ГИАБ. Горный информационно-аналитический бюллетень /
MIAB. Mining Informational and Analytical Bulletin, 2022;(5):39-51
ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ / ORIGINAL PAPER

УДК 550.8 DOI: 10.25018/0236_1493_2022_5_0_39

ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ТЕХНОГЕННЫХ МИНЕРАЛИЗОВАННЫХ ВОД С ПОМОЩЬЮ ЭЛЕКТРОРАЗВЕДКИ

А.А. Тайницкий[1], Ю.И. Степанов[1], М.С. Лучников[1], Е.С. Бушуева[1], Л.А. Христенко[1]

[1] Горный институт Уральского отделения РАН, Пермь, Россия, e-mail: tainickiy@mail.ru

Аннотация: Калийное производство связано с образованием значительного количества твердых и жидких отходов, в том числе техногенных рассолов, которые обладают высокой минерализацией. В результате утечки рассолов из накопительных бассейнов на небольших участках около промышленных площадок и объектов хвостового хозяйства происходят необратимые процессы, связанные с засолением почв и грунтов, поверхностных и подземных вод. Электрофизические характеристики наиболее чувствительны к изменению минерализации, поэтому для составления гидрогеологической модели распространения минерализованных вод из шламохранилища и от солеотвала шахтного поля в пределах Верхнекамского месторождения калийных солей были выполнены электроразведочные наблюдения методом вертикального электрического зондирования (ВЭЗ). Поскольку в данном случае отсутствовала информация о минерализации подземных вод, при интерпретации данных электроразведки было выбрано наиболее распространенное представление о зависимости удельного электрического сопротивления пород от минерализации подземных вод: чем ниже сопротивление, тем выше минерализация. На основе анализа данных качественной и количественной интерпретации ВЭЗ выявлена пространственная закономерность выделенных аномальных участков пониженного сопротивления и построена возможная зона повышенного засоления подземных вод. В работе представлены результаты выполненных исследований.

Ключевые слова: электрометрия, отходы калийного производства, загрязнение геологической среды, шламохранилище, минерализация растворов, вертикальное электрическое зондирование, электрическое сопротивление, количественная и качественная интерпретация.

Благодарность: Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и образования Российской Федерации в рамках соглашения по государственному заданию № 075-03-2021-374 от 29 декабря 2020 г. (Рег. номер НИОКТР 122012000398-0).

Для цитирования: *Тайницкий А. А., Степанов Ю. И., Лучников М. С., Бушуева Е. С., Христенко Л. А.* Исследование распространения техногенных минерализованных вод с помощью электроразведки // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2022. – № 5. – С. 39–51. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_5_0_39.

Studies of mineralized process water spreading using electric exploration

A.A. Tajnickij[1], Ju.I. Stepanov[1], L.A. Khristenko[1], M.S. Luchnikov[1], E.S. Bushueva[1]

[1] Mining Institute of Ural Branch, Russian Academy of Sciences, Perm, Russia,
e-mail: tainickiy@mail.ru

© А.А. Тайницкий, Ю.И. Степанов, М.С. Лучников, Е.С. Бушуева, Л.А. Христенко. 2022.

Abstract: Potash production generates much solid and liquid waste, including process brines of high mineralization. Leakage of brines from impounding basins arranged in small areas nearby production infrastructure sites and tailings storage facilities induce irreversible processes connected with salinification of soil, as well as surface and groundwater. The physical and electrical characteristics are the most sensitive to variation in mineralization. Therefore, for the hydrogeological modeling of mineralized water spreading from a waste dump and a tailings pond in a mine field at the Upper Kama Potassium Salt Deposit, electric exploration using the method of vertical electric sounding (VES) was carried out. Since there was no information on groundwater mineralization, the electric exploration data interpretation used the common dependence of electrical resistivity on groundwater mineralization: the higher resistivity means the higher mineralization. The analysis of the quantitative and qualitative interpretation of VES data revealed a regular pattern in spatial location of abnormally decreased resistivity sites, and a zone of potentially increased groundwater salinification was outlined. This article describes the implemented research findings.

Key words: electrometry, potash production waste, geological environment pollution, tailings pond, mineralization of solutions, vertical electric sounding, electrical resistivity, quantitative and qualitative interpretation.

Acknowledgements: The study was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation under State Contract No. 075-03-2021-374 dated December 29, R&D Registration No. 122012000398-0.

For citation: Tajnickij A. A., Stepanov Ju. I., Khristenko L. A., Luchnikov M. S., Bushueva E. S. Studies of mineralized process water spreading using electric exploration. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022;(5):39-51. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_5_0_39.

Введение

Добыча и переработка калийных руд связаны с образованием значительного количества твердых и жидких отходов, в том числе техногенных рассолов. Рассолы формируются в процессе технологического передела (обогащения) калийных руд и в результате растворения атмосферными осадками твердых отходов, складируемых на земной поверхности. Жидкие отходы накапливаются в шламохранилищах, прудах-отстойниках и рассолосборниках. Повторно не использованные в технологическом цикле обогащения руд рассолы являются избыточными. Вследствие фильтрационных потерь рассолов из накопительных бассейнов на локальных участках вблизи промплощадок и объектов хвостового хозяйства происходят необратимые процессы засоления почв и грунтов, поверхностных и подземных вод [1]. Задачи геоэкологической оценки территории, подвергающейся техногенной нагрузке, могут быть решены геофизическими методами [2]. Применение геофизических исследований в современной калийной отрасли на протяжении более двух десятков лет является обязательным. Комплекс геофизических исследований на Верхнекамском месторождении калийно-магниевых солей (ВКМКС) включает грави-, сейсмо- и электроразведку [3—6]. Геолого-геофизический мониторинг, включающий электроразведочные исследования, используется для контроля сохранения сплошности водозащитной толщи и выявления негативных измене-

ний состояния горного массива на потенциально опасных участках шахтных полей [7, 8].

