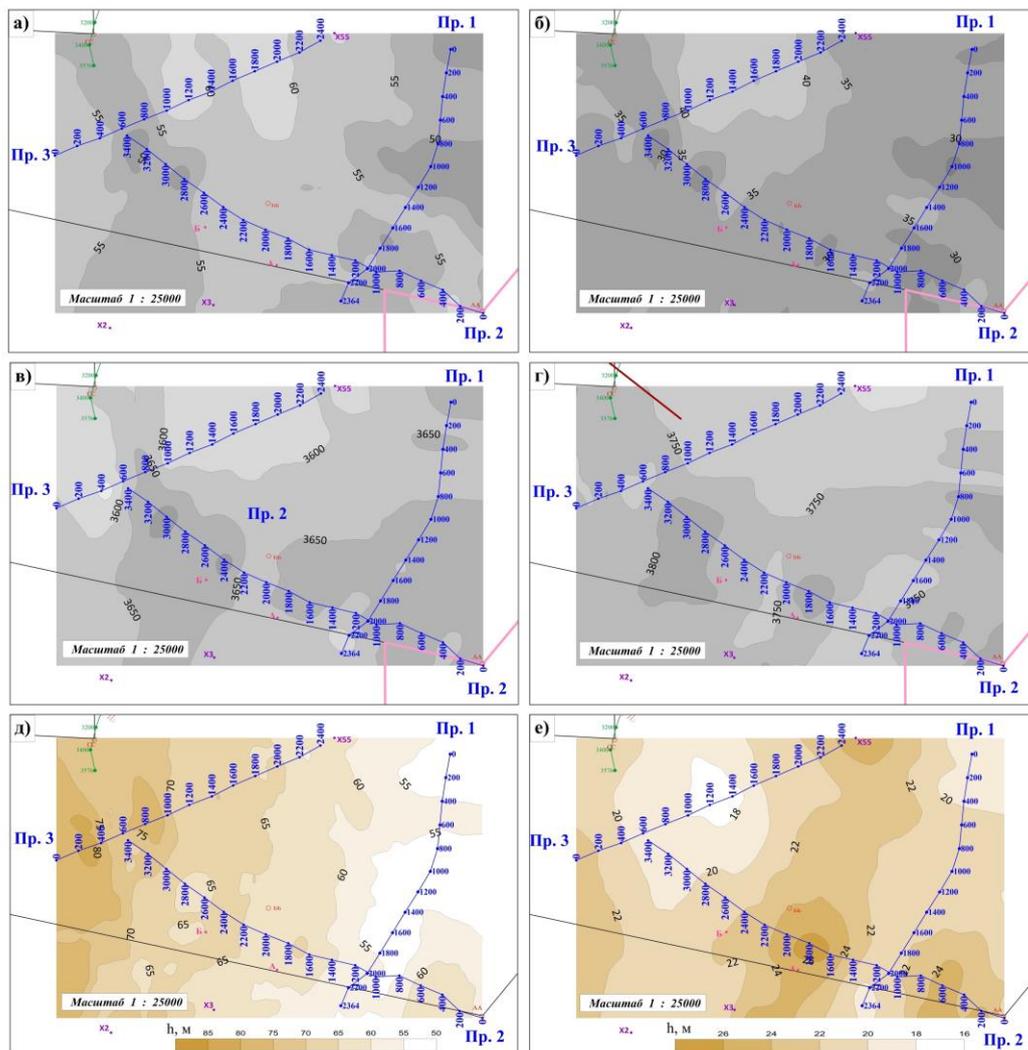


Рис. 3. Структурные схемы отражающих горизонтов: а) - ОГ Кол_к; б) – ОГ Гипс; Схемы распределения скоростей в интервалах: в) - ОГ Кол_к – ОГ Гипс; г) – ОГ Гипс – ОГ СМТ_П; Схемы общей мощности в интервалах коллектора: д) – ОГ Кол_к – ОГ СМТ_П; е) – ОГ Кол_к – ОГ Гипс

По сейсмическим данным в целевом интервале исследований (ОГ СМТ – ОГ СМТ_П) отмечаются участки потенциально связанные с повышенными коллекторскими свойствами. Они выделяются по ряду осложнений волнового поля, в частности: по нарушению структуры волновой картины, снижению интенсивности колебаний, резким изменениям значений скоростей волн, а также отличаются согласованностью всех негативных изменений анализируемых сейсмических параметров.

