

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«СИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ГЕОСИСТЕМ И ТЕХНОЛОГИЙ»
(СГУГиТ)

ИНТЕРЭКСПО ГЕО-СИБИРЬ

XIV Международный научный конгресс

Международная научная конференция

**«НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЕ. ГОРНОЕ ДЕЛО. НАПРАВЛЕНИЯ
И ТЕХНОЛОГИИ ПОИСКА, РАЗВЕДКИ И РАЗРАБОТКИ
МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ.
ЭКОНОМИКА. ГЕОЭКОЛОГИЯ»**

Т. 4

Сборник материалов

Новосибирск
СГУГиТ
2018

Ответственные за выпуск:

Доктор геолого-минералогических наук, академик РАН,
главный научный сотрудник Института нефтегазовой геологии
и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, Новосибирск
А. Э. Конторович

Доктор технических наук, академик РАН,
главный научный сотрудник Института нефтегазовой геологии
и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, Новосибирск
М. И. Энов

Доктор технических наук, директор Института нефтегазовой геологии
и геофизики СО РАН, Новосибирск
И. Н. Ельцов

Кандидат технических наук, директор Института горного дела
им. Н. А. Чинакала СО РАН, Новосибирск
А. С. Кондратенко

Кандидат геолого-минералогических наук, исполнительный директор
Сибирского научно-исследовательского института геологии, геофизики
и минерального сырья, г. Новосибирск
М. Ю. Смирнов

Начальник департамента по недропользованию по Сибирскому федеральному округу
Федерального агентства по недропользованию «Роснедра», Новосибирск
А. И. Неволько

С26 Интерэкспо ГЕО-Сибирь. XIV Междунар. науч. конгр., 23–27 апреля
2018 г., Новосибирск : Междунар. науч. конф. «Недропользование. Горное
дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторож-
дений полезных ископаемых. Экономика. Геоэкология» : сб. материалов
в 6 т. Т. 4. – Новосибирск : СГУГиТ, 2018. – 335 с.

В сборнике опубликованы материалы XIV Международного научного конгресса
«Интерэкспо ГЕО-Сибирь», представленные на Международной научной конференции
«Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разра-
ботки месторождений полезных ископаемых. Экономика. Геоэкология» (секция «Гео-
логическое, геофизическое и геохимическое обеспечение поиска и разведки полезных
ископаемых. Геотехнологии. Геоэкология»).

Печатается по решению редакционно-издательского совета СГУГиТ

Материалы публикуются в авторской редакции

ПРОБЛЕМА ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДА ЭЛЕКТРОТОМОГРАФИИ ПРИ ЗОНДИРОВАНИИ В ПЕЩЕРЕ

Полина Сергеевна Осипова

Новосибирский национальный исследовательский государственный университет, 630090, Россия, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 2, магистрант, тел. (913)749-78-84, e-mail: OsipovaPS@ipgg.sbras.ru

Владимир Владимирович Оленченко

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник, зав. лабораторией геоэлектрики, тел. (383)330-79-08, e-mail: OlenchenkoVV@ipgg.sbras.ru

Леонид Валерьевич Цибизов

Новосибирский национальный исследовательский государственный университет, 630090, Россия, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 2, ассистент; Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, научный сотрудник, e-mail: TsibizovLV@ipgg.sbras.ru

В результате полевых археогеофизических измерений в пещере получена двумерная геоэлектрическая модель разреза. Для оценки влияния стенок и потолка пещеры на результат инверсии проведено трехмерное численное моделирование. Анализ моделей показал, что толщина рыхлого слоя восстанавливается заниженной, а влияние потолка выражается в появлении ложного проводящего слоя на глубине.

Ключевые слова: пещера, электротомография, прямая задача, обратная задача, инверсия.

THE PROBLEM OF APPLYING THE METHOD OF ELECTRICAL RESISTIVITY TOMOGRAPHY IN THE PROCESS OF ELECTRIC SOUNDING IN A CAVE

Polina S. Osipova

Novosibirsk National Research State University, 2, Pirogova St., Novosibirsk, 630073, Russia, Graduate, phone: (913)749-78-84, e-mail: OsipovaPS@ipgg.sbras.ru

Vladimir V. Olenchenko

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 3, Prospect Akademik Koptyug St., Novosibirsk, 630090, Russia, Ph. D., Leading Researcher, Head of Laboratory of Geoelectric, phone: (383)330-79-08, e-mail: OlenchenkoVV@ipgg.sbras.ru

Leonid V. Tsibizov

Novosibirsk National Research State University, 2, Pirogova St., Novosibirsk, 630073, Russia, Assistance; Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 3, Prospect Akademik Koptyug St., Novosibirsk, 630090, Russia, Researcher, e-mail: TsibizovLV@ipgg.sbras.ru

In consequence of field archaeogeophysical measurements in the cave, a two-dimensional geoelectric section model was obtained. Three-dimensional numerical modeling was carried out to

evaluate the influence of the walls and ceiling of the cave on the result of inversion. Analysis of the models showed that the thickness of the loose layer are diminish is restored, and the influence of the ceiling is expressed in the appearance of a false conductive layer at depth.

