

УДК 550.837 (075)

Д.А. Квон¹, В.А. Шевнин²

ГЕОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ УЧАСТКА ОКОЛО СТРОЯЩЕЙСЯ ТРАССЫ СКОРОСТНОЙ АВТОДОРОГИ МОСКВА–САНКТ-ПЕТЕРБУРГ

Представлены результаты геоэлектрических исследований участка Мшенцы в Тверской области вблизи строящейся трассы скоростной автодороги Москва–Санкт-Петербург. Для получения информации о геологическом строении района и протекающих в нем процессах (карст и фильтрация подземных вод) выполнены измерения методами электротомографии, естественного электрического поля, резистивиметрии, термометрии. С помощью петрофизического моделирования удельного электрического сопротивления горных пород и с учетом данных электроразведки выполнено литологическое расчленение разреза и рассчитаны значения коэффициента фильтрации горных пород. Интерпретация данных показала широкое распространение нарушенных карбонатных отложений, слагающих нижнюю часть разреза исследуемой территории. Сделан вывод о принадлежности участка Мшенцы к зоне локального интенсивного карста.

Ключевые слова: карст, петрофизическое моделирование, электротомография (ЭТ), аномалии естественного электрического поля, коэффициент фильтрации, показатель уязвимости водоносного горизонта.

In this article we provide geoelectric research results of Mshentsy area in Tver region. To get information about geologic structure of the area and such processed as groundwater filtration and karst geophysical investigations were preformed (electrical resistivity imaging, self potential study, water resistivity and temperature measurements). Using petrophysical modeling of rock apparent resistivity and taking into account geoelectric data lithology differentiation was performed. Investigations showed that karstic carbonates are widely spread in lower part of the cross-section. We draw a conclusion that Mshentsy area is a localized intensive karst zone.

Key words: karst, petrophysical modeling, electrical resistivity tomography (ERT), self potential, hydraulic conductivity, Aquifer Vulnerability Index (AVI).

Введение. Новая скоростная автодорога Москва–Санкт-Петербург по плану должна проходить вблизи дер. Мшенцы (Бологовский район Тверской области). В деревне расположен памятник природы «Родники Мшенцы», представляющий собой церковь и комплекс родников, которые регулярно посещают верующие, краеведы и туристы.

Геологическое строение района двухъярусное: сверху залегают рыхлые моренные отложения, внизу — коренные карбонатные породы, осложненные карстом.

Строительство и эксплуатация автотрассы, во-первых, несут опасность в связи с развитием карстовых процессов, во-вторых, могут повлечь нарушение экологической обстановки памятника природы и прилегающих территорий.

Но наряду с региональной закарстованностью пород существуют зоны локального интенсивного карста [Соколов, 1962], которые обуславливают резкую неоднородность распределения фильтрационных и емкостных свойств массива карстующихся пород. К морфологическим признакам зоны локально интенсивного карста, при относительно неглубоком залегании карстующихся пород, от-

носятся широко развитые поверхностные формы рельефа, такие, как провалы, воронки и др., а разгрузка трещинно-карстовых вод осуществляется через многочисленные родники сквозь рыхлые отложения.

Чтобы оценить геологическое строение района и процессы, протекающие в нем (карст и фильтрация подземных вод), выполнены геофизические исследования методами электроразведки. Комплекс методов включал в себя электротомографию (ЭТ), метод естественного электрического поля (ЕП), резистивиметрию и термометрию. С помощью петрофизического моделирования удельного электрического сопротивления (УЭС) горных пород с учетом данных резистивиметрии, термометрии и ЕП выделены интервалы значений сопротивления, характерные для верхней части разреза, нарушенных и ненарушенных карбонатных пород, а также рассчитаны значения коэффициента фильтрации.

