

А.А. Жуков, А.М. Пригара, И.Ю. Пушкарева, Р.И. Царев

ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ КОМПЛЕКСА ГЕОФИЗИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ДЛЯ ВЫЯВЛЕНИЯ КАРСТОВЫХ ПОЛОСТЕЙ В ОТВАЛАХ КАЛИЙНЫХ РУДНИКОВ

Описан опыт применения комплекса геофизических методов для выявления процессов карстообразования в отвалах калийной промышленности. Для этих целей опытным путем определен рациональный комплекс, включающий в себя метод вертикального электрического зондирования с использованием трехэлектродной установки и метод отраженных волн по методике общей глубинной точки с регистрацией р-волн. Выбранный комплекс прошел апробацию при выполнении геофизических работ для решения задачи поиска и оконтуривания карстовых полостей в теле солеотвалов рудников ПАО «Уралкалий».

Ключевые слова: солеотвал, карст, электрическое зондирование, сейсморазведка, электрическое сопротивление, годограф дифрагированной волны, рациональный комплекс геофизических методов, интерпретация.

Одной из основных задач при разработке месторождений полезных ископаемых является обеспечение безопасности ведения горных работ. Отходы калийной промышленности, образующиеся в ходе обогащения, складываются в виде насыпей на поверхности земли – солеотвалов (терриконов). Попадающая рыхлыми в отвал, эти отходы со временем уплотняются и превращаются в монолитный техногенный массив. Однако в силу легкой растворимости калийных солей сплошность этого массива может быть нарушена под воздействием вод как естественного, так и техногенного происхождения. В результате на поверхности и в теле солеотвала образуются карстовые полости, представляющие опасность для техники и людей. Поэтому своевременному выявлению процессов карстообразования и проведению мероприятий по ликвидации карста в соляных отвалах необходимо уделять особое внимание. Поиски полостей прямыми методами затруднены ввиду их высокой стоимости, низкой оперативности, а также возможной

опасности для буровой техники. Геофизические же методы отличаются от прямых сравнительно высокой скоростью выполнения работ и низкой стоимостью, что открывает перспективу их применения для локализации полостей. Контрастность физических свойств искомого объектов (карстовых полостей) и вмещающей среды (солеотвалов) является еще одной важной предпосылкой для применения геофизических методов.

Опыт применения геофизических методов в целях обнаружения и изучения карстовых процессов достаточно велик. Однако в основном он относится к обнаружению полостей в таких карстующихся породах, как известняки, доломиты, гипсы, ангидриты, соли в естественном залегании. Карст в соляных отвалах это особый подтип соляного карста, который нуждается в тщательном изучении.

Как показывает мировой опыт, эффективное изучение карста возможно лишь на основании применения комплекса геофизических методов. Обеспечение надежности решения задач,

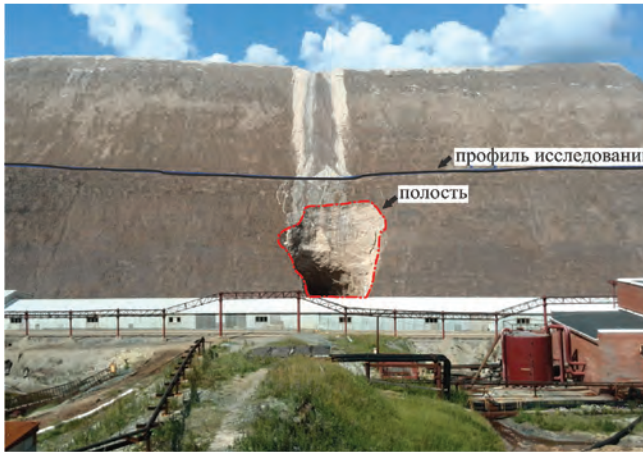


Рис. 1. Изображение участка исследований

- провести опытные работы избыточным набором методов на хорошо изученном эталонном участке;
- выполнить интерпретацию полученного материала;
- провести анализ и выбрать наиболее эффективные методы и методики работ. Эффективность геофизических методов определяется в способности фиксировать контрастность физических свойств искоемых объектов и вмещающей среды и в возможности

поставленных перед геофизикой, и определение основных параметров исследуемых объектов и вмещающей среды являются основными целями комплексирования геофизических методов [5].

Для того чтобы подобрать рациональный комплекс геофизических методов, необходимо:

оценить геометрические размеры объектов поиска.