Key words: cave, electrical resistivity tomography, direct problem, inverse problem, inversion.

Пещеры использовались древними людьми в качестве жилища и сейчас представляют интерес для археологии. Чем больше мощность культурного слоя в пещере, тем большее количество артефактов там может быть найдено. Изучение пещер или полостей под землей геофизическими методами часто ограничивается поиском и определением их геометрических параметров с поверхности [2, 4]. Для оценки мощности осадочного слоя либо определения внутреннего строения пещеры проводят исследования внутри пещеры методами электротомографии и георадиолокации [3, 5, 6]. Однако вопрос о влиянии стен и потолка пещеры на результаты электрических зондирований и инверсии ранее не рассматривался. В настоящей работе оценивается влияние трехмерности объекта изучения на результаты двумерной инверсии, которая обычно применяется при полевых исследованиях.

Геофизические работы методом электротомографии проводились в сентябре 2017 г. в пещере Сельунгур в Республике Кыргызстан [1]. На рис. 1 представлен геоэлектрический разрез по одному из профилей в пещере. В нижней части разреза была выделена предполагаемая граница кровли коренных пород с удельным электрическим сопротивлением (УЭС) 600–2 000 Ом·м, над которыми залегают рыхлые отложения (200–500 Ом·м). Крупные обломки кровли, захороненные в рыхлых породах, выделяются аномалиями высокого УЭС.

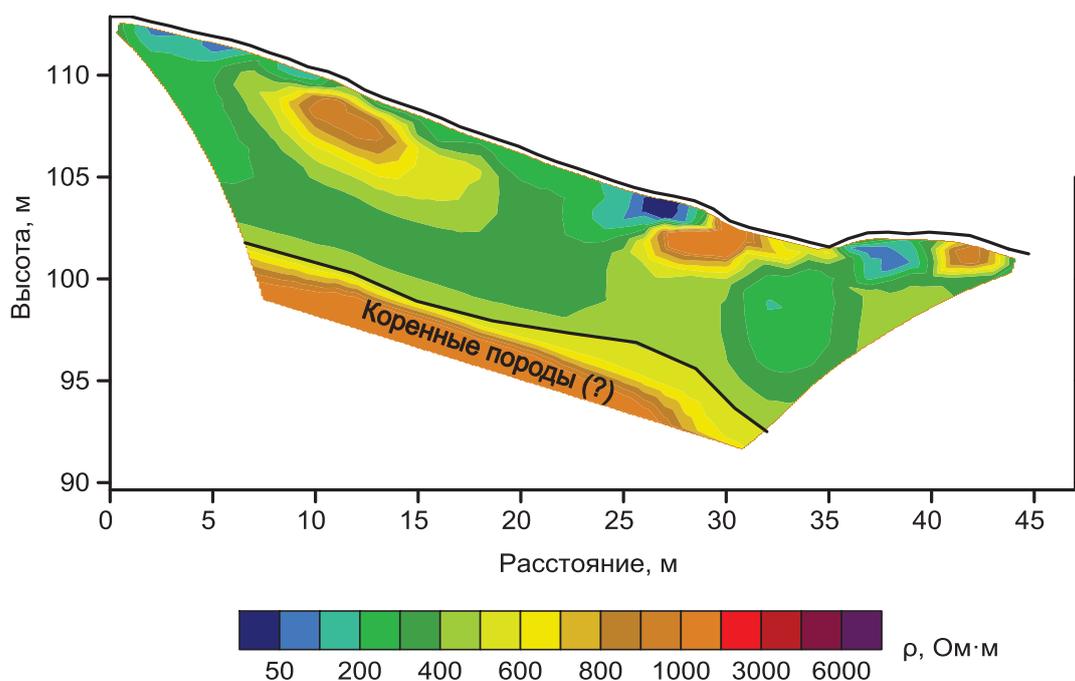


Рис. 1. Геоэлектрический разрез по профилю внутри пещеры

Необходимо установить, действительно ли выделенная граница является кровлей коренных пород либо на разрезе отражается боковое влияние стен и потолка пещеры. Для ответа на этот вопрос созданы модель пещеры без потолка (рис. 2, а) и с потолком (рис. 2, б). В модели без потолка осадочные породы залегают в форме полуцилиндра с радиусом 5 м. При наличии потолка пещера представлена в виде цилиндрического коридора с радиусом 5 м, заполненного наполовину осадочными породами. Скелет пещеры (коренные породы) имеет УЭС 1 000 Ом·м, осадочные породы – 200 Ом·м. Вдоль пола, посередине полуцилиндра, расположен профиль измерений УЭС длиной 47 м, на котором заземлено 48 электродов с шагом 1 м. Прямая трехмерная задача рассчитывалась для профиля, расположенного по оси пещеры. По схеме трехэлектродной установки на электродах поочередно задавался источник тока и рассчитывался потенциал. Расчет производился методом конечных элементов (решалось уравнение Пуассона). По результатам расчета прямой задачи решалась обратная с помощью программы Res2Dinv.

