

РАЗДЕЛ 7. ГЕОФИЗИКА И СЕЙСМОЛОГИЯ

УДК 551.44+550.3

ОПЫТ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ КАРСТА В КРЫМУ

Амеличев Г. Н.¹, Самохин Г. В.², Токарев С. В.³, Сухорученко С. К.⁴,

Навроцкий А.Б.⁵, Жук И. С.⁶

*^{1,2,3,5,6}ФГАОУ ВО «Крымский федеральный университет имени В. И. Вернадского»,
Симферополь, Российская Федерация*

⁴ООО «ИНСТИТУТ «КРЫМГИИНТИЗ», Симферополь, Российская Федерация

E-mail: lks0324@yandex.ru

Приведен исторический обзор геофизических исследований, проводившихся с целью изучения различных аспектов карста в пределах Крымского полуострова. Установлено, что современные методы геофизической диагностики недр являются высокоэффективным способом обнаружения карстовых аномалий, существенно влияют на характер и способы борьбы с карстоопасностью, бюджет, тактику и стратегию инженерно-строительных работ на закарстованных территориях.

Ключевые слова: геофизические исследования, карст, электротомография, георадар, аномалия, пещерный заполнитель, Крым.

ВВЕДЕНИЕ

Геофизические исследования в областях развития карста являются важным этапом инженерно-геологического изучения геологической среды на разных стадиях хозяйственного освоения территории. Геофизические методы выступают мощным и эффективным инструментом, дающим ценнейшую информацию не только о современных геологических и гидрогеологических условиях приповерхностной части разреза растворимых пород, но и позволяющим осуществлять ретроспективные карстологические реконструкции, строить прогнозные модели поведения карста и сооружений на закарстованных территориях. Совместное использование карстологоспелеологических и геофизических методов обеспечивает сравнительно высокую достоверность и верифицируемость получаемых выводов, базирующихся, с одной стороны, на непосредственном наблюдении за объектом исследований (например, пещерами), а с другой - опирающихся на детальный анализ реакции тех или иных естественных или искусственных физических полей на особенности геологической среды, заключающей карстопроявления.

Своеобразный симбиоз карстологических и геофизических методов зародился в середине прошлого века, когда в карстовых районах начали тестировать модели геофизического оборудования для выявления пустотных аномалий, участков залегания и путей движения подземных вод, а также других карстовых признаков анизотропии растворимых горных пород. Способы «просвечивания» недр карстовых массивов совершенствовались и к настоящему времени появились совершенно новые приборы и методы, обладающие высокой разрешающей способностью,

мобильностью и автономностью, выявляющие тонкую внутреннюю структуру геологических тел. В связи с этим, целью работы является изучение истории использования геофизических методов при исследовании закарстованных территорий Крыма.

ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА

Геофизические исследования в Крыму начали активно проводиться с конца 50-х гг. XX в., после создания Комплексной карстовой экспедиции (ККЭ) АН УССР и геофизического отряда под руководством Б. М. Смольникова [1]. В комплекс геофизических исследований карста входили разнообразные варианты электроразведки (электропрофилирование, вертикальное электроразведывание, боковое каротажное зондирование), а позднее и другие новые и модифицированные старые методы [2–4]. За 1958–1964 гг. геофизическими исследованиями были охвачены 2 гидрогеологические области Горного Крыма — область питания карстовых вод на яйлинских массивах и область разгрузки подземного стока на склонах и у подножия Главной гряды (рис. 1, а).

На участке у пещеры Крубера (Караби-яйла) с помощью методов электропрофилирования и ВЭЗ были прослежены не пройденные продолжения ее южной галереи (рис. 1, б). Они маркируются относительно высокими значениями удельных электрических сопротивлений (УЭС), лежащими в интервалах 11000–14000 ом·м, что говорит о больших размерах этой полой части и ее приближении к поверхности.

На участке расположения трех шахт Эгиз-Тинах-1-3 (Караби-яйла) использовались те же методы. Анализ изолиний УЭС показал разветвленную сеть северо-западных продолжений системы, заложенных вдоль балки (рис. 1, в).

На Айпетринской площади в ходе электропрофилирования, выполненного А. А. Огильви в 1957 г. в Приайпетринской котловине, была выявлена зона пониженных сопротивлений. По результатам этих исследований в следующем году В. Н. Дублянский открыл и заснял крупную вертикальную полость, получившую название шахта Геофизическая.

На соседнем участке над пещерой Мисхорская была заложена серия параллельных обрыву Главной гряды электропрофилей. После обработки материалов съемки была построена карта градиентов кажущихся УЭС, которая показала полосу минимумов, продолжающихся к северо-западу от известной части пещеры (рис. 1, д). Таким образом, пещеры Геофизическая и Мисхорская, благодаря сильной заглиненности (нерастворимый остаток представлен $Al_2O_3 + Fe_2O_3$), проявляют себя в геоэлектрическом разрезе как проводящие включения.