Опытные работы проводились на участке, где в теле солотвала присутствует видимая незаполненная полость (рис. 1). В качестве исходной информации использовались следующие материалы:

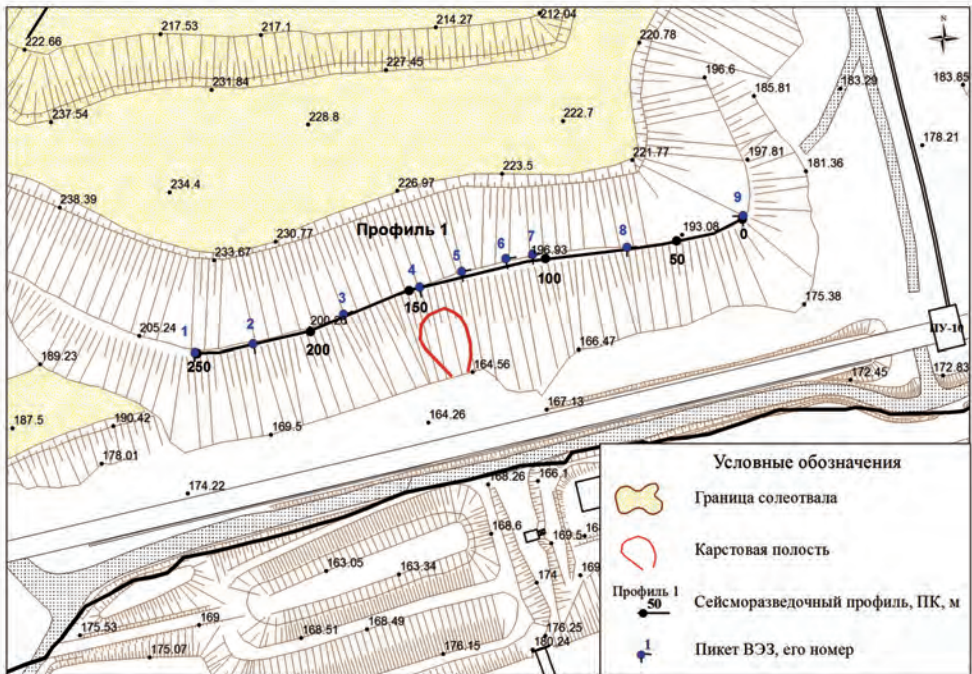


Рис. 2. План расположения профиля

- данные топографической съемки местности, на которой располагается солеотвал;

- результаты маркшейдерских измерений размеров карстовой полости;

- результаты электроразведочных исследований, проведенных в 2013 г.

Геофизические исследования проведены на уступе, расположенном над карстовой полостью (рис. 2).

Электроразведочные работы

Считается, что электроразведочные методы являются наиболее перспективными для изучения процессов карстообразования. Причины – высокая контрастность в электропроводности карстовых образований и вмещающих пород, простота методик наблюдений и экономическая эффективность производства работ [3, 4].

Электроразведочные работы выполнялись по методике вертикального электрического зондирования (ВЭЗ). В качестве основной применена трехэлектродная установка $AMNB \rightarrow \infty$, поскольку размещение линейной измерительной установки затруднено наличием неблагоприятных особенностей рельефа местности. При этом неподвижный электрод B_∞ относился в «бесконечность» на расстояние не менее $10h$, вкрест простирания профиля, где h – максимальная глубина исследования.

Также были выполнены исследования четырехэлектродной установкой $AMNB$, с аналогичными разносами AB и размерами MN , как при работах с трехэлектродной установкой.

Помимо ВЭЗ, выполнялись зондирования с помощью метода бесконтактного измерения электрического поля (БИЭП). Данные работы выполнены с использованием дипольного принципа измерений, при этом возбуждение электрического поля выполнялось контактным методом с помощью металлических электродов, а из-

мерение – с помощью незаземленной стелющейся линии. Измерения выполнялись на частоте 625 Гц. Максимальный разнос R (расстояние между центрами AB и MN) выбирался исходя из принципа $R \geq 3 \cdot h$, где h – максимальная глубина исследований [7].

Электроразведочные работы выполнялись с помощью приборов АМС-1, ERA MAX, обработка и интерпретация результатов осуществлялась с использованием системы программ «ЗОНД» [2].

Сейсморазведочные работы

Сейсморазведочные исследования проводились для определения эффективности их использования в качестве самостоятельных методов выявления признаков карстовых полостей, а также в качестве методов подтверждения и детализации аномалий, выделенных по результатам электроразведочных работ.

Основной объем сейсморазведочных работ выполнен методом отраженных волн по методике общей глубинной точки (МОВ МОГТ) с регистрацией продольных волн (p -волн). Измерения велись многоканальной установкой, с числом каналов от 48 до 64 (в зависимости от длины профиля), с шагом дискретизации, позволяющим регистрировать сигнал в диапазоне 10–1000 Гц (т.е. с шагом дискретизации 0,2–0,25 мс). Длина записи, исходя из мощности солеотвала на участке исследования, составила 200 мс, что гарантировало регистрацию волн, отраженных от подошвы солеотвала.