Геологическая и гидрогеологическая обстановка. Четвертичный покров на рассматриваемом участке представлен преимущественно отложениями ледниковой формации, которые связаны с валдайским

¹ ООО НПЦ «Геоскан», инженер; e-mail: kvonchik@mail.ru

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, профессор, докт. физ.-мат. н.; e-mail: shevninvlad@yandex.ru

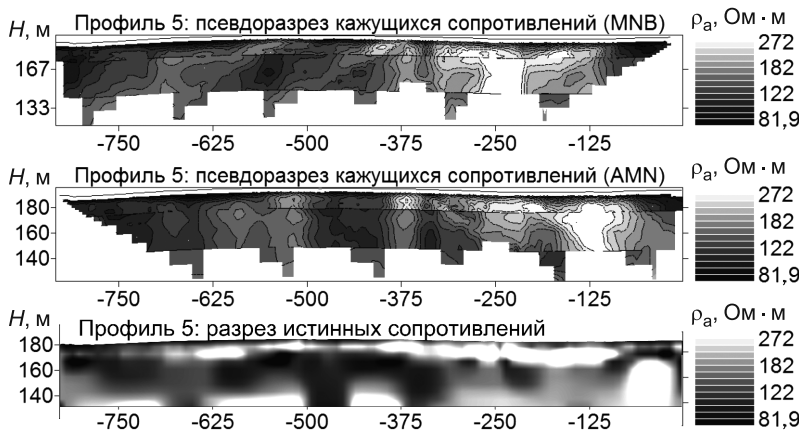


Рис. 1. Пример псевдоразрезов кажущихся сопротивлений и разреза истинных сопротивлений по профилю 5

оледенением. Отложения верхних горизонтов коренного основания по глубине возможного техногенного влияния представлены карбонатными породами раннекаменноугольного возраста. Во всей рассматриваемой толще развиты карстовые процессы. В связи с этим геологические условия определяются, с одной стороны, составом и свойствами рыхлого покрова, а с другой — сохранностью и состоянием коренных скальных пород, в частности, развивающимися в них карстовыми процессами.

В рассматриваемом регионе существует два водоносных комплекса, приуроченных к четвертичным и коренным отложениям. Воды в четвертичных ледниковых отложениях содержатся в линзах песков в верхней части разреза, воды в дочетвертичных отложениях — в разуплотненных карбонатах, это зоны с активной фильтрацией воды. Анализы проб воды из местных источников показали, что большая часть родников приурочена к зонам разгрузки вод из моренных отложений, но существует мощный восходящий источник (источник 1), который связан с водоносным горизонтом в карбонатных породах.

Метод электротомографии. Электротомографические работы на исследуемом объекте осуществлялись по 7 профилям. Шаг между электродами составлял 5 м. Использовалась трехэлектродная комбинированная установка Шлюмберже. Максимальный разнос питающей линии составил 217,5 м. Для увеличения сигнала на больших разносах осуществлялся переход с одной приемной линии на другую большей длины (длина приемных линий 5, 15 и 25 м). Глубина исследования около 60 м.

Обработка полевых данных включала в себя построение разрезов кажущегося сопротивления (рис. 1), учет рельефа и подготовку данных для проведения двумерной инверсии. Затем проводилась двумерная инверсия с помощью программы Res2DInv 3.59 [Loke, 2009], по результатам которой построены разрезы значений истинного сопротивления (рис. 1).

По результатам инверсии построены гистограммы (рис. 2). Сопротивление среды меняется от 40 до 600 Ом·м, с двумя максимумами распределения для рыхлых и скальных пород. Граница между рыхлыми и скальными породами проходит примерно по значениям 150–170 Ом·м.

Петрофизическое моделирование горных пород. Петрофизическое моделирование выполнялось с помощью программы PetroWin, разработанной А.А. Рыжовым [Матвеев, Рыжов, 2006]. Программа позволяет вычислять значения удельного электрического сопротивления горных пород по их петрофизическим свойствам и оценивать петрофизические параметры по значению сопротивления породы с учетом дополнительных данных [Рыжов, Судоплатов 1990; Матвеев, Рыжов, 2006].

