

**ЭЛЕКТРОТОМОГРАФИЯ В ПЕЩЕРЕ:
ЧИСЛЕННЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ*****Владимир Владимирович Оленченко***

Новосибирский национальный исследовательский государственный университет, 630090, Россия, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 1, кандидат геолого-минералогических наук, доцент; Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, ведущий научный сотрудник, e-mail: OlenchenkoVV@ipgg.sbras.ru

Леонид Валерьевич Цибизов

Новосибирский национальный исследовательский государственный университет, 630090, Россия, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 1, кандидат технических наук, 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

Полина Сергеевна Осипова

Новосибирский национальный исследовательский государственный университет, 630090, Россия, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 1, магистрант; Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, инженер, e-mail: OsipovaPS@ipgg.sbras.ru

В 2017 году были проведены полевые исследования методом электротомографии в пещере Сельунгур (Киргизия). В ходе этих работ возник вопрос о достоверности получаемых данных. Проведен численный эксперимент на основе трехмерного моделирования по оценке влияния стен и потолка пещеры на результаты двумерной инверсии, выполняемой в программе для полупространства. Установлено, что в случае расходящихся стен пещеры учёт их влияния улучшает результат решения обратной задачи. То есть, толщина рыхлого осадочного слоя в пещере и удельное электрическое сопротивление пород восстанавливается лучше, чем для модели двухслойного полупространства.

Ключевые слова: пещера, электротомография, численное моделирование, инверсия.

**ELECTROTOMOGRAPHY IN A CAVE:
A NUMERICAL EXPERIMENT*****Vladimir V. Olenchenko***

Novosibirsk National Research State University, 1, Pirogova St., Novosibirsk, 630073, Russia, Ph. D., Associate Professor; Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 3, Prospect Akademik Koptyug St., Novosibirsk, 630090, Russia, Leading Researcher, e-mail: OlenchenkoVV@ipgg.sbras.ru

Leonid V. Tsibizov

Novosibirsk National Research State University, 1, Pirogova St., Novosibirsk, 630073, Russia, Ph. D., Assistance Lecturer; Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 3, Prospect Akademik Koptyug St., Novosibirsk, 630090, Russia, Researcher, e-mail: TsibizovLV@ipgg.sbras.ru

Polina S. Osipova

Novosibirsk National Research State University, 1, Pirogova St., Novosibirsk, 630073, Russia, Graduate, Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 3, Prospect Akademik Koptyug St., Novosibirsk, 630090, Russia, Engineer, e-mail: OsipovaPS@ipgg.sbras.ru

Field studies were carried out using electrotomography in the Sel'ungur cave (Kyrgyzstan) in 2017. In the course of this work, a question aroused about the reliability of the obtained data. A numerical experiment based on three-dimensional modeling was performed to assess the influence of the walls and ceiling of the cave on the results of a two-dimensional inversion using the half-space program. It has been established that in the case of diverging cave walls, their influence improves the result of inversion problem. So, the thickness of the loose sedimentary layer in the cave and the electrical resistivity of rocks are restored better than the inversion model of a two-layer half-space.

Key words: cave, electrical resistivity tomography, numerical experiments, inversion.

Применение геофизических методов в археологических исследованиях является успешной практикой [4, 5, 8]. Например, определение мощности культурного слоя или выделение крупных коренных объектов является важной задачей для геофизиков во время раскопок. Информация о форме и глубине породы может значительно улучшить планирование археологических работ. Электротомография (ЭТ) является эффективным методом для таких исследований. Коренные и осадочные породы обычно отличны по своему удельному электрическому сопротивлению (УЭС) [3], поэтому между ними появляется контрастная по проводимости граница. Для построения реалистичной модели требуется применение трехмерной электротомографии. Внутри пещеры для такой съемки появляется проблема – пространство в длину в несколько раз превосходит ширину и высоту. Кроме того, электрический ток может распространяться не только в нижнее полупространство, как в привычном случае в поле, но и в потолок и стены пещеры. Это вносит свой вклад в измеренные данные. В ходе литературного обзора по теме мы нашли несколько статей с результатами исследований, выполненных в замкнутом пространстве – пещере, пирамиде, здании [7, 9, 10]. Однако, нигде не затрагивается вопрос правомерности применения программ двумерной инверсии для полупространства в трёхмерных средах, таких как пещера. Мы считаем, что электрические измерения в пещере имеют свои нюансы и необходимо понять, насколько возможно применение обычных программ обработки данных электротомографии в таких случаях. Ниже представлены результаты полевого и численного эксперимента.