Для изучения всей толщи солеотвала длина расстановки и шаг между пунктами возбуждения (ПВ) и пунктами приема (ПП) выбиралась таким образом, чтобы максимальное удаление ПВ–ПП было сопоставимо с глубиной исследования [8]. Таким образом, была выбрана оптимальная установка для изучения солеотвала со следующими характеристиками: расстояние

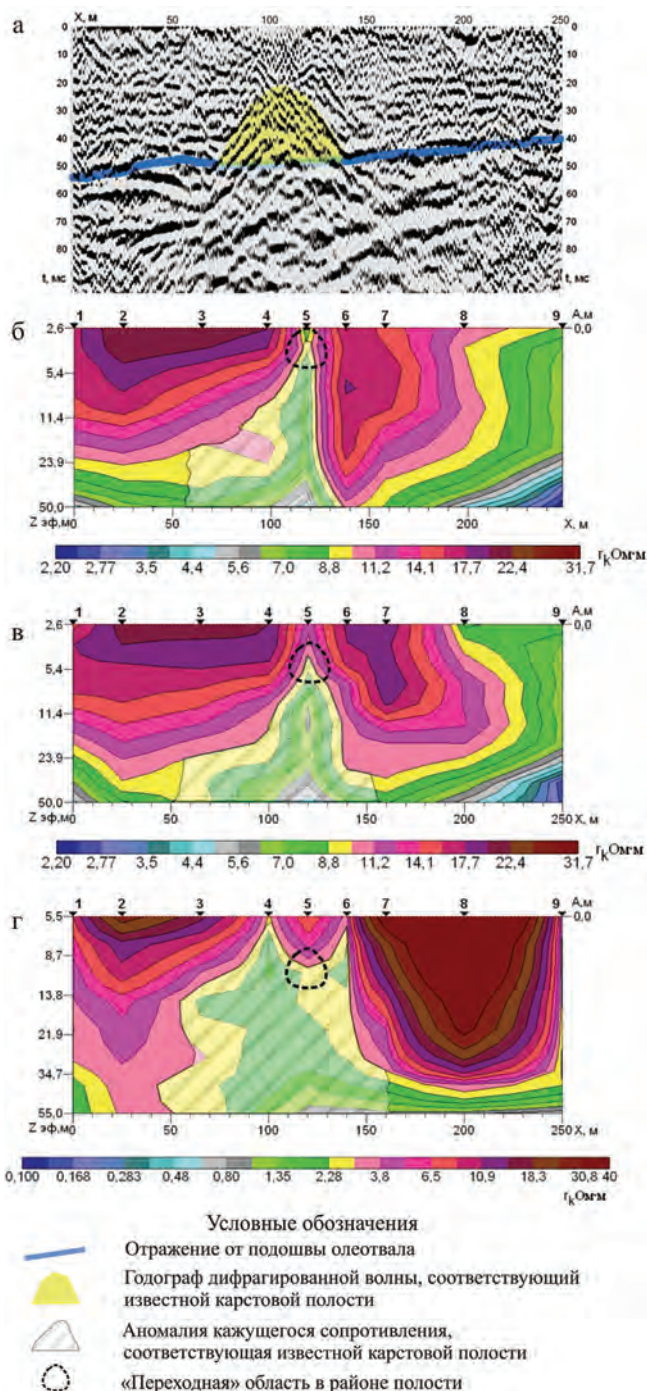


Рис. 3. Результаты опытных работ: временной разрез по методу МОВ МОГТ (а); разрезы кажущегося сопротивления по методу ВЭЗ с использованием установок АМNB, АМNB→∞, БИЭП соответственно (б, в, г)

между ПВ и ГП равное 2 м, число каналов 48–64. Для повышения отношения сигнал/помеха выполнялось накопление сигнала путем повторения ударов на одном ПВ. Число накоплений было определено опытным путем и равнялось 6.

Кроме МОВ МОГТ с регистрацией продольных волн также выполнены работы МОВ МОГТ с регистрацией поперечных (*s*-волн). Использовалась та же аппаратура и параметры регистрации, что и при регистрации *p*-волн.

Сейсморазведочные работы выполнялись еще одним методом – методом преломленных волн (МПВ) с регистрацией *p*-волн и *s*-волн. Основные параметры регистрации и возбуждения колебаний остались теми же, что и в случае МОВ МОГТ, за исключением более длинной установки – максимальное удаление должно превышать максимальную глубину исследований не менее, чем в 4 раза. Поэтому использовался шаг ПВ = шагу ГП = 2 м, число каналов было увеличено до 96.