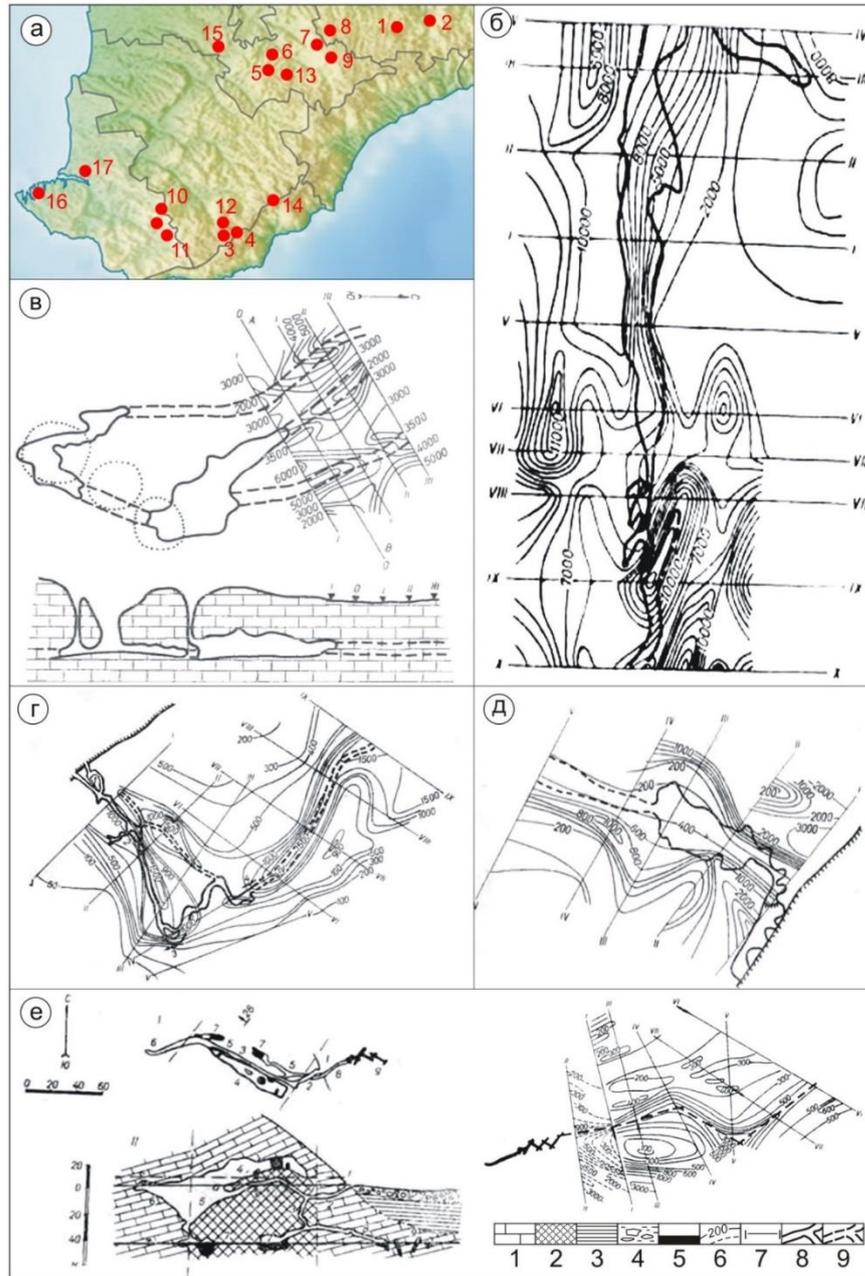


Рис. 1. Участки карстолого-геофизических работ ККЭ [4], Украинского института спелеологии и карстологии (ныне ИСК), предприятий Крымспецгеология и КрымГИИНТИЗ в Горном Крыму и их основные результаты:

а — карта карстолого-геофизических работ и объекты исследования (красные кружки): 1 — пещера Крубера (панель **б**), 2 — пещеры Эгиз-Тинах-1-3 (панель **в**), 3 — пещера Геофизическая, 4 — пещера Мисхорская (панель **д**), 5 — Северо-

Чатырдагская площадь, 6 — пещера Аянская, 7 — Краснопещерный участок, 8 — Долгоруковский участок, 9 — пещера Ени-Сала-3 (панель г), 10 — участок Ай-Даниль, 11 — пещера Скельская (панель е), 12 — участок Беденекыр, 13 — участок Курт-Аир, 14 — Ялтинский гидротоннель, 15 — пещера Змеиная, 16 — Севастопольский участок, 17 — Инкерманский участок; обозначения к панелям б–е: 1 — известняки, 2 — глыбы, 3 — глины, 4 — суглинисто-глыбовый покров, 5 — обводненные участки, 6 — изолинии УЭС и их значения, 7 — электропрофили, 8 — известные галереи, 9 — предполагаемые продолжения по данным геофизики.