В ходе междисциплинарных исследований пещеры Сельунгур в Кыргызстане (рис. 1) были выполнены работы методом ЭТ [1]. В результате определена кровля коренных пород, выделены погребённые валуны, толща рыхлых осадков (рис. 2). Тем не менее, необходимо было понять, насколько достоверны результаты. По итогу работ об оценке влияния стен и потолка пещеры на результаты двумерной инверсии показали, что толщина рыхлого слоя восстанавливается заниженной, а влияние потолка выражается в появлении ложного проводящего слоя на глубине [2]. Однако, в работе использовалась очень прибли-

зительная модель пещеры. В связи с этим в настоящей работе эксперимент проводился на модели, близкой к реальной, и обнаружены некоторые интересные аспекты применения ЭТ в условиях пещеры.

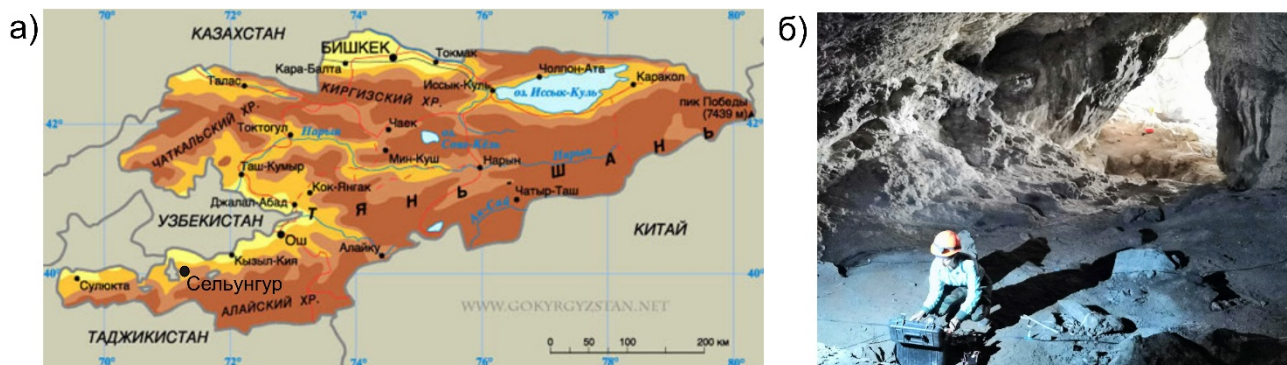


Рис. 1. Схема расположения пещеры Сельунгур (а) и электротомография внутри пещеры (б)

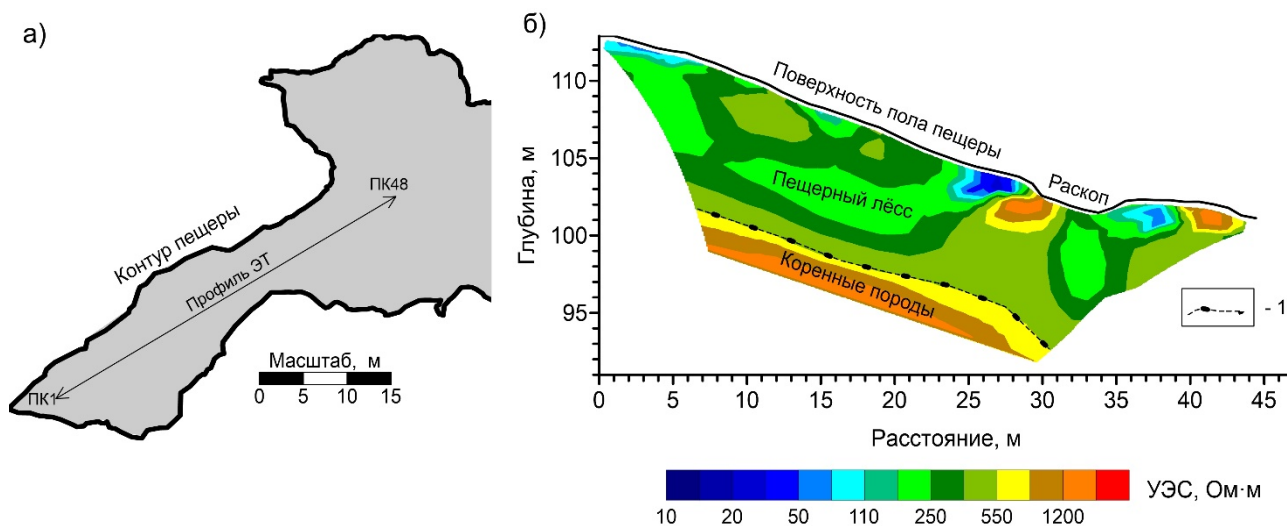


Рис. 2. Расположение профиля внутри пещеры (а) и геоэлектрический разрез вдоль профиля (б):