Сейсморазведочные работы выполнены с применением двух сейсмостанций IS-128 (производство компании «Интромаг») и ТЕ/СС-3 (производство компании «Геосигнал»). Обработка и интерпретация результатов МОВ МОГТ проводилась с использованием системы программ «RadExPro». Обработка результатов МПВ выполнена в программе «Zond».

Определение рационального комплекса геофизических методов

Сравнительный анализ полученных методами электроразведки и сейсморазведки материалов, в частности представленных на рис. 3, показал, что в целом они хорошо согласуются между собой.

Электроразведочные исследования, проведенные ранее, показали, что карстовые полости отражаются на геоэлектрических разрезах областями резкого повышения электрического сопротивления [6].

В результате интерпретации и анализа полученного материала установлено, что ВЭЗ с использованием симметричной установки позволяет уверенно локализовать карстовую полость. Предполагалось, что карстовая полость, как и ранее, будет отмечаться на геоэлектрическом разрезе повышенным сопротивлением. Однако в связи с попыткой ее гидрозалива и, следовательно, увлажненным состоянием солеотвала над полостью, область проявления карста отмечается «переходной» областью от повышенных к резко пониженным значениями электрического сопротивления. Единственный недостаток симметричной установки – невозможность повсеместного использования из-за сложных поверхностных условий. В этом плане выигрывает трехэлектродная установка, к тому же она дает аналогичные результаты. Несколько другие результаты получаются при обработке материалов ВЭЗ БИЭП. Они указывают на схожесть с результатами классических работ ВЭЗ, и в целом повторяют их. Однако в деталях картины отличаются, а также есть отличие в абсолютных значениях получаемых сопротивлений. Таким образом, перспектива для использования БИЭП имеется, но необходимы дополнительные исследования для согласования результатов БИЭП с результатами контактного зондирования.

Вместе с тем установлено, что информационные возможности методов МОВ МОГТ и МПВ с регистрацией s -волн ограничены из-за крайне низкого качества записи. Метод МПВ с регистрацией p -волн обеспечивает высокое качество записи, однако признаки карстовых полостей отмечаются не на первых, а на последующих вступлениях. Для использования метода МПВ с регистрацией p -волн необходимы дополнительные научные исследования и доработка программного обеспечения. Наилучший результат из методов сейсмической разведки показал МОВ ОГТ с регистрацией p -волн. На сейсмограммах карстовая полость отмечается четким годографом дифрагированной волны, общее качество записи можно оценить как высокое.

Таким образом, по результатам опытных работ в качестве базовых для проведения работ по обнаружению карстовых полостей в отвалах калийной промышленности выбраны метод ВЭЗ с применением трехэлектродной установки $AMNB \rightarrow \infty$ и МОВ МОГТ с регистрацией p -волн.

Апробация выбранного комплекса геофизических исследований

Выбранный комплекс исследований прошел апробацию при выполнении геофизических работ для решения задачи поиска и оконтуривания карстовых полостей в теле солеотвалов рудников ПАО «Уралкалий».

На одном из солеотвалов геофизические работы проводились по двум профилям (рис. 4), расположенным параллельно друг другу:

- сейсморазведочный профиль 1 и соответствующие ему 25 точек ВЭЗ;
- сейсморазведочный профиль 2 и соответствующие ему 14 точек ВЭЗ.