Моделирование выполнялось для рыхлых и скальных пород, чтобы уточнить возможные интервалы значений сопротивления и затем учесть эти данные при интерпретации данных электротомографии. Кроме того, с помощью программы моделирования можно вычислить значения коэффициента фильтрации горных пород, информация о которых поможет выявить особенности гидрогеологических и экологических характеристик исследуемого участка.

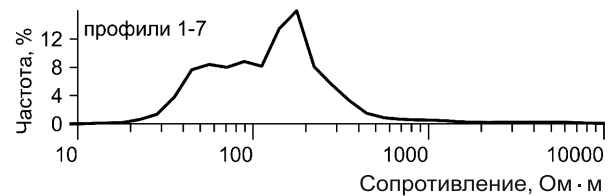


Рис. 2. Гистограмма значений сопротивления для профилей 1–7

Моделирование выполнялось для рыхлых и скальных пород, чтобы уточнить возможные интервалы значений сопротивления и затем учесть эти данные при интерпретации данных электротомографии. Кроме того, с помощью программы моделирования можно вычислить значения коэффициента фильтрации горных пород, информация о которых поможет выявить особенности гидрогеологических и экологических характеристик исследуемого участка.

Моделирование для скальных пород. Скальные породы на исследуемом участке представлены карстующимися карбонатами, поэтому основная цель моделирования состояла в том, чтобы условно разделить значения УЭС на интервалы, характерные для относительно более или менее проницаемых карбонатных пород (выбранное значение 20%).

Химический анализ вод источника и измеренные в них значения удельного электрического сопротивления и температуры воды учтены в петрофизической модели карстующихся карбонатов.

Значения УЭС в области до 20% скважности моделируемой смеси меняются в диапазоне 300–10 000 Ом·м в зависимости от минерализации водного раствора, показателя цементации и других параметров моделируемой породы. Для 20–30%-ной скважности пород значения УЭС лежат в интервале от 150–300 до 1000 Ом·м.

Данные петрофизического моделирования учитывались при интерпретации данных электро-

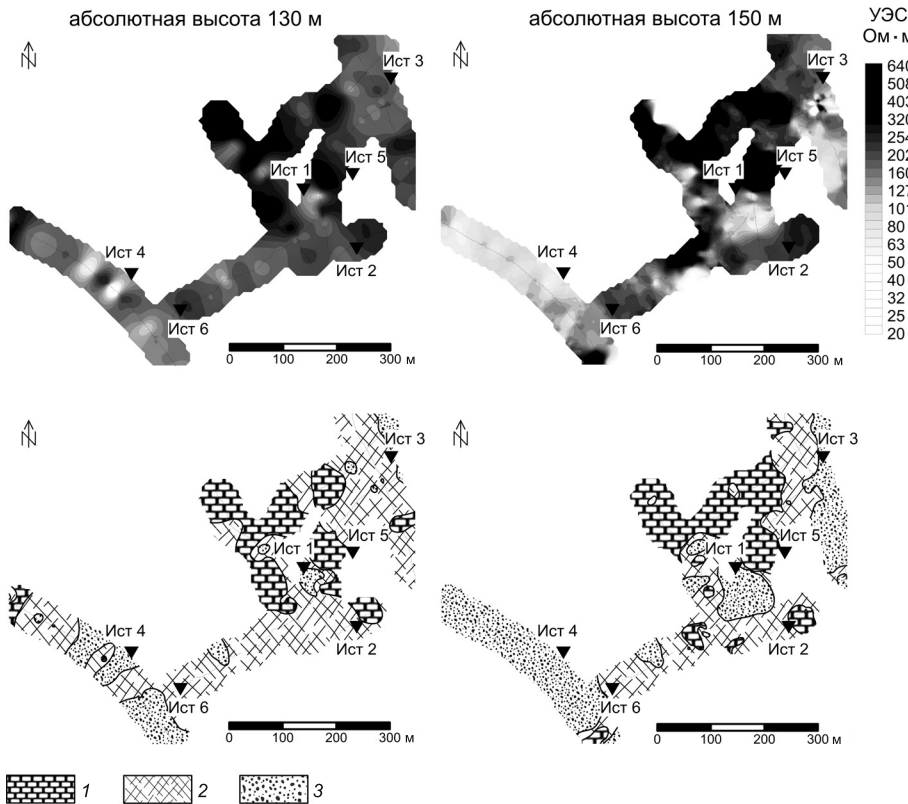


Рис. 3. Карты значений электрического сопротивления на абс. высоте 130 и 150 м и соответствующие квазилитологические карты: 1 — известняки и доломиты; 2 — нарушенные карбонатные породы; 3 — полости, заполненные рыхлым материалом