В пределах Салгирской площади методы электроразведки применялись на Ени-Салинском участке, где располагается относительно крупная обводненная пещера-источник Ени-Сала-3 (рис. 1, г). В результате полученной карты электросопротивлений выделено несколько аномальных зон, две из которых вытянуты в юго-восточном направлении и соответствуют Главной галерее и недоступному параллельному ходу с водой. Восточное продолжение Озерного хода также маркируется высокоомной аномалией [4]. Впоследствии все выявленные геофизическими методами продолжения были успешно подтверждены прямыми спелеологическими прохождениями с применением акваланга.

На Байдарской площади геофизическими методами изучались 2 участка — Ай-Дмитровский и Скельский. Несмотря на существенные структурно-геологические сложности Ай-Дмитровского участка с помощью электропрофилирования удалось выявить и закартировать ареалы естественных потенциалов электрического тока. Было установлено, что отрицательные электрические аномалии соответствуют зонам активного поглощения инфильтрационных вод, которые находятся к юго-западу от источника Ай-Дмитрий. Положительные аномалии, расположенные с северо-запада и востока, относятся к менее водообильным горным породам. Карстологические и геофизические работы на Ай-Дмитровском участке позволили установить особенности глубинной закарстованности и обводненности района.

Геофизические работы, поставленные на Скельском участке, позволили прояснить конфигурацию транзитной части карстово-водоносной системы за пределами известной части Скельской пещеры (рис. 1, е). Согласно изолиниям УЭС она подходит к пещере с востока в районе Дальних озер, которые находятся под Скельской котловиной. Длина выявленной части составила около 400 м.

В начале 60-х гг. XX в. при строительстве Ялтинского гидротоннеля через одноименный массив геофизическими методами проводилось изучение характера и мощности цокольного водоупора, толщи верхнеюрских известняков, выявление тектонических разрывов, зон трещиноватости и обводненности на участке трассы (рис. 2). Впервые был выполнен большой объем инструментальных исследований, базирующихся на электроразведочных методах и дающих общее представление о глубинном строении, литолого-стратиграфическом расчленении и закарстованности Ялтинского горного массива [5]. Было подтверждено блоковое строение толщи, параметры разрывов, зон обводненности и закарстованности. В связи с реконструкцией старой ветки и строительством дублирующего гидротоннеля в 2020 г. геофизические работы были продолжены на новом методическом уровне.

В 2011 г. сотрудниками Украинского института спелеологии и карстологии (УИСК) на Чатырдагском и Айпетринском массивах был выполнен комплекс геофизических работ, включавших использование радиоволнового (георадарного) метода для изучения эпикарстовой зоны [6]. Принцип действия георадара основан на излучении сверхширокополосных электромагнитных импульсов в подстилающую среду и регистрации их отражения от границ раздела слоев и объектов, имеющих различные электрофизические свойства. Использовался прибор GSSI SIR-3000 с низкочастотной антенной (100 МГц), позволяющей «просвечивать» массив с поверхности на глубину до 30 м. На профилях, проходящих через карстовые воронки, прослеживаются отличия электрофизических свойств участков под днищами воронок от склоновых и водораздельных участков (рис. 3), что объясняется наличием под воронками зоны повышенной водопроницаемости, дренирующей эпикарст.