Вертикальное электрическое зондирование

На этапе качественной интерпретации изучался главным образом общий

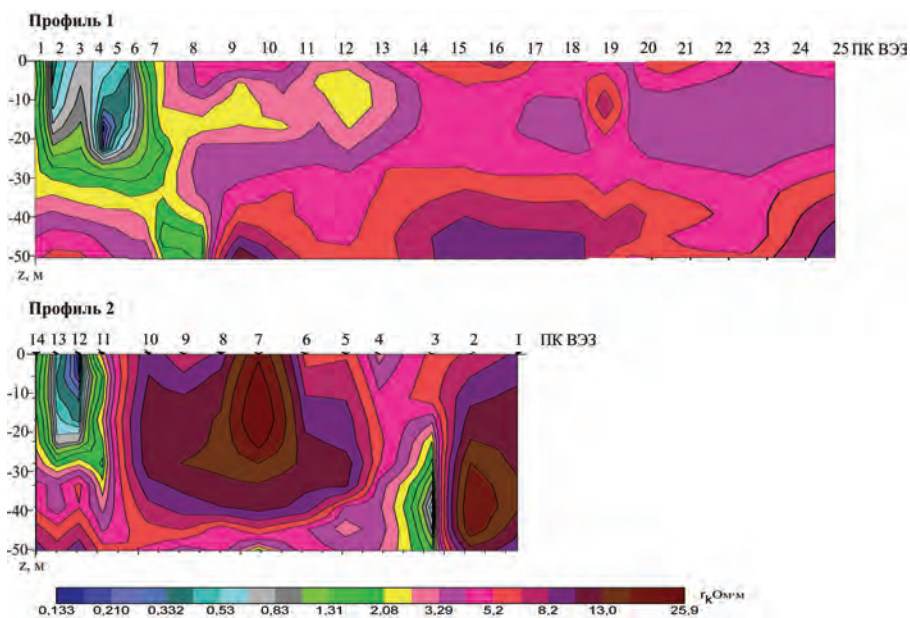


Рис. 5. Разрезы кажущегося сопротивления

характер пространственного изменения электрических свойств изучаемой среды. Для этой цели были получены вертикальные срезы поля кажущихся

сопротивлений (рис. 5). Полученные материалы позволили определить общие закономерности изменения электрических свойств среды, а также

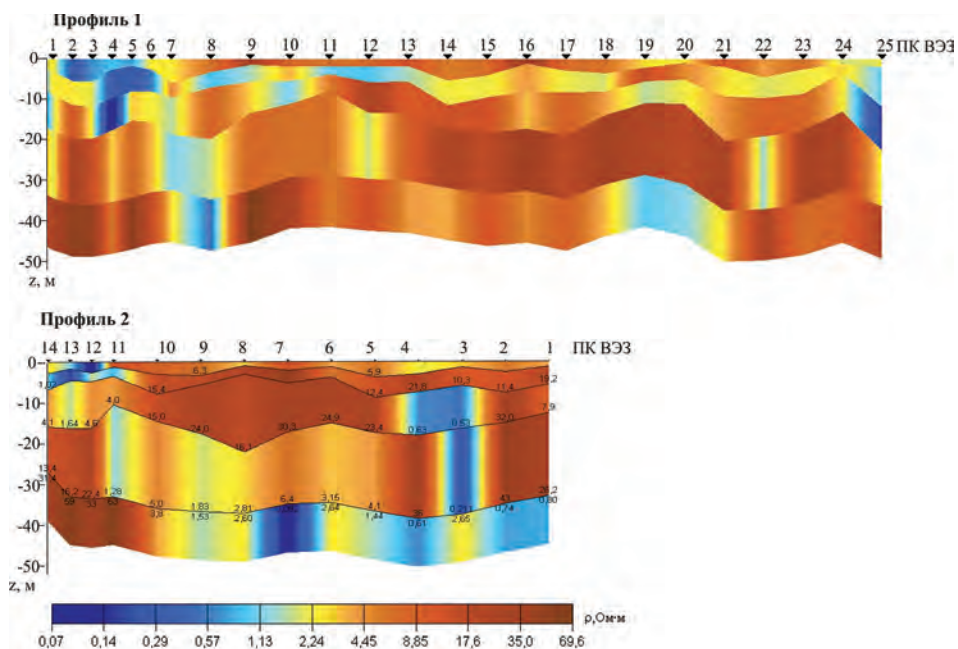


Рис. 6. Геоэлектрические разрезы

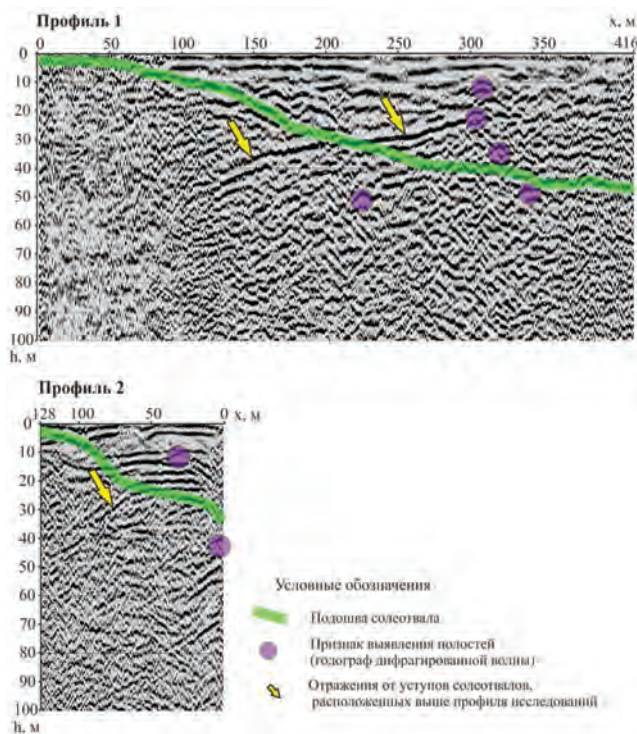


Рис. 7. Глубинные сейсмические разрезы

выделить ряд аномальных областей пониженных и повышенных значений кажущегося сопротивления.