При этом широко используются методы, которые призваны выполнять гидрогеологическое картирование с определением мощности пластов, состава покровных и коренных пород, водоносных и водоупорных горизонтов. Методы электрометрии позволяют отслеживать динамику подземных вод, гидрогеологический режим водозаборов [9] и др. Загрязненные подземные воды характеризуются значительно сниженным удельным электрическим сопротивлением. Геофизические методы, в частности методы измерения сопротивления постоянному току, чувствительны к этому физическому параметру. Применение методов сопротивления может позволить провести пространственную оценку качества подземных вод вблизи полигонов. От типа загрязнения и геологического строения территории, в которой оказывается это загрязнение, зависит выбор применяемого метода [10—12]. При повышении минерализации порового флюида исследуемого массива загрязняющим компонентом принято реализовывать такие методы, как вертикальное электрическое зондирование, естественное поле, вызванная поляризация и электропрофилирование. Электрическое сопротивление обладает наибольшей чувствительностью среди всех других физических характеристик горных пород к изменению общей минерализации растворов, которые фильтруются сквозь горный массив. Электрофизические характеристики верхней части разреза позволяют выделить зоны низких значений удельного сопротивления, которые относятся к путям миграции загрязненных подземных вод [13]. Исходя из всего вышеперечисленного, методы электрометрии являются неотъемлемой частью диагностики территории при выполнении инженерно-экологических изысканий [10], а метод вертикального электрического зондирования (ВЭЗ), обладая высокой разрешающей способностью, позволяет к тому же получить литологическое расчленение зон фильтрационных потоков.

В статье представлены исследования закономерностей пространственного распространения областей пониженного сопротивления, позволившие построить зону повышенного засоления подземных вод. Области пониженного сопротивления были получены в результате качественной и количественной интерпретации зондирований, выполненных на территории Верхнекамского месторождения калийных солей.

Цели и задачи

Целью представленных исследований являлся прогноз распространения ореола загрязнения подземных вод на участке влияния солеотвала и шламохранилища.

Для этого необходимо было решить ряд задач: выполнить полевые электроразведочные работы методом ВЭЗ; провести обработку и интерпретацию полученных данных, включая построение разрезов кажущихся сопротивлений (КС), схем изменения КС, анализ параметрических ВЭЗ, построение геоэлектрических разрезов; по результатам интерпретации выделить зоны, связанные с повышенной минерализацией подземных вод.

Оборудование и методы

Полевые электроразведочные работы методом вертикального электрического зондирования были выполнены с использованием классической симметричной четырехэлектродной установки Шлюмберже по пяти профилям. Максимальный полуразнос питающей линии *AB* составлял 500 м. Зондирования выполнялись современной аппаратурой

метода сопротивления АМС-1, изготовленной при содействии сотрудников кафедры геофизики Пермского государственного университета и ООО НПП «Интромаг».

Качественная и количественная интерпретация полученных данных осуществлялась с помощью пакета программ IPI-1D (МГУ), а построение объемной модели проводилось в графической среде программы Golden Software Voxler.

Выполненный анализ четырех параметрических зондирований вблизи скважин и данных бурения показал, что в результатах интерпретации находят отражение практически все основные комплексы пород, включая четвертичные отложения, отложения пестроцветной (ПЦТ), терригенно-карбонатной (ТКТ), соляномергельной (СМТ) и нерасчлененной толщи переходной пачки и покровной каменной соли (ПП+ПКС). Граница кровли опорного электрического горизонта относится как к кровле переходной пачки, так и к кровле покровной каменной соли. Условно опорный электрический горизонт отождествляется с кровлей нерасчлененной толщи.

Первые геоэлектрические слои сложены четвертичными отложениями. Их можно описать большим диапазоном удельных электрических сопротивлений (УЭС): от нескольких единиц до нескольких десятков Ом*м. Мощность этих отложений варьирует от 1 до 20 м.

Ниже выделяются верхнепермские пестроцветные отложения, которые были зафиксированы только в одной скважине из четырех. Следующие два геоэлектрических горизонта соотносятся с отложениями терригенно-карбонатной толщи (ТКТ), которая представлена известняком с прослоями глины. Судя по широкому диапазону УЭС этой толщи на данном участке (от 13 до 119 Ом*м), следует предположить, что электропроводимость в основном зависит от степени минерализации подземных вод. Мощность горизонтов колеблется от 40 до 100 м.

Последний геоэлектрический горизонт, отмеченный в основном повышенными значениями электропроводимости, соответствует отложениям пород соляномергельной толщи (СМТ). Данный горизонт относительно слабо проявляется

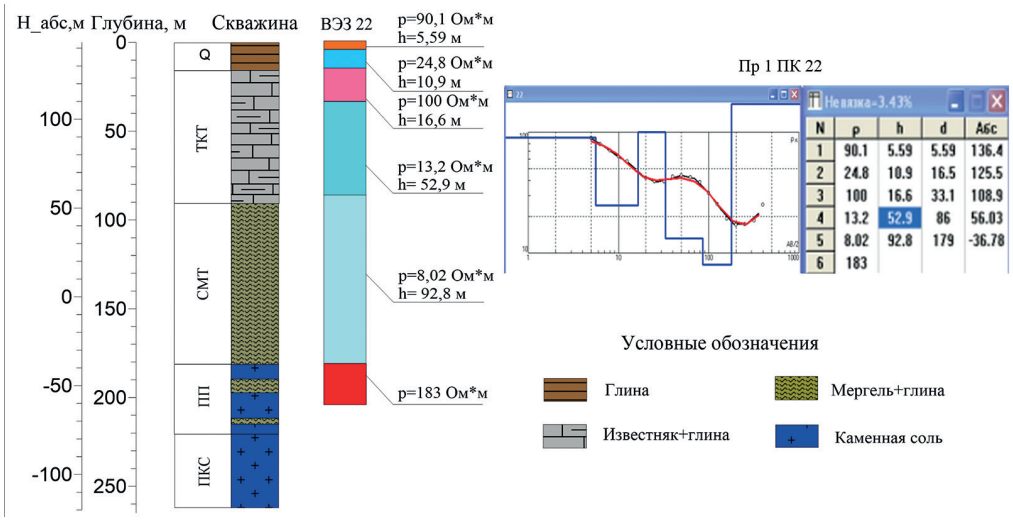


Рис. 1. Результаты параметрического зондирования
Fig. 1. Parametric sounding results