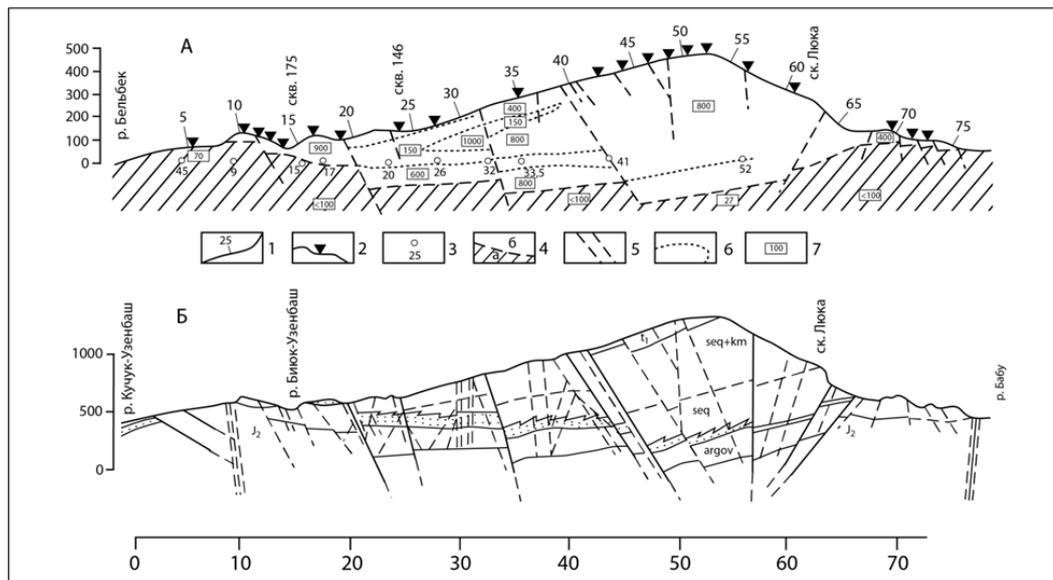


Рис. 2. Геолого-геофизический (А) и геолого-структурный (Б) разрезы Ялтинского горно-карстового массива вдоль линии тоннеля [5]:

1 — пикет привязки наземных геофизических работ, 2 — точки электрических зондирований на поверхности, 3 — некоторые точки подземных зондирований, 4 — поверхность цокольного водоупора (а — нижний, б — верхний структурный этаж), 5 — тектонические разрывы, 6 — основные границы геоэлектрических горизонтов, 7 — усредненные значения удельных электрических сопротивлений пород в Ом·м.

При строительстве жилых домов в восточной части Симферополя (просп. Победы, ул. Кечкеметская, Суходольная и др.) в ходе инженерно-геофизических исследований (электроразведка ВЭЗ) использовались данные разрезов изолиний средних и пластовых продольных сопротивлений и графики зависимостей суммарной продольной проводимости, средних и пластовых продольных сопротивлений от глубины. Такой подход позволяет уверенно выделять на электроразведочных

моделях не только карстовые аномалии (полые, обводненные и заглиненные каналы), но и геоэлектрические границы отдельных литологических и инженерно-геологических типов горных пород до глубины 25–30 м.

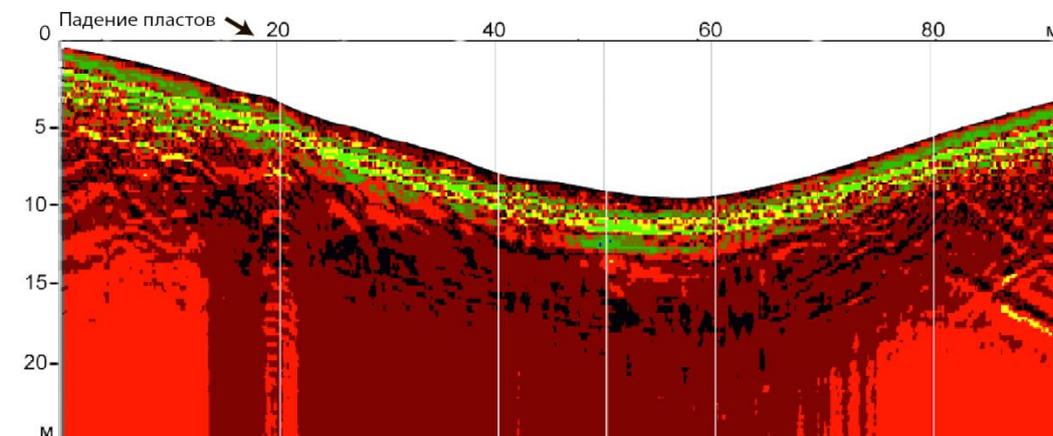


Рис. 3. Георадарный профиль через типичную карстовую воронку на плато массива Чатырдаг [6].

В феврале 2018 г. сотрудниками ИСК КФУ им. В. И. Вернадского и специалистами Крымспецгеология были проведены тестовые испытания нового геофизического прибора — сканирующего электротомографа Скала-64 К15. Работы выполнялись для установления электрофизических характеристик карстовых полостей на участке с заведомо известным их расположением и возможного прослеживания их неизвестных продолжений. В ходе проведенного эксперимента с применением метода сопротивлений в варианте 2D электротомографии были получены выразительные поперечные сечения двух известных пещер Змеиная и Комариная на Внутренней гряде, а также несколько аналогичных аномалий, соответствующих их не пройденным продолжениям или отдельным новым полостям (рис. 4).