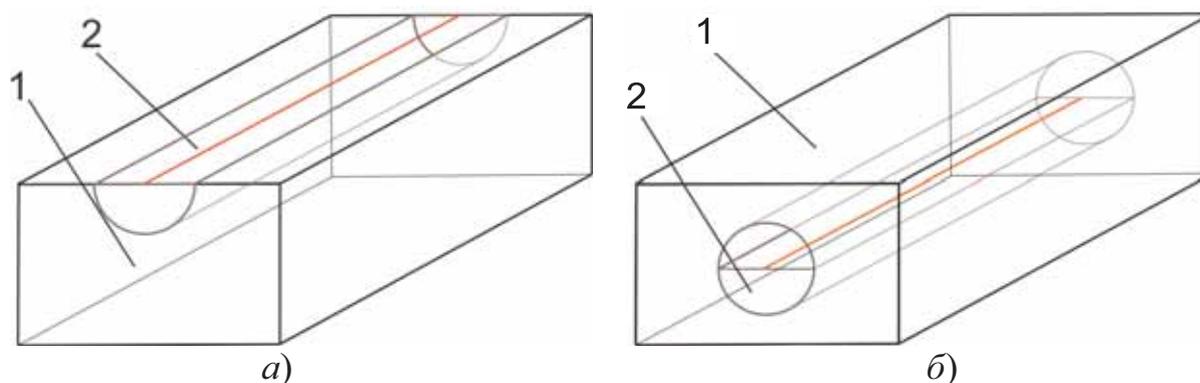


Рис. 2. Модели пещеры:

а) без потолка; б) с потолком; 1 – 200 Ом·м; 2 – 1 000 Ом·м

В результате инверсии получены геоэлектрические разрезы для моделей пещеры. Сопротивления на разрезе пещеры без потолка (рис. 3, а) изменяются от 100 до более 6 000 Ом·м, на разрезе пещеры с потолком (рис. 3, б) – до 3 000 Ом·м. На обоих разрезах верхний слой до глубины 3 м имеет низкие сопротивления 100–400 Ом·м. Он соответствует осадочным породам, хотя тоньше заданной мощности. На интервале глубин 3–10 м сопротивления увеличиваются до максимальных, т. е. появляется ложный изолятор. Для разреза модели пещеры без потолка на глубине 15 м появляется слой с УЭС 1 000 Ом·м, который соответствует вмещающей среде. Для разреза пещеры с потолком также появляется этот слой, но он имеет сопротивление 400 Ом·м, т. е. почти в два раза ниже УЭС вмещающей среды, заданного в модели. Это связано с тем, что при работе в цилиндрической области пещеры электротомография работает как боковой картаж в скважине. Коэффициент трехэлектродной установки при ра-

боте на поверхности выражается формулой $k = \frac{2\pi \cdot AM \cdot AN}{MN}$, а при работе в скважине $k = \frac{4\pi \cdot AM \cdot AN}{MN}$, т. е. значение коэффициента внутри скважины в два раза выше, чем в полупространстве. В результате этого после инверсии сопротивление коренных пород в случае модели пещеры с потолком в два раза меньше заданного изначально.

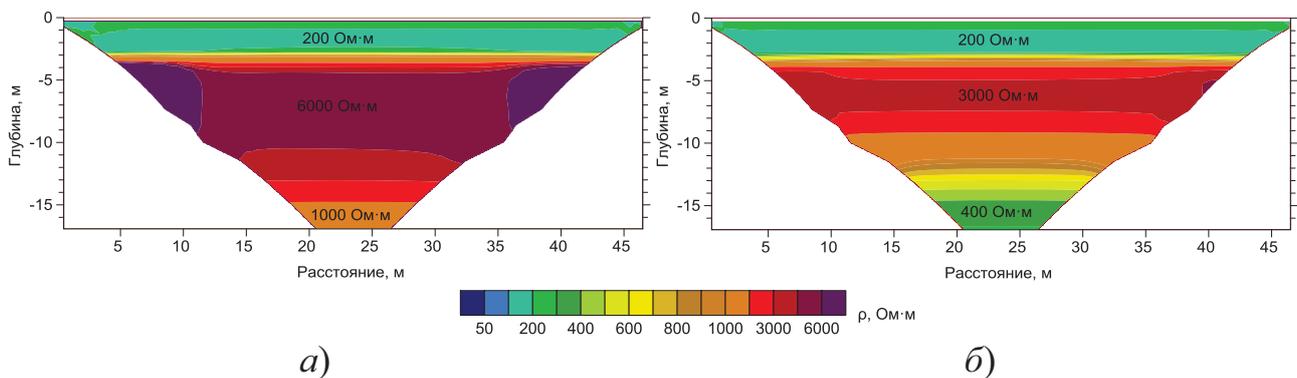


Рис. 3. Геоэлектрические разрезы по профилю внутри пещеры:
 а) для модели пещеры без потолка; б) для модели пещеры с потолком