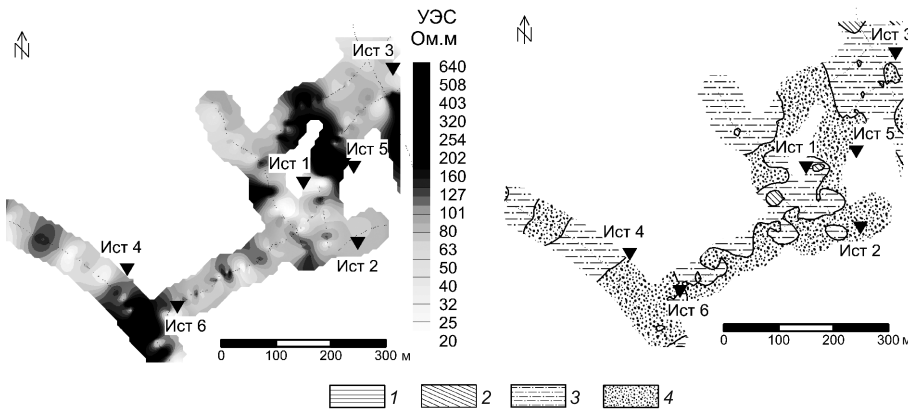


Рис. 4. Карта значений электрического сопротивления на абс. отметке 170 м и соответствующая квазилитологическая карта: 1 — глины; 2 — суглинки; 3 — супеси; 4 — пески

томографии и визуализации результатов в виде квазилитологических карт. Исходя из результатов моделирования и корреляции с зонами высокого градиента удельного электрического сопротивления и данных статистики выбраны интервалы значений сопротивления 170–270 Ом·м для выделения карстующихся карбонатов, а значения >270 Ом·м — для менее карстующихся коренных пород.

На рис. 3 показаны карты удельного электрического сопротивления и соответствующие им квазилитологические карты на абсолютной высоте 130 и 150 м. На этих картах видно, что на всей исследуемой площади находятся обширные

области с такими значениями УЭС, которые соответствуют нарушенным карбонатным породам (170–270 Ом·м). Также видны локальные зоны с относительно небольшим сопротивлением (50–160 Ом·м), увеличивающиеся в размере по мере приближения к дневной поверхности. Предположительно эти зоны соответствуют карстовым полостям, которые заполнены рыхлым материалом. Кроме того, они прослеживаются на картах для всех изученных глубин и, вероятно, через них осуществляется вертикальное перемещение водных масс. В частности, такая зона расположена рядом с источником 1 (рис. 3). Возможно, эта локальная область обеспечивает гидравлическую связь между водоносными горизонтами в четвертичных отложениях и в коренных породах, что объясняет отличие вод источника 1 от других по химическим показателям.

Рассчитанные с помощью программы моделирования значения коэффициента фильтрации в областях с относительно низкой скважностью (<20%) принимают значения <7 м/сут., а для областей с относительно высокой скважностью (20–30%) — в диапазоне от 7 до 18,5 м/сут.

Петрофизическое моделирование рыхлых отложений и интерпретация данных ЭТ. По данным бурения верхняя часть разреза представлена в основном песчано-глинистыми

разностями. Поэтому моделирование рыхлых отложений направлено на уточнение интервалов УЭС, характерных для песков, супесей, суглинков и глин. Дополнительной информацией для петрофизического моделирования отложений послужили данные резистивиметрии и термометрии.