С 2018 г. Скала-64 стала широко использоваться при инженерно-геофизических изысканиях на строящихся хозяйственных объектах Республики Крым и г. Севастополя. В качестве примера можно привести строительство бассейна на территории школы в бухте Казачья (Севастополь). С помощью электротомографии на предпроектной стадии были выявлены геофизические аномалии, соответствующие зонам низких сопротивлений (рис. 5, нижнее сечение, синезеленые цвета). В ходе дальнейших инженерно-геологических работ на месте одной аномалии был выявлен древний, вероятно античный, ныне занесенный котлован небольшого карьера. Другая, более удаленная от объекта строительства аномалия не вскрывалась, но предположительно может быть связана с зоной трещиноватости, заполненной глиной и вероятно обводненной за счет близко расположенного уровня Черного моря.



Рис. 4. Результаты электротомографии участка Внутренней гряды над пещерами Змеиная и Комариная.

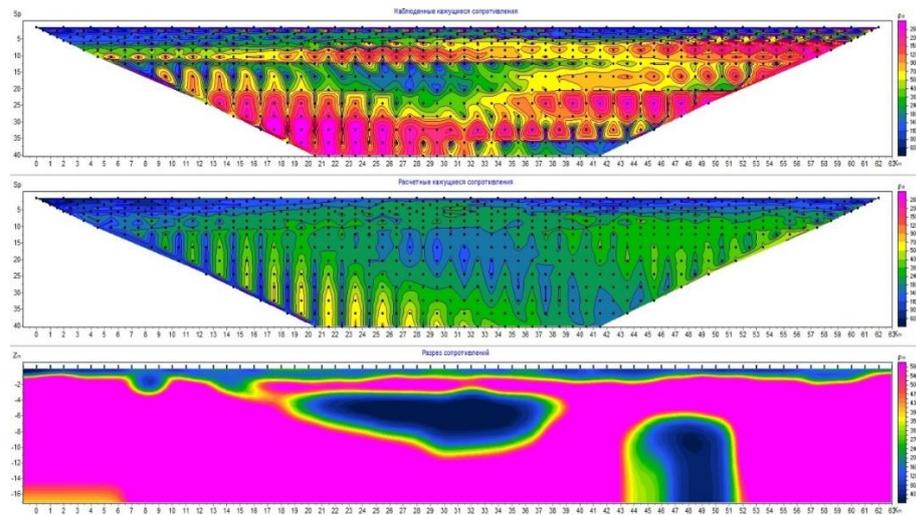


Рис. 5. Совмещенные геоэлектрические разрезы кажущихся (верхние сечения) и удельного (нижнее сечение) сопротивлений в Казачьей бухте Севастополя.

Высокая эффективность электротомографии была также доказана в ходе геофизических изысканий на горе Маячная в Инкермане, где планировалась

реконструкция помещений подземных складов и строительство административных и жилых зданий. Было построено 40 геоэлектрических разрезов, большая часть из которых зафиксировала аномалии УЭС, схожие с параметрами карстовых полостей (рис. 6). Однако плановая и профильная геометрия аномалий с прямоугольными контурами указывает на антропогенный характер неоднородностей. Практически все подземные помещения существующих складов были подтверждены геофизическими работами. Более того, были выявлены старые довоенные штольни, замурованные и не нанесенные на существующие планы. Также получили геофизическое подтверждение отдельные прослои, линзы и включения горных пород, выявленные с помощью бурения.