1 – кровля коренных пород

Численное моделирование проводилось с помощью программного обеспечения Comsol Multiphysics. Чтобы оценить влияние потолка пещеры, проведен численный эксперимент как для модели пещеры (рис. 3, а), так и для полупространства (рис. 3, б). Созданная модель пещеры хорошо описывает её реальные геометрические размеры. Стены пещеры падают под углом 70° , мощность лёссовых отложений 8 м. УЭС среды было выбрано по данным полевых исследований [1]: $1000 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ для коренной породы и $200 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ для рыхлых осадков. Электрическое поле рассчитывалось для трехэлектродной электроразведочной

установки из 48 электродов с шагом 1 м. Полученные в численном эксперименте данные загружались в программу двумерной автоматической инверсии Res2Dinv [6].

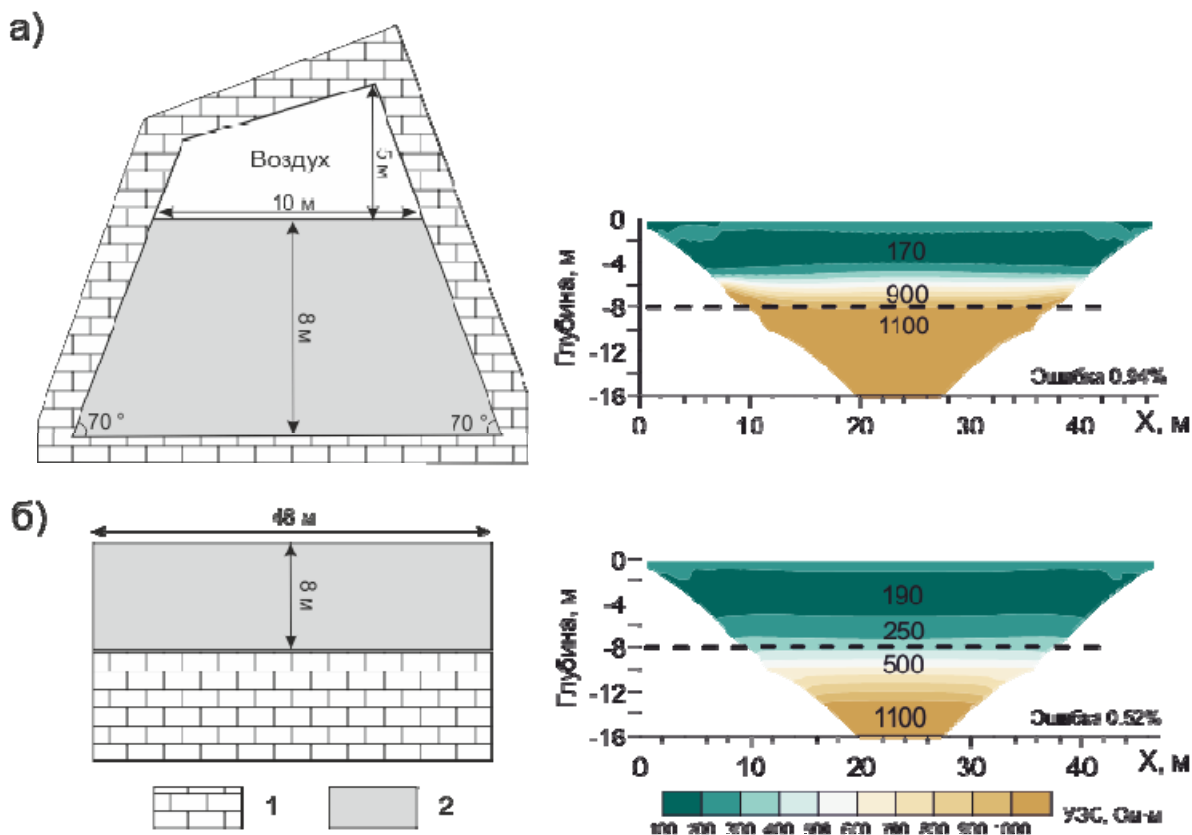


Рис. 3. Модель пещеры Сельунгур с геометрическими параметрами, приближенными к реальным, и результат двумерной инверсии для этой модели (а), модель двухслойного полупространства и результат инверсии для этой модели (б):
1 – коренные породы, 2 – лёсс