Таким образом, по сопоставлению выделенных осложнений в целевом интервале исследований с априорными физико-геологическими моделями, на участке исследования локализованы аномальные зо-

ны двух типов (см. рис. 2), соответствующие областям с повышенными коллекторскими свойствами:

1 тип: структурный – аномалии волнового поля связаны с резкими изменениями гипсометрии отражающих границ вблизи зон разрывных нарушений и сдвиговых дислокаций;

2 тип: литологический – связан с изменчивостью петрофизических свойств исследуемого интервала геологического разреза, выраженной в снижении интенсивности колебаний и значений скоростных параметров.

На основе анализа полученных результатов интерпретации сейсмических данных в пределах профильных линий, наиболее

перспективным для закачки техногенных рассолов выглядит участок к юго-востоку от скважины А. По данным сейсморазведки интервал пласта коллектора (Ог Кол_к – ОГ Гипс) в пределах данного участка характеризуется наибольшей мощностью и наиболее резким изменением скоростей. Таким образом, по совокупности вышеуказанных параметров, данный участок выступает хорошим резервуаром для закачки техногенных рассолов.

Электроразведочные работы

Для анализа геоэлектрических особенностей изучаемого разреза, в рамках исследования выполнены электроразведочные работы методом вертикального электрического зондирования (ВЭЗ). Сопоставление данных бурения с результатами интерпретации по всем скважинам, расположенным вблизи профилей, позволило провести количественную интерпретацию ВЭЗ и привязать геоэлектрические границы к геологическим поверхностям, соответствующим отражающим горизонтам, выделенным по данным сейсморазведки (рис. 4, а–б).

Согласно результатам количественной интерпретации ВЭЗ интервал соляно-мергельной толщи мозаично осложнен участками аномалий повышенных и пониженных удельных сопротивлений. Так, в интервале, содержащем породы-коллекторы, наблюдаются многочислен-

ные локальные зоны пониженных сопротивлений. Нижележащие отложения характеризуются повышенным удельным сопротивлением, что указывает на их повышенную плотность относительно вышележащих пород-коллекторов.

Зоны повышенных коллекторских свойств, отличаются пониженными значениями удельного электрического сопротивления или же повышенными значениями электропроводности.

С целью локализации участков коллекторов рассчитывались значения суммарной продольной проводимости для исследуемого интервала. Согласно материалам ранее проведенных исследований [10] выполнен расчет продольной проводимости для разуплотненных пород-коллекторов соляно-мергельной толщи, пороговое значение которой составило более 2,3 см/м.

В результате интерпретации данных вертикального электрического зондирования (ВЭЗ) установлены аномальные зоны с участками повышенных и пониженных удельных электрических сопротивлений. Зоны низких удельных сопротивлений и высокой электропроводности соответствуют участкам с повышенными коллекторскими свойствами, согласующимися с результатами интерпретации сейсморазведочных данных и ГИС. Наиболее контрастными геоэлектрическими свойствами характеризуется участок к юго-востоку от скважины А.

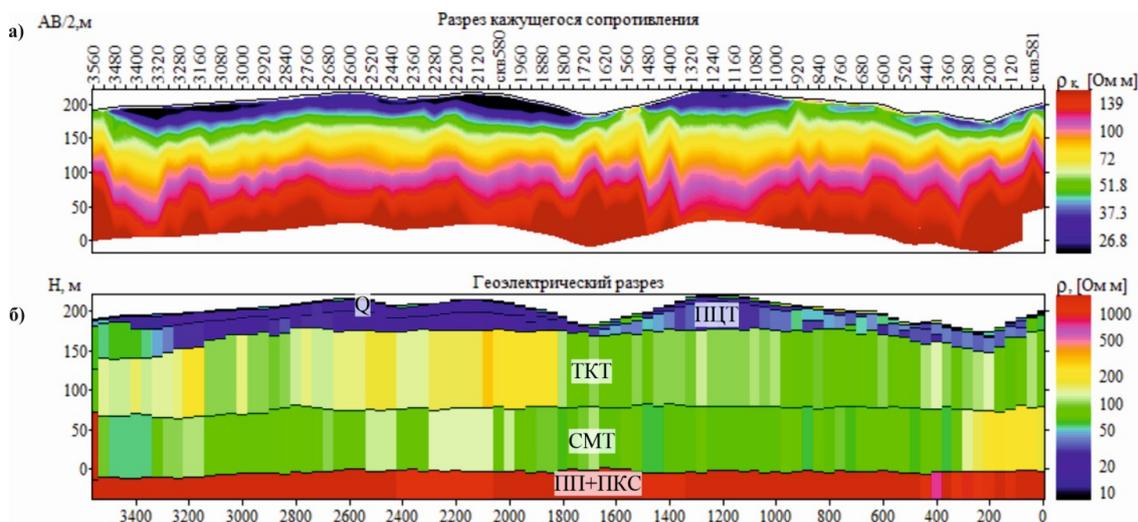


Рис. 4. разрез кажущегося сопротивления – а, геоэлектрические разрезы по профилю 2 – б

Выводы

Анализ геолого-геофизической информации прошлых лет и комплексная интерпретация результатов ГИС, сейсмо- и электроразведочных работ позволили выделить наиболее перспективный участок для закачки рассолов к юго-востоку от скважины А (рис. 5).