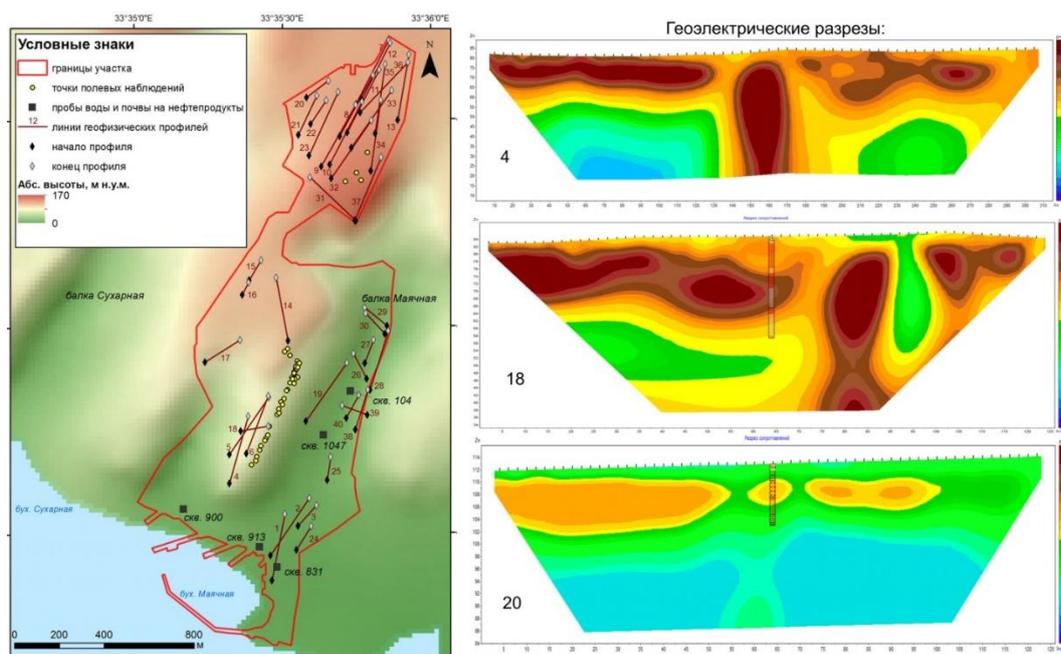


Рис. 6. Положение геоэлектрических разрезов в Инкермане и примеры аномалий на некоторых из них (коричневые тона разрезов, характерны для подземных пустот и закопанных с поверхности резервуаров).

Таким образом, электротомографические исследования на закарстованных территориях в Крыму показали свою высокую информативность и эффективность. Поэтому они были использованы в качестве основного метода при исследовании открытой в 2018 г. пещеры Таврида и блока горных пород, в которых она заложена. Особенностью карстового массива, вмещающего пещеру «Таврида», является плотная кавернозность верхней части разреза. При этом часть полостей представляет собой пустоты, другая часть заполнена глиной. Это по-разному отражается на параметрах сигнала и усложняет конфигурацию изолиний УЭС.

В ходе экспедиционных работ над пещерой Таврида были выполнены полевая геофизическая съемка с помощью электроразведочной станции Скала-64 К15, обработка данных, инверсия и интерпретация [7]. Исследования показали, что на серии параллельных геофизических профилей, проложенных на расстоянии 25 м друг от друга с шагом электроразведочной линии 5 м по схеме Шлюмберже, уверенно выделяются все крупные галереи пещеры Таврида. Ряд также выявленных высокоомных аномалий, лежащих за пределами известной части пещеры, следует рассматривать как перспективные участки поиска новых продолжений полости. Анализ этих участков следует детализировать при помощи электроразведочных линий с шагом 2 м, которые позволяют выявлять пустоты небольших (1–3 м по вертикали) размеров.

В ноябре 2019 г. комплекс электротомографических исследований карста был выполнен на массиве Чатырдаг (Горный Крым) над пещерой Мраморная. Целью изысканий явилось усовершенствование идентификационных критериев выявления карстовых полостей и поиск новых пустот в окрестностях пещеры. Была заложена серия электроразведочных профилей (тип установки SCH, результаты инверсии Smoothness constrained), на которых высокоомными (более 3500 Ом·м) аномалиями полностью подтверждены все известные залы и галереи пещеры Мраморной. Более того, на нескольких геоэлектрических разрезах в 80–90 м к западу от окончания Тигрового хода в интервале глубин 8–50 м от поверхности выявлена неизвестная крупная карстовая полость (рис. 7).