на кривых зондирования, что затрудняет литологическую привязку его верхней границы, вследствие чего граница ТКТ–СМТ проведена условно, основываясь на данных бурения. Кровля шестого горизонта приурочена к верхним солям. На рис. 1 в качестве примера приводятся результаты параметрического зондирования вблизи скважины.

Разрезы кажущегося сопротивления и геоэлектрические разрезы на рис. 2 построены по результатам качественной и количественной интерпретации зондирований, выполненных по двум субпараллельным профилям, проложенным в северо-восточном направлении.

При решении задачи определения повышенной минерализации подземных вод исходили из того, что участкам повышенной минерализации (засолонения) соответствуют пониженные значения КС. На разрезах кажущегося сопротивления таким участкам соответствуют значения КС от нескольких единиц до 20 Ом*м. На геоэлектрических разрезах они отображаются сине-черными цветами.

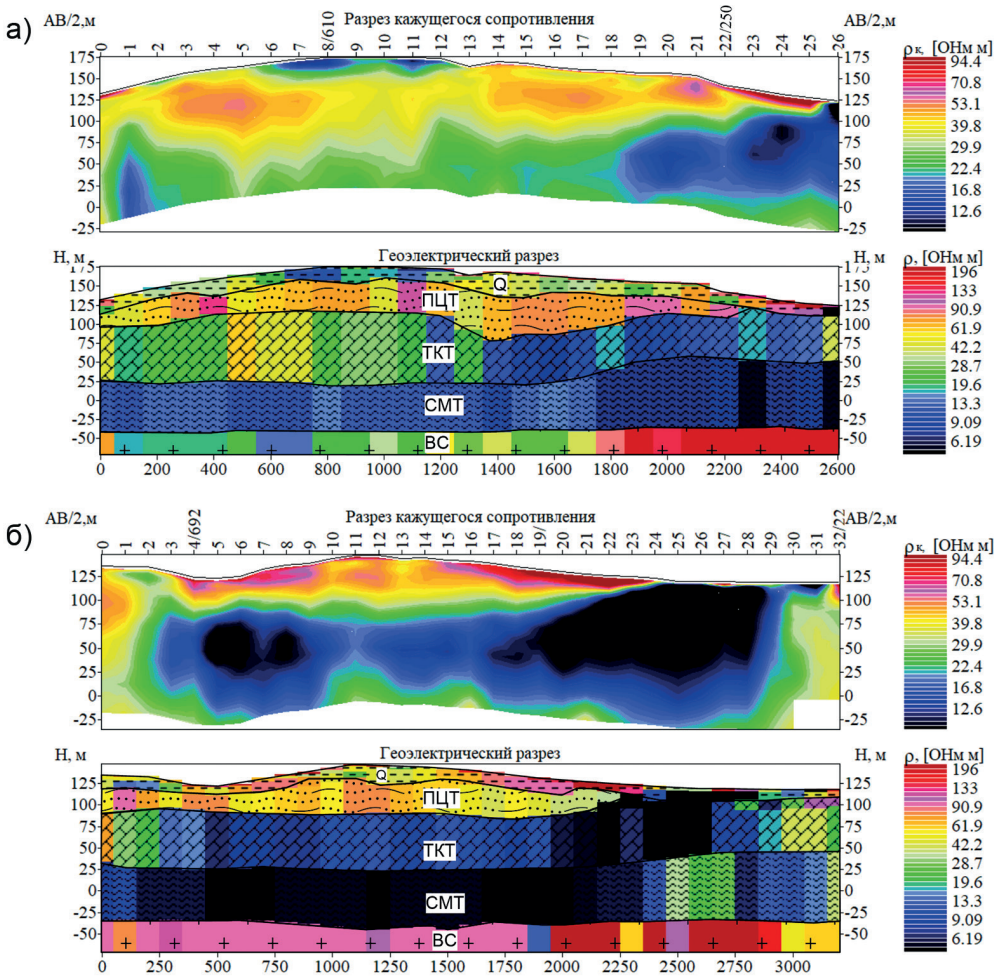


Рис. 2. Разрезы кажущегося сопротивления и геоэлектрические разрезы по профилю 1 (а) и 2 (б)
Fig. 2. Apparent resistivity sections and geoelectrical sections in profile 1 (a) and 2 (b)

На профиле 1 (рис. 2, *а*) в северной части, начиная с ПК 26, выделяется аномалия пониженных значений сопротивления, обусловленная влиянием шламохранилища. На разрезе КС видно, что пониженные значения КС, обусловленные повышенной минерализацией подземных вод, на ПК 26 прослеживаются практически с самых первых разносов. К ПК 18, судя по характеру изменения значений КС, область засоления погружается до абсолютной отметки 80 м. К югу вдоль профиля до ПК 12 значения сопротивления незначительно возрастают, что может свидетельствовать об уменьшении уровня засоления. На геоэлектрическом разрезе в отложениях ТКТ область пониженных сопротивлений прослеживается до ПК 14. Приповерхностная аномалия пониженных сопротивлений с эпицентром на ПК 8, вероятнее всего, связана с повышением трещиноватости и влажности пород вблизи скважины. Аномалия пониженных сопротивлений (ПК 0—3) может быть связана с повышенной минерализацией грунтовых вод в интервале трещиноватых известняков терригенно-карбонатной толщи.