В качестве критериев потенциального участка выступают:

- совпадение аномальных зон в СМТ, выделяемых по всем геофизическим данным разных лет, и характеризующих повышенные коллекторские свойства разреза;

- повышенная мощность верхней части коллектора (выше реперного пласта гипсов), на основании чего можно предположить и потенциальное увеличение резервуара для закачки;

- повышенная прочность подстилающих коллектор отложений.

Таким образом, предлагаемый подход с использованием комплексных геофизических исследований можно рекомендовать как обязательный при принятии проектных решений по утилизации отработанных рассолов калийного производства в надсоляные отложения в пределах шахтных полей Верхнекамского месторождения солей.

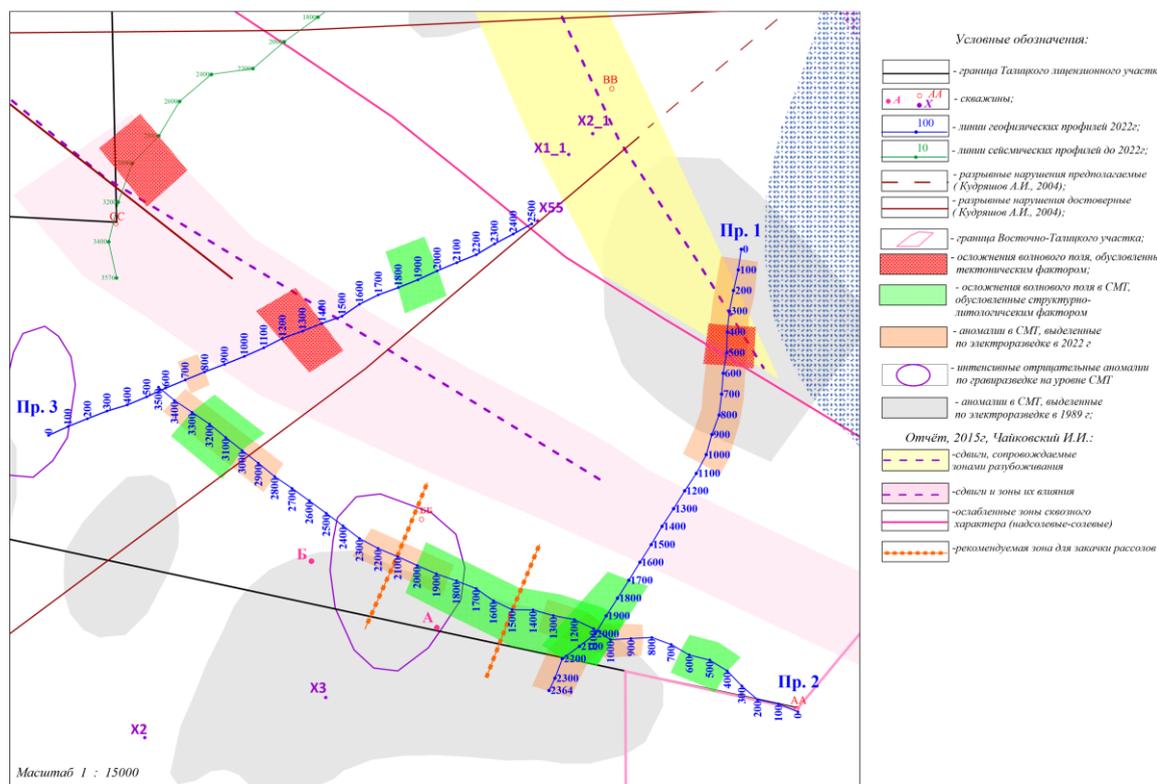


Рис. 5. Результаты комплексной интерпретации геофизических данных 2022 г

Библиографический список

1. Морошкина Ю.Н. [и др.] Технико-экономическое обоснование (ТЭО) постоянных разведочных кондиций и подсчетов запасов калийных солей Талицкого участка Верхнекамского месторождения: Отчет по договору № 070В-2011. – Пермь: ОАО «Галургия», 2012.
2. Сапегин Б.И., Белоликов А.И. Отчет о предварительной разведке южной части Верхнекамского месторождения калийных солей. – Чашкино: СГРП, 1965.
3. Сапегин Б.И., Белоликов А.И. Отчет о разведке Верхнекамского месторождения калийных солей, Талицкий участок (подсчет запасов на 01.01.1969 г.). – Чашкино: СГРП, 1969.
4. Кудряшов А.И., Баяндина Э.О., Пушкова О.С. [и др.] Изучение материалов бурения и разработка исходных геологических данных для составления ТЭО постоянных разведочных кондиций Талицкого участка Верхнекамского месторождения. – Пермь: ООО «НПФ «Геопрогноз», 2010.