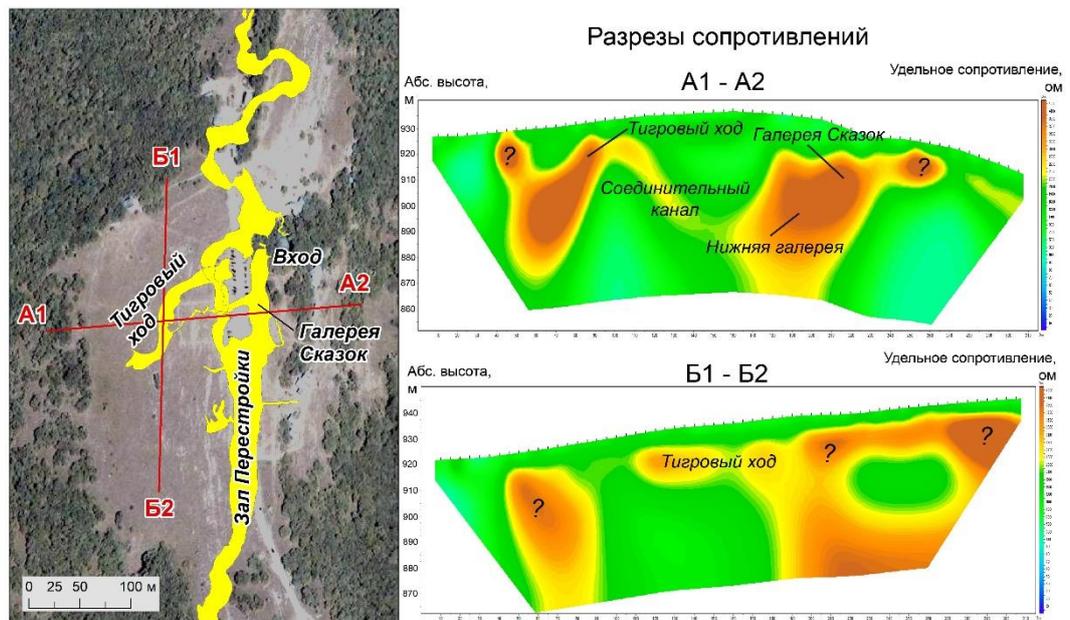


Рис. 7. Геоэлектрические разрезы с идентификацией известной и неизвестной частей пещеры Мраморная.

Судя по конфигурации и значениям изоом, между неизвестной полостью и Тигровым ходом имеется соединительный канал, частично заполненный натеками и глиной. Вскрытие неизвестной полости, подходящей близко к поверхности, дало бы полезную дополнительную информацию по вопросу генезиса и возраста пещеры Мраморной, а расчистка соединительного канала способствовала бы сквозному проходу спелеотуристического маршрута, идущего через Тигровый ход.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Обзор геофизической изученности карста крымского региона свидетельствует об очень важной и заметно растущей роли геофизических методов, используемых при исследовании и хозяйственном освоении закарстованных территорий. Карстовая область Горного Крыма явилась местом, где проходили испытания и тестирование первые образцы геофизического оборудования, формировалась база данных о геофизических свойствах литолого-стратиграфических комплексов карбонатного разреза Главной гряды, отрабатывались методики интерпретации геоэлектрических сигналов и выявления карстовых аномалий. Отдельные крупные карстовые аварии (утечки на Новоульяновском и Межгорном водохранилищах, провалы на дорогах и осадки зданий в Симферополе и Севастополе) послужили поводом для введения положения о проведении обязательных предваряющих строительство геофизических работ, направленных на выявление опасных карстопроявлений. Проведенные в последние годы исследования геоэлектрических свойств растворимых пород и содержащихся в них пустот существенно улучшают качество инженерно-карстологических изысканий, способствуют созданию более обоснованных и адекватных моделей развития карста, его прогноза и разработке мер противокарстовой защиты территорий.

Список литературы

1. Дублянский В. Н. Комплексная карстовая экспедиция // Спелеология и карстология. №1. 2008. С.20–22.
2. Головцын В. Н., Иванов Б. Н., Смольников Б. М. Некоторые карстолого-геофизические исследования зон поглощения стока в карстующихся породах Горного Крыма // Геологическая интерпретация и методика геофизических исследований. Геофизический сборник. 1964. Вып.9. Т.7. С. 142–146.
3. Иванов Б. Н., Прогущенко П. В., Шутов Ю. И. Первые карстолого-геофизические исследования в Предгорно-Крымской области // Геофизика и астрономия. Информ. бюлл. 1966. Вып.9. С.54–60.
4. Головцын В. Н., Смольников Б. М., Дублянский В. Н., Иванов Б. Н. Применение геоэлектрических исследований к решению основных проблем карста Горного Крыма. Киев: Наукова думка, 1966. 149 с.
5. Хмелевской В. К., Васильев И. Н., Задорожная Л. П. Тектоническая структура Ялтинского горного массива // Комплексные изыскания при строительстве гидротоннеля в карстовой области Горного Крыма. Симферополь, 1971. С.17–57.
6. Климчук А. Б., Токарев С. В., Амеличев Г. Н., Науменко В. Г., Пустовойт В. А. Изучение эпикарстовой зоны известняковых массивов Горного Крыма методом георадарного профилирования // Географические и геоэкологические исследования в Украине и сопредельных территориях. Симферополь, 2012. С.139–141.

7. Фәге А. Н., Санчаа А. М., Самохин Г. В. Исследование пещеры Таврида методом электротомографии // III Карстологические чтения. Симферополь, 2021. С. 87–95.

EXPERIENCE OF GEOPHYSICAL STUDIES OF KARST IN THE CRIMEA

Amelichev G. N.¹, Samokhin G. V.², Tokarev S. V.³, Suhoruchenko S. K.⁴,

Navrockij A. B.⁵, Zhuk I. S.⁶

*^{1,2,3,5,6}V. I. Vernadsky Crimean Federal University, Simferopol, Russian Federation; LLC Institute «KRYMGHINTIZ», Simferopol, Russian Federation.
E-mail: lks0324@yandex.ru.*

Geophysical research in the karstified areas is an important stage in the engineering-geological study of the geological settings during the socioeconomical development of the territory. Geophysical methods are a powerful and effective tool that provides valuable information about the current geological and hydrogeological conditions of the near-surface section of soluble rocks. The combined use of karst-speleological and geophysical methods provides a relatively high reliability and verifiability of the conclusions obtained.