На этапе количественной интерпретации (рис. 6) проведено послойное расчленение геоэлектрического разреза, определены мощности и удельные электрические сопротивления геологического разреза исследуемой территории.

Анализ полученных материалов выявил ряд особенностей пространственного изменения электрических свойств среды. Установлено, что исследуемая область характеризуется низкими значениями кажущегося сопротивления, что объясняется высокой минерализацией. Условно изучаемая толща поделена на пять геоэлектрических слоев, отличающихся по своим УЭС. По данным как качественного, так и количественного анализа уверенно выделяются относительно низкоомные

и относительно высокоомные области. Области с относительно пониженными значениями сопротивления отмечаются на пикетах 2–6 профиля 1 и на пикетах 11–14 профиля 2 и прослеживаются до глубины приблизительно 18 м, а также на пикетах 3–4 профиля 2 с глубины около 6 м. Предположительно, породы солевотвала в интервале указанных пикетов увлажнены сильнее, чем на других участках, что приводит к снижению электрического сопротивления. Область с относительно повышенными значениями сопротивления наблюдается на остальных пикетах ВЭС и обусловлена, вероятнее всего, наличием более плотных, сухих и менее минерализованных пород.

Сейсморазведочные работы

Основным результатом цифровой обработки сейсморазведочных данных являются временные и глубинные сейсмические разрезы. Временной разрез позволяет представить структуру геологического разреза во временном масштабе, глубинный – в масштабе по глубине. По результатам оценки скоростей выбрана средняя скорость ОГТ, которая использовалась для пересчета временных разрезов в глубинные. Известно, что диффрагированные волны несут важную информацию о структурных особенностях изучаемой среды, таких как наличие сбросов, зон трещиноватости, а также карста [1]. Потому определение глубины залегания искомых аномалий осуществлялось по годографам диффрагированных волн (рис. 7).

Качественная интерпретация заключалась в сопоставлении априорной

модели среды и полученных геофизических разрезов, в прослеживании основной отражающей границы – подошвы солеотвала. Априорная модель была составлена по результатам топографической съемки различных лет и представляет собой границу подошвы солеотвала. Согласно данным этой съемки мощность солеотвала в районе расположения профиля 1 составила 3,9 м в начале профиля и 46,0 м в конце. Глубина залегания подошвы солеотвала на профиле 2 изменялась от 33,0 до 3,5 м.

Анализ полученных материалов позволил выделить области с признаками наличия полостей на обоих профилях: пять областей на профиле 1 на глубине от 10 до 50 м и две области на профиле 2 на глубине 11 и 41 м.

Необходимо отметить, что наряду с отражением от подошвы солеотвала на глубинном сейсмическом разрезе наблюдалась еще одна сильная отражающая граница. Природа возникновения этой отражающей границы связана с распространением волн в верхнее полупространство и их отражением от уступов солеотвала.

Комплексный анализ геофизических методов

Надежность решения задачи обнаружения карстовых полостей в отвалах калийной промышленности достигались путем комплексного анализа полученных материалов. В результате были получены комплексные

разрезы, объединяющие в себе результаты обработки и интерпретации электроразведочных и сейсморазведочных данных (рис. 8). Выделенные аномалии оценивались как надежные в случае подтверждения их обоими методами.

Многолетняя практика изыскательских работ на участках с активным развитием карста показывает, что наиболее интенсивно карст будет развиваться на контакте еще неизмененных карстующихся пород, и пород, переработанных карстом. По данным электротометрии, таким участкам будут соответствовать области перехода относительно низких сопротивлений в относительно высокие, или наоборот. Иными словами, наличие карстовых полостей будет отмечаться максималь-