5. Санфи́ров И.А., Бычков С.Г., Степа́нов Ю.И. [и др.] Комплексные геофизические исследования особенностей геологического строения надсолевого и соляного комплекса пород на территории лицензионного Талицкого участка Верхнекамского месторождения калийных солей. Отчёт по НИР. – Пермь: «ГИ УрО РАН», 2009.
6. Санфи́ров И.А., Степа́нов Ю.И. [и др.] Комплексные геофизические исследования геологического строения особенностей надсолевого и солевого комплекса пород на площади лицензионного Восточно-Талицкого участка Верхнекамского месторождения солей: Отчет по договору №161/2019. – Пермь: «ГИ УрО РАН», 2020.
7. Чайковский И.И., Трапезников Д.Е., Галинова О.И. [и др.] Общий геолого-тектонический анализ состояния водозащитной толщи Талицкого участка ВКМС: Отчет по договору №08/ОГГео/2014 г. – Пермь: «ГИ УрО РАН», 2015.
8. Санфи́ров И.А. Рудничные задачи сейсморазведки МОГТ. – Екатеринбург: УрО РАН, 1996.
9. Санфи́ров И. А. [и др.] Патент РФ № 2439620 от 15.06.2010 г.
10. Беляев В.П., Орфаницкий В.Л., Петров А.К. Отчет о геофизических работах на Верхнекамской площади за 1987-89 гг. – Пермь: Пермская геологоразведочная экспедиция, 1989.

GEOPHYSICAL SUBSTANTIATION OF RESERVOIR ROCKS FOR INJECTING EXCESS BRINES FROM POTASH PRODUCTION

Trapeznikova A.B., Yaroslavtsev A.G., Sanfirov I.A.,
Stepanov Yu.I., Baibakova T.V.

Mining Institute UB RAS

For citation:

Trapeznikova A.B., Yaroslavtsev A.G., Sanfirov I.A., Stepanov Yu.I., Baibakova T.V. Geophysical substantiation of reservoir rocks for injecting excess brines from potash production // Perm Federal Research Center Journal. – 2023. – № 1. – P. 43–50. <https://doi.org/10.7242/2658-705X/2023.1.5>

A range of geophysical research is substantiated in order to identify reservoirs in the interval of the salt and marl formation of the suprasalt complex of the Verkhnekamskoye potash salt deposit for re-injection of waste brines. The choice of injection interval and localization of places for drilling technological wells is justified by comprehensive interpretation of the data of geophysical well surveys, shallow seismic and vertical electrical sounding. Examples of the results of various geophysical methods used to highlight anomalies associated with reservoirs are presented.

Keywords: reservoirs, shallow seismic exploration, Verkhnekamskoye potash deposit, electrical exploration, well logging.

Сведения об авторах

Трапезникова Анна Борисовна, инженер отдела активной сейсмоакустики, Горный институт УрО РАН – филиал Пермского федерального исследовательского центра УрО РАН («ГИ УрО РАН»), 614907, г. Пермь, ул. Сибирская, 78а; e-mail: a.b.trapeznikova@gmail.com

Ярославцев Александр Геннадьевич, кандидат технических наук, заведующий сектором моделирования сейсмоакустических процессов отдела активной сейсмоакустики, «ГИ УрО РАН»; e-mail: asa_gis@mi-perm.ru

Санфи́ров Игорь Александрович, доктор технических наук, профессор, директор, «ГИ УрО РАН»; e-mail: sanf@mi-perm.ru

Степа́нов Юрий Иванович, кандидат геолого-минералогических наук, доцент, заведующий лабораторией наземной и подземной электрометрии, «ГИ УрО РАН»; e-mail: stepanov@mi-perm.ru

Байбакова Татьяна Викторовна, кандидат технических наук, научный сотрудник отдела активной сейсмоакустики, «ГИ УрО РАН»; e-mail: baybakova@mi-perm.ru

Материал поступил в редакцию 06.02.2023 г.