По результатам петрофизического моделирования получены интервалы значений удельного электрического сопротивления (Ом·м): для глин 5–20, для суглинков 20–50, для супесей 50–100 и для песков 100–150.

На рис. 4 показаны карта распределения электрического сопротивления на абсолютной высоте 170 м (что в среднем соответствует 5–10 м глубины

для восточной части карты и 20 м для западной) и соответствующая квазилитологическая карта. Полученные данные (рис 4) свидетельствуют о том, что верхняя часть разреза представлена преимущественно песками и супесями.

Методика работ методом естественного поля.

Наблюдения методом ЕП выполняли в акваториях рек и ручьев и по берегу оз. Олешно. Использовали неполяризующиеся электроды конструкции Петье [Petiau, 2000]. Для измерения напряжения постоянного тока применялся мультиметр с ценой деления 0,1 мВ и входным сопротивлением >1 МОм (>10⁶ Ом). Измерения проводили по методике потенциала (один электрод неподвижный, второй перемещается по профилю). Шаг между измерениями составлял в среднем 10 м.

Чтобы выявить участки, в которых предполагается наличие фильтрационных аномалий (рис. 5), проведено сглаживание графиков ЕП путем расчета среднего в скользящем окне по 5 и 7 точкам и расчета медианы в скользящем окне по 5 точкам.

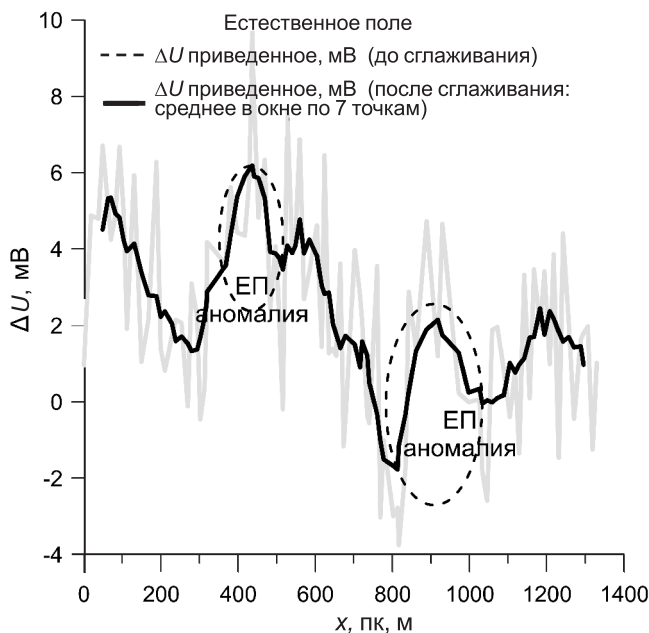


Рис. 5. Пример графиков, построенных по данным метода естественного поля

После обнаружения аномалии на графике, оценивали ее амплитуду (мВ) и ширину (м) и с помощью преобразованной В.А. Комаровым [Комаров, 1994] формулы Гельмгольца рассчитывали значения скорости фильтрации (*V*) по электрическому полю в аномальной зоне (*E_a*):

$$V = \frac{E_a r^2}{8 \xi \epsilon_0 \epsilon_{отн} \rho \pi}$$

где *V* — скорость фильтрации, м/сут.; *E_a* — электрическое поле, мВ; ξ — дзета-потенциал, обычно составляющий ±(20...50) мВ; ϵ_0 — абсолютная диэлектрическая проницаемость (в системе СИ

$\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м); $\epsilon_{отн}$ — относительная диэлектрическая проницаемость ($\epsilon_{отн} = 80$, безразмерная величина); ρ — удельное сопротивление фильтрующей породы в Ом·м (значения выбирали в соответствии с результатами электротомографии на прилегающих участках и петрофизического моделирования); *r* — динамический радиус капилляров грунта (м), который принимает значения от $8,8 \cdot 10^{-5}$ до 10^{-4} для песков и от $6,2 \cdot 10^{-6}$ до $4,2 \cdot 10^{-5}$ для супесей. С учетом значений вышеперечисленных параметров и в предположении, что аномалии фильтрации связаны с разгрузкой воды через песчаный материал русла реки, по данным ЕП получены следующие значения скорости фильтрации для супесей и песков — от 0,5 до 6,4 м/сут.