Профиль 2 расположен в 500—600 м к северо-западу от профиля 1. На профиле 2 (рис. 2, *б*), между ПК 24–29, аномалия пониженных значений сопротивления отмечается с самых первых разносов — это обусловлено непосредственной близостью профиля к озеру, и прослеживается до абсолютных отметок 0—20 м. К юго-востоку вдоль профиля верхняя граница аномалии пониженных значений КС погружается и на ПК 13 достигает абсолютной отметки 80 м. Нижняя граница аномалии от ПК 24 с абсолютной отметки 10 м к ПК 13 поднимается до отметки 40 м.

Вторая аномалия пониженных значений КС наблюдается от пересечения профиля рекой, между ПК 4—9. Верхняя граница аномалии приурочена к абсолютной отметке 70 м, нижняя — к отметке 10 м. Обе аномалии можно объединить в одну протяженную область пониженных сопротивлений, от ПК 3 до ПК 29. Это хорошо заметно по результатам количественной интерпретации на геоэлектрическом разрезе.

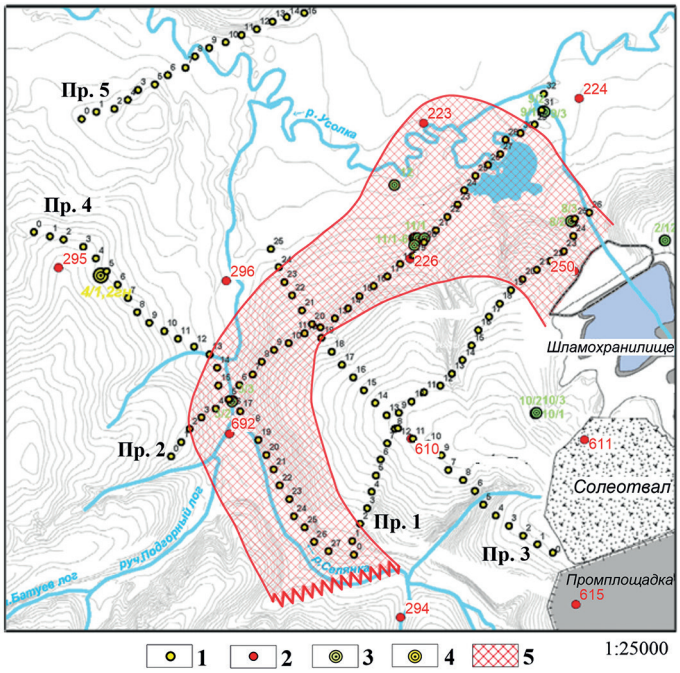
Профили 3 и 4 простираются в северо-западном направлении и перпендикулярно пересекают профили 1 и 2. Полученные в интервалах их пересечений кажущиеся сопротивления согласуются между собой.

Результаты

Расположение профилей и полученные по результатам анализа данных количественной интерпретации аномалии пониженных значений сопротивления позволили оконтурить зону повышенной минерализации подземных вод, связанную с отходами калийного производства (рис. 3).

Подковообразная зона повышенной проводимости (минерализации) обращена выпуклой частью на северо-запад. Она простирается от шламохранилища до южного края участка исследований, а длина ее составляет около 3 км.

Для различных глубин исследования были построены схемы интерполированных значений кажущегося сопротивления, которые позволяют визуально оценить характер изменения КС с глубиной. Эффективная глубина проникновения тока при этом определяется из соотношения $Z_{эф} = AB/6$. Т.е., если $AB/2 = 100$ м, то эффективная глубина находится в пределах 30—40 м. На схемах изменений КС с разносами $AB/2$ = 40, 80 и 160 м, приведенных на рис. 4, видно, что по мере увеличения глубины исследований отдельные аномалии пониженных значений сопротивления консолидируются в области, которые прослеживаются практически по всей надсолевой толще



1 — пикет ВЭЗ;

2 — геологоразведочные скважины;

3 — скважины режимной сети;

4 — контрольно-наблюдательные скважины 4/1,2 Гн;

5 — зона повышенной минерализации подземных вод по данным электроразведки

Рис. 3. Зона повышенного засоления подземных вод
Fig. 3. High groundwater salinification zone

(пр. 1 ПК 0 — 2, 18 — 26; пр. 2 ПК 3 — 29; пр. 3 ПК 20 — 24; пр. 4 ПК 13 — 27). С разносов *AB*/2 до 80 м и 125 м выделяется единая дугообразная низкоомная зона. При данных разносах питающей линии глубину исследований следует относить к отложениям ТКТ и, следовательно, выделенная зона приурочена к области повышенной минерализации подземных вод в этой части разреза.

По результатам исследований для объемной визуализации в графической среде программы Golden Software Voxler была построена 3D-модель области кажущегося сопротивления 20 Ом*м, представленная на рис. 5 [14].

Поскольку в данном случае отсутствовала информация о минерализации подземных вод, при интерпретации данных электроразведки было выбрано наиболее распространенное представление о зависимости удельного электрического сопротивления пород от минерализации подземных вод: чем ниже сопротивление, тем выше минерализация. Фактически же эта зависимость носит более сложный характер от таких параметров, как пористость, дисперсность, влагосодержание, структурная связанность частиц, минерализация содержащихся в породе вод, а также от гидродинамических показателей, таких как коэффициент фильтрации, влагопроводность, скорость движения подземных вод и т.д.