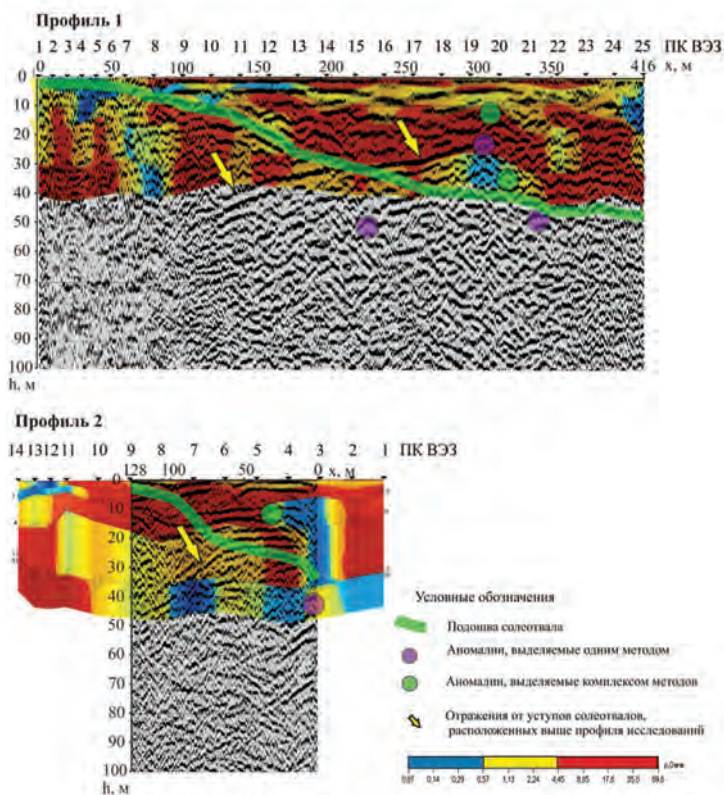


Рис. 8. Комплексные геофизические разрезы по профилям 1, 2 на солеотвале ПАО «Уралкалий»

ным градиентом электрических сопротивлений.

Для наглядности представления электроразведочных данных и удобства их сопоставления с результатами сейсморазведки геоэлектрический разрез был поделен на зоны, соответствующие относительно низким (голубой цвет), средним (желтый цвет) и высоким (красный цвет) значениям удельного электрического сопротивления.

В результате комплексирования данных по двум методам были выделены наиболее надежные области проявления процессов карстообразования. Корреляция «переходных» зон, выделенных по результатам электроразведочных исследований, и годографов дифрагированной волны на глубинных сейсмических разрезах являлась основным критерием выделения аномальных областей.

Заключение

Легкая растворимость отходов калийной промышленности способствует развитию карстовых полостей в соленотвалах. Поэтому в целях обеспечения безопасности эксплуатации соленотвалов, своевременному выявлению про-

цессов карстообразования необходимо уделять особое внимание.

С помощью опытных работ, проведенных над карстовой полостью в теле солетвала с известным положением и размерами, был определен рациональный геофизический комплекс методов, позволяющих наиболее надежно решать поставленную задачу в условиях соленотвалов.

Выбранный комплекс исследований прошел апробацию при выполнении геофизических работ для решения задачи поиска и оконтуривания карстовых полостей в теле соленотвалов рудников ПАО «Уралкалий». В результате комплексирования данных по двум методам были выделены наиболее надежные области проявления процессов карстообразования. Геофизический комплекс методов, состоящий из метода вертикального электрического зондирования с применением трехэлектродной установки $AMNB \rightarrow \infty$ и метода отраженных волн по методике общей глубинной точки с регистрацией p -волн, показал высокую информативность, и позволяет уверенно локализовать карстовые полости в отвалах калийной промышленности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бондарев В.И. Основы сейсморазведки: учеб. для вузов. – Екатеринбург: УГТА, 2003. – 332 с.

2. Колесников В.П. Основы интерпретации электрических зондирований. – М.: Научный мир, 2007. – 248 с.

3. Колесников В.П., Татаркин А.В., Димухаметов М.Ш. Применение компьютерной технологии интерпретации электроразведочных данных при изучении закарстованных территорий // Вестник Пермского университета. – 2008. – Вып. 10 (26). – С. 136–143.

4. Малахов В.Е., Костарев В.П. Инженерно-геофизическое исследование пещер Пермского и Башкирского Приуралья / Пещеры. Типы и методы исследования: межвузовский сборник научных трудов. – Пермь: Пермский университет, 1984. – С. 93–96.

5. Никитин А.А., Хмелевской В.К. Комплексирование геофизических методов:

учебник для вузов. – Тверь: ООО «ГЕРС», 2004. – 294 с.

6. Шумахер А.И., Бруев Н.И., Белкин В.В., Платыгин В.И., Миронов С.А. Патент 2307250 Российской Федерация, МПК E 21 C 41/00. Способ ликвидации карстовых деформаций на соленотвалах; заявитель и патентообладатель ОАО «Уралкалий». – № 2006100178/03; заявл. 10.01.06; опублик. 27.09.07, Бюл. № 27. – 5 с.

7. РСН 64–87. Инженерные изыскания для строительства. Технические требования к производству геофизических работ. Электроразведка. – М.: Госстрой РСФСР, 1987.