Geophysical studies of karst in the Crimea began to be actively carried out in the late 50s of XX century, after the creation of the Complex Karst Expedition of the Academy of Sciences of the Ukrainian SSR and the geophysical team led by B. M. Smolnikov. The complex of geophysical studies of karst included various options for electrical exploration (electrical profiling, vertical electrical sounding, lateral logging). For 1958-1964 geophysical studies covered two hydrogeological areas of the Mountain Crimea: 1 — the area of karst water recharge on the yayla massifs and 2 — the area of groundwater discharge on the slopes and at the foot of the Main Ridge.

In the early 60s of XX century during the construction of the Yalta hydrotunnel through the Main Range, geophysical methods were used to study the nature and thickness of the basement aquiclude, the Upper Jurassic limestone strata, to identify tectonic faults, fracture zones and water abundance in the section of the massif. The interpretations obtained were subsequently confirmed during tunneling.

In 2011, the staff of the Ukrainian Institute of Speleology and Karstology applied successfully the method of GPR profiling to study the epikarst zone on the Chatyrdag and Ai-Petri massifs. With its help, the regularity of changes in the thickness of the epikarst was revealed depending on the morphological conditions of the territory.

The current stage in the development of geophysical methods in the study of karst is based on the use of the Skala-64 complex for electrical resistivity tomography. Since 2018, Skala-64 has been widely used by the staff of the Scientific Centre «Institute of Speleology and Karstology» (V. I. Vernadsky Crimean Federal university) for numerous engineering and geophysical surveys in the Republic of Crimea and the city of Sevastopol. In addition to engineering tasks, this complex was tested on well-known karst objects in Mountainous (Chatyrdag massif, Mramornaya cave area) and Piedmont (Tavrida cave area) regions of Crimea. The high-resistivity zones (more than 3500 Ohm·m) revealed correspond to the known parts of the caves. In addition to them, a number of anomalies were identified in the immediate vicinity of the caves, which, obviously, are their undiscovered extensions.

Keywords: geophysical studies, karst, electrical resistivity tomography, GPR, anomaly, cave filling, Crimea.

Reference

1. Dubljanskij V. N. Kompleksnaja karstovaja jekspedycja. Speleologija i karstologija, 2008 no 1, pp. 20–22. (In Russian).
2. Golovcyn V. N., Ivanov B. N., Smol'nikov B. M. Nekotorye karstologo-geofizicheskie issledovanija zon pogloshhenija stoka v karstujushhihsja porodah Gornogo Kryma. Geologicheskaja interpretacija i metodika geofizicheskikh issledovanij. Geofizicheskij sbornik, Kiev. 1964. no 9. v. 7, pp. 142–146. (in Russian).
3. Ivanov B. N., Progrushhenko P. V., Shutov Ju. I. Pervye karstologo-geofizicheskie issledovanija v Predgorno-Krymskoj oblasti. Kiev. 1966. no 9. pp. 54–60. (in Russian).
4. Golovcyn V. N., Smol'nikov B. M., Dubljanskij V. N., Ivanov B. N. Primenenie geoelektricheskikh issledovanij k resheniju osnovnyh problem karsta Gornogo Kryma. Kiev: Naukova dumka (Publ.), 1966, 149 p. (in Russian).
5. Hmelevskoj V. K., Vasil'ev I. N., Zadorozhnaja L. P. Tektonicheskaja struktura Jaltinskogo gornogo massiva // Kompleksnye izyskanija pri stroitel'stve gidrotonnellja v karstovoj oblasti Gornogo Kryma. Simferopol', 1971, pp. 17–57. (in Russian).
6. Klimchuk A. B., Tokarev S. V., Amelichev G. N., Naumenko V. G., Pustovojt V. A. Izuchenie epikarstovoj zony izvestnjakovyh massivov Gornogo Kryma metodom georadarnogo profilirovanija // Geograficheskie i geojekologicheskie issledovanija v Ukraine i sopredel'nyh territorijah, Simferopol'. 2012. pp. 139–141. (in Russian).
7. Fage A. N., Sanchaa A. M., Samokhin G. V. Issledovanie peshhery Tavrida metodom jelektrotomografii // III Karstologicheskije chtenija, Simferopol'. 2021. pp. 87–95. (in Russian).

Поступила в редакцию 31.08.2021 г.