Связь между сопротивлением породы и насыщающей ее воды описывается формулой Арчи:

$$\rho = P_{п} \cdot \rho_{ср}, \qquad (1)$$

где $\rho_{ср}$ — среднее (фиктивное) удельное сопротивление влаги. Величина $\rho_{ср}$ рассматривается как результирующая от параллельно включенных сопротивлений двойного электрического слоя ($\rho_{сл}$), занимающего объем пор, равный $Z_{сл}$, и свободной воды ($\rho_{в}$) объемом ($1 - Z_{сл}$). Для

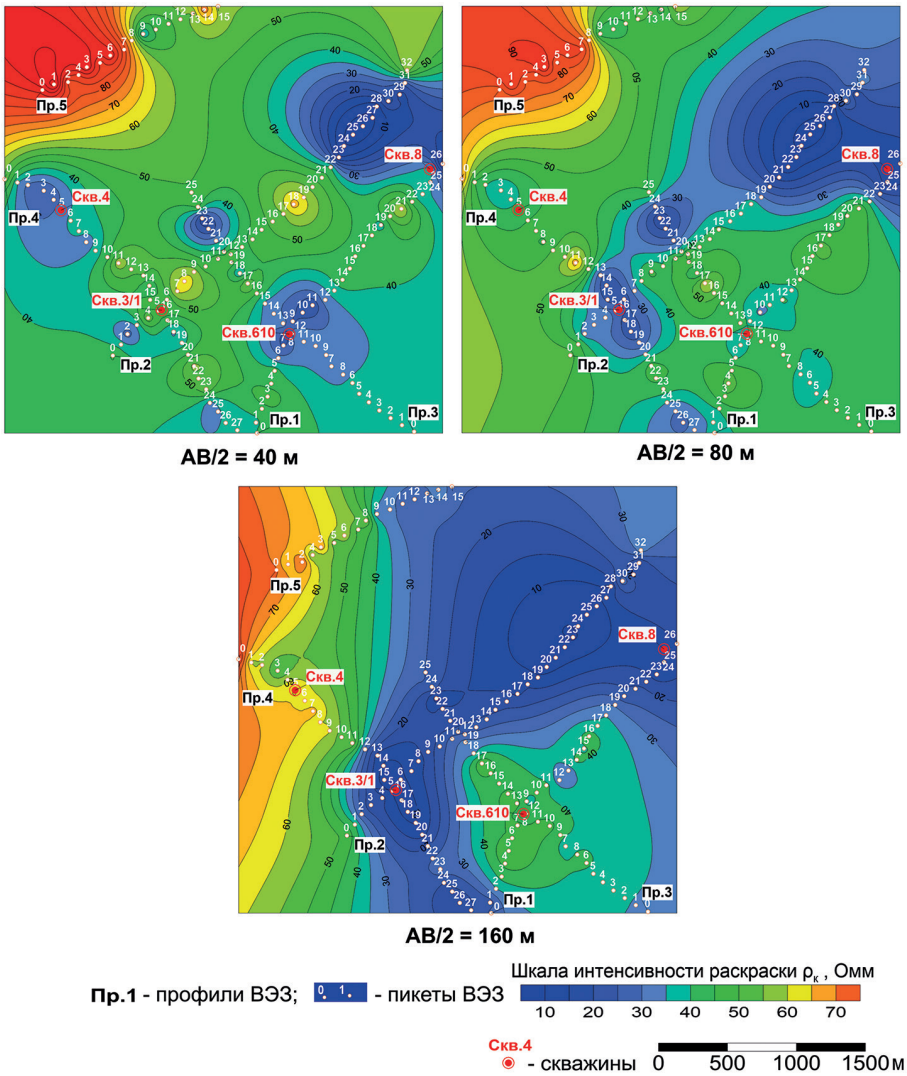


Рис. 4. Схемы интерполированных значений кажущегося сопротивления
Fig. 4. Interpolated apparent resistivity diagrams

упрощения допускается взаимосвязь величин $\rho_{сл}$ и $\rho_в$, выявленная эмпирически.

Однако в таком виде эта формула применяется только в нефтяной геофизике при хорошо сложенных песчаных коллекторах, насыщенных высокоминерализованной водой. Для гидрогеологической модели сопротивления М.М. Элланским [15] предложено использовать усовершенствованную формулу:

$$\rho = \frac{a\rho_B}{W^{m\mu/n_0}\left(1+\left(1-\mu/n_0\right)^{\alpha_1(\mu/n_0)^{\alpha_2}}\cdot\left(\alpha_3\rho_B-1\right)\right)} \quad (2)$$

где a, m — экспериментально найденные константы (чаще всего $a = 1$, $m = 2$); W — водонасыщенность породы; μ/n_0 — относительная водоотдача породы; α_1, α_2, α_3 — достаточно стабильные кон-

станты, определяемые экспериментально (для центральной Европейской части России α_1, α_2 = 2, α_3 = 0,63).

В качестве примера на рис. 6 изображены графики ρ, рассчитанные для полностью водонасыщеных пород (W_e = = W_A) в зависимости от величины μ/n_0 при фиксированном параметре W_A = 0,3. Графики отражают экспериментально установленное: 1 — выполаживание и выход на асимптоту кривых ρ при высоких значениях $\rho_в$ (пресные воды); 2 — наличие узколокализованной области пересечения кривых ρ как следствие того, что в зоне развития пресных вод, при одинаковом влагосодержании высоко проницаемые (слабоглинистые) породы отличаются от низко проницаемых пород повышенным значением ρ. В зоне развития рассолов картина меняется на противоположную, а при $\rho_в \approx \rho_{св}$ (предельное удельное сопротивление рыхлосвязанной воды при $W_м/n_0 \to 1$) дифференциация пород вне зависимости от μ/n_0 отсутствует [16].