8. РСН 66–87. Инженерные изыскания для строительства. Технические требования к производству геофизических работ. Сейсморазведка. – М.: Госстрой РСФСР, 1987. **ИДБ**

Жуков Александр Анатольевич – аспирант, заведующий научно-исследовательской лабораторией геофизики ОАО «Галургия», e-mail: zhukov.aleksandr@gallurgy.ru,
Пригара Андрей Михайлович – кандидат технических наук, доцент, директор ООО «ППИ-Геофизика», e-mail: ppi.geof@gmail.com,
Пушкарева Ирина Юрьевна – аспирант, ведущий инженер научно-исследовательской лабораторией геофизики ОАО «Галургия», e-mail: pushkareva.irina@gallurgy.ru
Царев Роман Ильич – аспирант, инженер-геофизик 3 категории ООО «ППИ-Геофизика», e-mail: ppi.geof@gmail.com,
Пермский государственный национальный исследовательский университет (ПГНИУ).

UDC 550.8

EXPERIENCE OF APPLYING THE COMPLEX OF GEOPHYSICAL METHODS TO DETECT KARST CAVITIES IN THE DUMPS OF POTASH MINES

Zhukov A.A.¹, Graduate Student, Chief of Research Geophysical Laboratory of «Galurgia» OJSC, Perm, Russia, e-mail: zhukov.aleksandr@gallurgy.ru,
Prigara A.M.¹, Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor, Director of «PPI-Geofisika» LLC, Perm, Russia, e-mail: ppi.geof@gmail.com,
Pushkareva I.Yu.¹, Graduate Student, Leading Engineer of Research Geophysical Laboratory of «Galurgia» OJSC, Perm, Russia, e-mail: pushkareva.irina@gallurgy.ru,
Tsarev R.I.¹, Graduate Student, Category 3 Geophysical Engineer of «PPI-Geofisika» LLC, Perm, Russia, e-mail: ppi.geof@gmail.com,
¹ Perm State National Research University, Perm, Russia.

The article describes the experience of applying the complex of geophysical methods to identify karst processes in the dumps of potash industry. For these purposes a rational complex has been experimentally determined comprising a vertical electric sounding method using a three electrode array and a reflection method by the procedure of common depth point with registration of p-waves. The selected complex has been tested by performance of geophysical works to solve exploration tasks and delineation of karst cavities in the body of salt tailings piles of the mines PJSC «Uralkali».

Key words: salt tailings pile, karst, electrical sounding, seismic, electric resistance, diffraction travel time curve, rational complex of geophysical methods, interpretation.

REFERENCES

1. Bondarev V.I. *Osnovy sejsmorazvedki: uchebnik dlja vuzov* (Seismic fundamentals: Textbook for high schools), Ekaterinburg, UGGA, 2003, 332 p.
2. Kolesnikov V.P. *Osnovy interpretacii jelektricheskikh zondirovanij* (Fundamentals for interpretation of electric sounding), Moscow, Nauchnyj mir, 2007, 248 p.
3. Kolesnikov V.P., Tatarkin A.V., Dimuhametov M.Sh. *Vestnik Permskogo universiteta*. 2008, issue 10 (26), pp. 136–143.
4. Malahov V.E., Kostarev V.P. *Peshhery. Tipy i metody issledovanija: mezhvuzovskij sbornik nauchnyh trudov* (The caves. Types and methods of research. Interuniversity collection of scientific papers), Perm, Permskij universitet, 1984, pp. 93–96.
5. Nikitin A.A., Hmelevskoj V.K. *Kompleksirovanie geofizicheskikh metodov: uchebnik dlja vuzov* (Integration of geophysical methods: Textbook for high schools), Tver, ООО «GERS», 2004, 294 p.
6. Shumahr A.I., Bruev N.I., Belkin V.V., Platygin V.I., Mironov S.A. *Patent RU 2307250*, МПК E 21 C 41/00, 27.09.07.
7. *Inzhenernye izyskanija dlja stroitel'stva. Tehnicheskie trebovanija k proizvodstvu geofizicheskikh rabot. Jelektrozrazvedka. RSN 64–87* (Engineering surveys for construction. Technical requirements for performance of geophysical works. Electric survey. Republican construction norms 64–87), Moscow, Gosstroj RSFSR, 1987.
8. *Inzhenernye izyskanija dlja stroitel'stva. Tehnicheskie trebovanija k proizvodstvu geofizicheskikh rabot. Sejsmorazvedka. RSN 66–87* (Engineering surveys for construction. Technical requirements for performance of geophysical works. Seismic survey. Republican construction norms 66–87), Moscow, Gosstroj RSFSR, 1987.