На рис. 3, а показан результат двумерной инверсии для профиля, проходящего вдоль продольной оси пещеры. В этом случае двумерная автоматическая инверсия дала хороший результат. Мощность осадков и УЭС восстановились достаточно точно. На рис. 3, б показан двумерный электрический разрез для двухслойного полупространства. Он отличается от разреза, полученного для модели пещеры, тем, что граница между осадочными и коренными породами на глубине 8 м восстанавливается неявно, хотя УЭС верхнего слоя (190 Ом·м) близко к значению в стартовой модели (200 Ом·м).

Сравнение геоэлектрических разрезов для пещеры с расходящимися стенами и простой двухслойной среды показало, что учёт влияния стен улучшает результат решения обратной задачи. То есть, толщина рыхлого осадочного слоя и удельное электрическое сопротивление коренных пород восстанавливается лучше для пещеры, чем для полупространства. Таким образом, численный экс-

перимент показал, что геоэлектрические разрезы, полученные по данным электротомографии внутри пещеры Сельунгур, дают достоверную информацию.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Апробация комплекса геофизических методов в пещере Сельунгур (Кыргызстан) / Л.В. Цибизов, А.И. Кривошапкин, П.С. Осипова, В.В. Оленченко, А.В. Григорьевская, Б. Виола, Т. Чаргынов, К.А. Колобова, С.В. Шнайдер // Теория и практика археологических исследований. – 2017. – Т. 20, № 4. – С. 169-177.
2. Осипова П. С., Оленченко В. В., Цибизов Л. В. Проблема применения метода электротомографии при зондировании в пещере // Интерэкспо Гео-Сибирь. XIV Междунар. науч. конгр.: Междунар. науч. конф. «Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Экономика. Геоэкология»: сб. материалов в 6 т. (Новосибирск, 23–27 апреля 2018 г.). – Новосибирск: СГУГиТ, 2018. Т. 4. – С. 48-52.
3. Пархоменко Э. И. Электрические свойства горных пород. – М.: Наука, 1965. – 164 с.
4. Integrating geomorphology, geophysics, sedimentology and geochronology – a multiproxy geoarcheological investigation at the Early Upper Paleolithic site of Crvenka-At, Vrsac (Serbia) / J. Böskén, W. Chu, P. Fischer, N. Klasen, C. Zeeden, I. Obreht, U. Hambach, D. Mihailovic, F. Lehmkuhl // EGU-2018. European Geosciences General Assembly: Proceedings of the Conf. (Vienna, Austria, 8-13 April 2018). – Vienna, Austria: EGU, 2018. – EGU2018-7874-1.
5. Deiana R., Leucci G., Martorana R. New Perspectives on Geophysics for Archaeology: A Special Issue // Surveys in Geophysics. – 2018. – Vol. 39. – №. 6. – С. 1035-1038.
6. Loke M.H. Tutorial. RES2DINV ver. 3.59, Rapid 2-D Resistivity & IP inversion using the least-squares method. – Malaysia, Geotomo Software, 2010. – 148 p.
7. High resolution geophysical and topographical surveys for the characterization of fumane cave prehistoric site, Italy / M. Obradovic, N.A. Zeid, S. Bignardi, M. Bolognesi, M. Peresani, P. Russo, G. Santarato // Near Surface Geoscience 2015. 21st European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics: Proceedings of the Conf. (Turin, Italy, 6-10 September 2015). – Turin, Italy: EAGE, 2015. – 4 p.
8. Slepak Z., Platov B. Geophysics in Archeology. – Cham: Springer. – 2019. – 303-311 p.
9. «Illuminating» the interior of Kukulcan's Pyramid, Chichen Itza, Mexico, by means of non-conventional ERT geophysical survey / A. Tejero-Andrade, D. Argote-Espino, G. Cifuentes-Nava, E. Hernández-Quintero, R.E. Chávez, A. García-Serrano // Journal of Archeological Science. – 2018. – Т. 90. – С. 1-11.
10. Non-destructive electrical resistivity tomography for indoor investigation: the case of Kapnikarea Church in Athens / G.N. Tsokas, P.I. Tsourlos, G. Vargemezis, M. Novack // Archeological Prospection. – 2008. – Т. 15. – №.1. – С. 47-61.

© В. В. Оленченко, Л. В. Цибизов, П. С. Осипова, 2019