Очевидно, что одному значению сопротивления породы при разных коэффициентах водоотдачи соответствует несколько значений сопротивления воды, которое напрямую зависит от ее минерализации. Следует также отметить, что коэффициент водоотдачи имеет обратную корреляционную связь с коэффициентом глинистости.

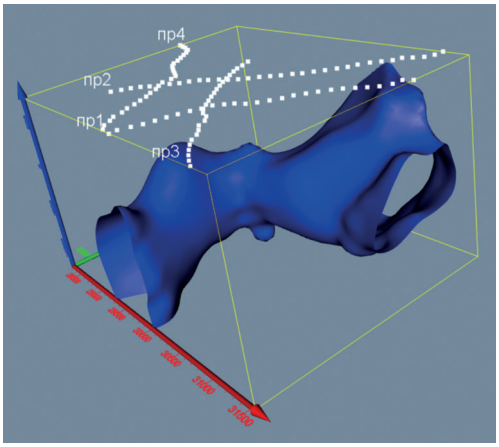


*Рис. 5. Область КС = 20 Ом*м (3D-модель)*
Fig. 5. Zone of AR = 20 Ohm×m (3D model)

Кроме того, зависимость УЭС от минерализации определяется еще и температурой. Количественная оценка степени минерализации подземных вод при игнорировании влияния любого из этих

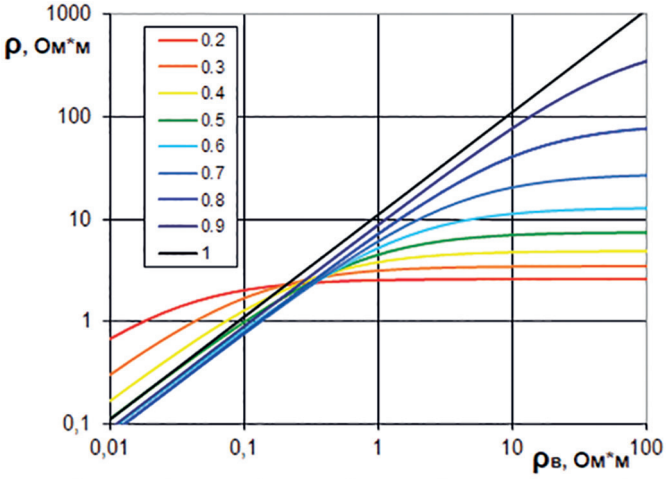


Рис. 6. Зависимости ρ от $\rho_в$, рассчитанные для пород с межзерновой пористостью $W = n_0$ = 0,3. Шифр кривых μ/n_0
Fig. 6. Relationship of ρ and ρ_w for rocks with interparticle porosity $W = n_0$ = 0,3. Code of curves μ/n_0

факторов может привести к существенным погрешностям.

Заключение

Таким образом, по результатам качественной и количественной интерпретации ВЭЗ построены разрезы кажущихся сопротивлений и геоэлектрические разрезы, схемы изменения кажущихся сопротивлений для различных разносов питающей линии, выполнен анализ параметрических ВЭЗ.

На основе анализа данных интерпретации выявлена пространственная закономерность выделенных аномальных участков и последние объединены в возможную зону повышенной минерализации подземных вод.

Повторение вертикального электрического зондирования в будущем позволит отслеживать перемещение засоления в пределах водоносного горизонта.

Вклад авторов

Тайницкий А.А. — качественная и количественная интерпретация данных, написание текста статьи.

Степанов Ю.И. — генерация идеи исследования, постановка задачи исследования, контроль всех стадий работ, помощь в написании статьи.

Лучников М.С. — проведение полевых работ, получение данных для анализа.

Бушуева Е.С. — анализ результатов исследования и подготовка данных, помощь в написании статьи.

Христенко Л.А. — помощь в написании статьи, обзор литературы, редактирование рукописи.

Авторы выражают признательность за помощь коллегам и сотрудникам, чей вклад в данную работу носил чисто технический характер.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Князев В. В.*, *Комаров Ю. А.* Способ размещения шламохранилища на территории будущего солеотвала // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2015. — № 5. — С. 97—101.

2. *Александров П. Н.*, *Модин И. Н.* О системном подходе к анализу данных электрометрического мониторинга // Инженерные изыскания. — 2015. — № 3. — С. 42—50.

3. *Санфиров И. А.*, *Степанов Ю. И.*, *Фатькин К. Б.*, *Герасимова И. Ю.*, *Никифорова А. И.* Малоглубинные геофизические исследования на Верхнекамском месторождении калийных солей // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. — 2013. — № 6. — С. 71—78.

4. *Санфиров И. А.*, *Ярославцев А. Г.*, *Никифоров В. В.*Инженерно-геофизические исследования приповерхностных природно-техногенных процессов и неоднородностей // Горный журнал. — 2014. — № 12. — С. 8—12.

5. *Бычков С. Г.*, *Долгаль А. С.*, *Симанов А. А.* Синтез качественных и количественных методов извлечения информации из гравиметрических данных // Горный журнал. — 2013. — № 6. — С. 26—29.

6. *Жуков А. А.*, *Колесников В. П.*, *Ласкина Т. А.* Мониторинговый контроль физического состояния среды методами электрометрии на потенциально опасных участках образования деформаций земной поверхности // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2015. — № 4. — С. 163—171.

7. *Khristenko L. A.*, *Stepanov J. I.*, *Kichigin A. V.*, *Parshakov E. I.*, *Tainickiy A. A.*, *Shiryaev K. N.* Using of probabilistic-statistical characteristics in the interpretation of electrical survey monitoring observations / Practical and Theoretical Aspects of Geological Interpretation of Gravitational, Magnetic and Electric Fields: Proceedings of the 45th Uspensky International Geophysical Seminar. Springer Proceedings in Earth and Environmental Sciences, Springer, Cham, 2019, pp. 313—320. DOI: 10.1007/978-3-319-97670-9_36.