Анализ разрезов показывает, что при двумерной инверсии данных ЭТ получается заниженная толщина слоя рыхлых пород. При этом наличие потолка в модели выражается на двумерной модели появлением на глубине ложного проводящего слоя, УЭС которого в два раза ниже, чем заданное значение сопротивления в стартовой модели. Независимо от присутствия потолка в модели на разрезах появляется аномальный слой высокого сопротивления. Таким образом, предполагается, что реальная толщина осадочных пород в пещере Сельунгур превышает установленную изначально по данным 2D-инверсии.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Аprobация комплекса геофизических методов в пещере Сельунгур (Кыргызстан) / Л. В. Цибизов, А. И. Кривошапкин, П. С. Осипова и др. // Теория и практика археологических исследований. – 2017. – Т. 20, № 4. – С. 169–177.
2. Combined microgravity, electrical resistivity tomography and induced polarization to detect deeply buried caves: Algaidilla cave (Southern Spain) / F. J. Martínez-Moreno, A. Pedrera, P. Ruano et al. // Engineering Geology. – 2013. – Vol. 162. – P. 67–78.
3. Electrical resistivity and seismic refraction tomography to detect buried cavities / E. Cardarelli, M. Cercato, A. Cerreto, G. Di Filippo // Geophysical Prospecting. – 2010. – Vol. 58, № 4. – P. 685–695.
4. Exploration for a cave by magnetic and electrical resistivity surveys: Ayvacık Sinkhole example, Bozdağ, İzmir (western Turkey) / Ç. Balkaya, G. Göktürkler, Z. Erhan, Y. L. Ekinici // Geophysics. – 2012. – Vol. 77, N 3. – P. B135–B146.

5. Leucci G., De Giorgi L. Integrated geophysical surveys to assess the structural conditions of a karstic cave of archaeological importance // *Natural Hazards and Earth System Science*. – 2005. – Vol. 5, N 1. – P. 17–22.

6. 2D and 3D ERT imaging for identifying karst morphologies in the archaeological sites of Gran Dolina and Galería Complex (Sierra de Atapuerca, Burgos, Spain) / L. Bermejo, A. I. Ortega, R. Guérin et al. // *Quaternary International*. – 2017. – Vol. 433. – P. 393–401.

REFERENCES

1. Aprobacija kompleksa geofizickih metodov v peshere Sel'ungur (Kyrgyzstan) / L. V. Cibizov, A. I. Krivoschapkin, P. S. Osipova i dr. // *Teorija i praktika arheologickih issledovanij*. – 2017. – T. 20, № 4. – S. 169–177.

2. Combined microgravity, electrical resistivity tomography and induced polarization to detect deeply buried caves: Algaidilla cave (Southern Spain) / F. J. Martínez-Moreno, A. Pedrera, P. Ruano et al. // *Engineering Geology*. – 2013. – Vol. 162. – P. 67–78.

3. Electrical resistivity and seismic refraction tomography to detect buried cavities / E. Cardarelli, M. Cercato, A. Cerreto, G. Di Filippo // *Geophysical Prospecting*. – 2010. – Vol. 58, N 4. – P. 685–695.

4. Exploration for a cave by magnetic and electrical resistivity surveys: Ayvacık Sinkhole example, Bozdağ, İzmir (western Turkey) / Ç. Balkaya, G. Göktürkler, Z. Erhan, Y. L. Ekinci // *Geophysics*. – 2012. – Vol. 77, N 3. – P. B135–B146.

5. Leucci G., De Giorgi L. Integrated geophysical surveys to assess the structural conditions of a karstic cave of archaeological importance // *Natural Hazards and Earth System Science*. – 2005. – Vol. 5, N 1. – P. 17–22.

6. 2D and 3D ERT imaging for identifying karst morphologies in the archaeological sites of Gran Dolina and Galería Complex (Sierra de Atapuerca, Burgos, Spain) / L. Bermejo, A. I. Ortega, R. Guérin et al. // *Quaternary International*. – 2017. – Vol. 433. – P. 393–401.

© П. С. Осипова, В. В. Оленченко, Л. В. Цибизов, 2018