Все оценки значений коэффициента фильтрации соответствуют данным гидравлической проводимости по оценкам [Freeze, Cherry, 1979].

Показатель уязвимости водоносного горизонта.

Чтобы оценить защищенность водоносного горизонта от потенциального загрязнения, можно воспользоваться формулой показателя уязвимости водоносного горизонта [Van Stempvoort et al., 1992], которая количественно показывает время, за которое загрязнение с поверхности дойдет до водоносного слоя:

$$c = \sum_i \frac{d_i}{K_i}$$

где *d_i* (м), *K_i* (м/сут, м/год) — толщина и гидравлическая проводимость каждого вышележащего слоя соответственно.

Для водоносных горизонтов в карбонатных отложениях и в песках получены следующие значения показателя уязвимости: 10 сут. до песков и 52,3 сут. до карбонатов.

Заключение. Комплексирование методов ЭТ, ЕП, резистивиметрии и термометрии позволило составить геолого-геофизическую модель среды и помогло определить такие параметры разреза, как скорость фильтрации воды в горных породах и уязвимость водоносных горизонтов.

Результаты интерпретации данных ЭТ совместно с петрофизическим моделированием горных пород показали широкое распространение нарушенных карбонатов, слагающих нижнюю часть разреза. Таким образом, геологические предпосылки того, что исследуемый участок относится к локальной зоне интенсивной закарстованности массива горных пород, подтверждаются геофизическими исследованиями.

В связи с этим встает вопрос об опасностях, связанных со строительством и эксплуатацией автотрассы, т.е. необходимости принять меры по защите от явлений, сопряженных со строительством на карстоопасных территориях.

Полученные высокие значения коэффициента фильтрации для отложений верхней части разреза (учитывая их широкое распространение) делают

водоносный горизонт четвертичных отложений уязвимым по отношению к загрязнениям. Принимая во внимание направление пьезометрического градиента, можно предположить, что потенциальное загрязнение от автодороги может затронуть воды памятника природы с последующим загрязнением близлежащих акваторий рек и озер.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Комаров В.А. Геоэлектрохимия: Уч. пособие. 1994. СПб: Изд-во СПбГУ, 1994. 136 с.

Матвеев В.С., Рыжов А.А. Геофизическое обеспечение региональных гидрогеологических, инженерно-геологических, геокриологических и геоэкологических исследований // Разведка и охрана недр. 2006. № 2. С. 50–57.

Рыжов А.А., Судоплатов А.Д. Расчет удельной электропроводности песчано-глинистых пород и использование функциональных зависимостей при решении гидрогеологических задач // Научно-технические достижения и передовой опыт в области геологии и разведки недр. М.: ВИЭМС, 1990. С. 27–41.

Так как воды четвертичного и дочетвертичного водоносного горизонтов гидравлически связаны и значения скорости фильтрации через нарушенные карбонаты высокие, то загрязнение может распространиться вглубь разреза.

Соколов Д.С. Основные условия развития карста. М.: Госгеолтехиздат, 1962. 322 с.

Freeze R.A., Cherry J.A. Groundwater. Prentice Hall, 1979. 604 p.

Loke M.H. Tutorial: 2-D and 3-D electrical imaging surveys. Malaysia: Geotomo Software, 2009.

Petiau G. Second generation of lead — lead chloride electrodes for geophysical applications // Pure and Applied Geophysics. 2000. Vol. 157. P. 357–382.

Van Stempvoort D., Ewert L., Wassenaar L. Aquifer vulnerability index: a GIS-compatible method for groundwater vulnerability mapping // Canad. Water Resources J. 1992. Vol. 18. P. 25–37.

Поступила в редакцию
06.04.2016