8. *Hristenko L. A., Kichigin A. V., Parshakov E. I., Shiryaev K. N., Stepanov Y. I., Tainickiy A. A.* Improvement of interpretation of the monitoring data electrical investigation by means of the theory of estimates / Engineering Geophysics 2017. 13th Conference and Exhibition on Engineering Geophysics. Conference Proceedings. 2017, article 129037. DOI: 10.3997/2214-4609.201700419.

9. *Степанов Ю. И., Мухаметшин А. М.* Выделение глубинных аномальных водотоков на основе измерения естественного поля при комплексных исследованиях урбанизированных территорий // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2010. — № 12. — С. 130—134.

10. *Федорова О. И.* Комплексирование вертикальных и дифференциальных электрозондирований при инженерно-геологических и геоэкологических исследованиях // Геофизические исследования. — 2014. — Т. 15. — № 2. — С. 38—46.

11. *Duda R., Mżyk S, Farbisz J., Bania G.* Investigating the pollution range in groundwater in the vicinity of a tailings disposal site with vertical electrical soundings // Polish Journal of Environmental Studies. 2020, vol. 29, no. 1, pp. 101—110. DOI: 10.15244/pjoes/100478.

12. *Wilkinson P., Chambers J, Uhlemann S., Meldrum P., Smith A., Dixon N., Loke M. H.* Reconstruction of landslide movementsby inversion of 4-D electrical resistivity tomography monitoring data // Geophysical Research Letters. 2016, no. 43. DOI:10.1002/2015GL067494.

13. *Raji W. O., Adeoye T. O.* Geophysical mapping of contaminant leachate around a reclaimed open dumpsite // Journal of King Saud University — Science. 2017, no. 29, pp. 348—359. DOI: 10.1016/j.jksus.2016.09.005.

14. *Ширяев К. Н.* Определение области загрязнения подземных вод техногенными рассолами с помощью электроразведки / XVII Уральская молодежная научная школа по геофизике. Сборник докладов. — Екатеринбург: ИГФ УрО РАН, 2016. — С. 200—202.

15. *Элланский М. М.* Петрофизические связи и комплексная интерпретация данных промысловой геофизики. — М.: Недра, 1978. — 215 с.

16. *Огильви А. А.* Основы инженерной геофизики: Учебник для вузов / Под ред. В.А. Богословского. — М.: Недра, 1990. — 501 с. ГИАБ

REFERENCES

1. Knyazev V. V., Komarov Yu. A. Placement type of slurry pits on the territory of the future saline dump. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2015, no. 5, pp. 97—101. [In Russ].

2. Alexandrov P. N., Modin I. N. About system approach to data of electrometric monitoring. *Inzhenernye izyskaniya.* 2015, no. 3, pp. 42—50. [In Russ].

3. Sanfirov I. A., Stepanov Yu. I., Fatkin K. B., Gerasimova I. Yu., Nikiforova A. I. Shallow depth geophysical surveys at the Verkhnekamskoe potassium salt deposit. *Fiziko-tekhnicheskiye problemy razrabotki poleznykh iskopayemykh.* 2013, no. 6, pp. 71—78. [In Russ].

4. Sanfirov I. A., Yaroslavtzev A. G., Nikiforov V. V. Engineering geological studies of near-surface natural and technogenic processes and heterogeneity. *Gornyi Zhurnal.* 2014, no. 12, pp. 8—12. [In Russ].

5. Bychkov S. G., Dolgal A. S., Simanov A. A. Synthesis of qualitative and quantitative methods of information extraction from gravimetric data. *Gornyi Zhurnal.* 2013, no. 6, pp. 26—29. [In Russ].

6. Zhukov A. A., Kolesnikov V. P., Laskina T. A. Monitoring control of physical state of the environment by the electrometry methods on the earth's surface deformation potentially dangerous areas. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2015, no. 4, pp. 163—171. [In Russ].

7. Khristenko L. A., Stepanov J. I., Kichigin A. V., Parshakov E. I., Tainickiy A. A., Shiryaev K. N. Using of probabilistic-statistical characteristics in the interpretation of electrical survey monitoring observations. *Practical and Theoretical Aspects of Geological Interpretation of Gravitational, Magnetic and Electric Fields: Proceedings of the 45th Uspensky International*

Geophysical Seminar. Springer Proceedings in Earth and Environmental Sciences, Springer, Cham, 2019, pp. 313—320. DOI: 10.1007/978-3-319-97670-9_36.

8. Hristenko L. A., Kichigin A. V., Parshakov E. I., Shiryaev K. N., Stepanov Y. I., Tainickiy A. A. Improvement of interpretation of the monitoring data electrical investigation by means of the theory of estimates. *Engineering Geophysics 2017. 13th Conference and Exhibition on Engineering Geophysics. Conference Proceedings*. 2017, article 129037. DOI: 10.3997/2214-4609.201700419.

9. Stepanov Yu. I., Mukhametshin A. M. Selection of deep abnormal watercourse based on measurements of natural field in complex studies of urban areas. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2010, no. 12, pp. 130—134. [In Russ].

10. Fedorova O. I. Integration of vertical and differential electrosounding in engineering geological and geoecological studies. *Geofizicheskie issledovaniya*. 2014, vol. 15, no. 2, pp. 38—46. [In Russ].

11. Duda R., Mżyk S, Farbisz J., Bania G. Investigating the pollution range in groundwater in the vicinity of a tailings disposal site with vertical electrical soundings. *Polish Journal of Environmental Studies*. 2020, vol. 29, no. 1, pp. 101—110. DOI: 10.15244/pjoes/100478.

12. Wilkinson P., Chambers J, Uhlemann S., Meldrum P., Smith A., Dixon N., Loke M. H. Reconstruction of landslide movementsby inversion of 4-D electrical resistivity tomography monitoring data. *Geophysical Research Letters*. 2016, no. 43. DOI:10.1002/2015GL067494.

13. Raji W. O., Adeoye T. O. Geophysical mapping of contaminant leachate around a reclaimed open dumpsite. *Journal of King Saud University — Science*. 2017, no. 29, pp. 348—359. DOI: 10.1016/j.jksus.2016.09.005.

14. Shiryaev K. N. Qualification of groundwater pollution area by the technogenic brines with the help of electrical survey. *XVII Ural'skaya molodezhnaya nauchnaya shkola po geofizike. Cbornik dokladov* [XVII Ural Youth Scientific School of Geophysics. Collection of reports], Ekaterinburg, IGF UrO RAN, 2016, pp. 200—202.

15. Ellanskiy M. M. *Petrofizicheskie svyazi i kompleksnaya interpretatsiya dannykh promyslovoy geofiziki* [Petrophysical communications and complex interpretation of the data of field geophysics], Moscow, Nedra, 1978, 215 p.

16. Ogilvi A. A. *Osnovy inzhenernoy geofiziki*: Uchebnik dlya vuzov. Pod red. V. A. Bogoslovskogo [Fundamentals of engineering geophysics. Textbook for high schools. Bogoslovskiy V. A. (Ed.)], Moscow, Nedra, 1990, 501 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Тайницкий Александр Александрович[1] — инженер,
e-mail: tainickiy@mail.ru,
ORCID ID: 0000-0002-0567-6187,
Степанов Юрий Иванович[1] — канд. геол.-минерал. наук,
доцент, e-mail: stepanov@mi-perm.ru,
ORCID ID: 0000-0002-8107-6562,
Лучников Максим Сергеевич[1] — инженер,
e-mail: maximluchnikov@mail.ru,
ORCID ID: 0000-0001-7404-6958,
Бушуева Екатерина Сергеевна[1] — инженер,
e-mail: katerina.bushueva@mail.ru,
ORCID ID: 0000-0002-0067-3868,
Христенко Людмила Анатольевна[1] — канд. геол.-минерал. наук,
доцент, e-mail: liudmila.hristenko@yandex.ru,
ORCID ID: 0000-0002-1234-2599,
[1] Горный институт Уральского отделения РАН.
Для контактов: Тайницкий А.А., e-mail: tainickiy@mail.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

A.A. Tajnickij[1], Engineer, e-mail: tainickiy@mail.ru,
ORCID ID: 0000-0002-0567-6187,
Yu.I. Stepanov[1], Cand. Sci. (Geol. Mineral.),
Assistant Professor, e-mail: stepanov@mi-perm.ru,
ORCID ID: 0000-0002-8107-6562,
M.S. Luchnikov[1], Engineer, e-mail: maximluchnikov@mail.ru,
ORCID ID: 0000-0001-7404-6958,
E.S. Bushueva[1], Engineer, e-mail: katerina.bushueva@mail.ru,
ORCID ID: 0000-0002-0067-3868,
L.A. Hristenko[1], Cand. Sci. (Geol. Mineral.),
Assistant Professor, e-mail: liudmila.hristenko@yandex.ru,
ORCID ID: 0000-0002-1234-2599,
[1] Mining Institute of Ural Branch, Russian Academy of Sciences,
614007, Perm, Russia.
Corresponding author: A.A. Tajnickij, e-mail: tainickiy@mail.ru.

Получена редакцией 01.11.2021; получена после рецензии 02.03.2022; принята к печати 10.04.2022.
Received by the editors 01.11.2021; received after the review 02.03.2022; accepted for printing 10.04.2022.

ОТДЕЛЬНЫЕ СТАТЬИ ГОРНОГО ИНФОРМАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКОГО БЮЛЛЕТЕНЯ (СПЕЦИАЛЬНЫЙ ВЫПУСК)

КАМЧАТКА-11

(2021, № 11, СВ 19, 464 с.)

Коллектив авторов

Представлены новые результаты комплексных геолого-геофизических исследований в области металлогении никеленосных провинций Дальнего Востока, прибрежно-морских россыпей Западной Камчатки, а также геоэкологической оценки территории Камчатского края. Рассмотрены микробиологические аспекты бактериально-химического растворения сульфидных минералов кобальт-медно-никелевых руд, представлены способы активации кинетики процессов, разработаны укрупненные проточные каскадные реакторы, а также сорбционные и экстракционные способы извлечения металлов из продуктивных растворов. Представлены новые результаты извлечения и использования ценных компонентов из гидротермальных растворов современных геотермальных систем, технологии комплексного освоения геотермальных ресурсов Камчатского края, тепловых и минеральных ресурсов близповерхностных очагов магматогенных геотермальных систем, а также технико-экономического и экологического анализа их разработки.

KAMCHATKA-11

Team of authors

New results of complex geological and geophysical studies in the field of metallogeny of nickel-bearing provinces of the Far East, coastal-marine placers of Western Kamchatka, as well as geoecological assessment of the territory of the Kamchatka Territory are presented. Microbiological aspects of bacterial and chemical dissolution of sulfide minerals of cobalt-copper-nickel ores are considered, methods for activating the kinetics of processes are presented, enlarged flow cascade reactors are developed, as well as sorption and extraction methods for extracting metals from productive solutions. New results of extraction and use of valuable components from hydrothermal solutions of modern geothermal systems, technologies of integrated development of geothermal resources of the Kamchatka Territory, thermal and mineral resources of near-surface foci of magmatogenic geothermal systems, as well as technical, economic and environmental analysis of their development are presented.