

Двумерная электрическая томография для изучения карбонатного и сульфатного карста

Модин И.Н., Акуленко С.А., Пелевин А.А., Ерохин С.А., Макаров Д.В., Большаков Д.К., Квон Д.А. (Геологический факультет МГУ им.М.В.Ломоносова)

Введение

Карстовые явления и процессы возникают при растворении осадочных пород в воде. Они наблюдаются в известняках, доломитах, в мелоподобных мергелях, мраморе, а также в гипсе, каменной соли, калийно-магниевых и других соляных породах. Растворимые в воде горные породы распространены на поверхности земли очень широко. Суммарная площадь, занятая обнаженными и погребенными под иными геологическими образованиями карстующимися породами, составляет более 50 млн. кв. км. При этом под карбонатными породами – до 40 млн. кв. км, под гипсами и ангидритами – около 7 млн. кв. км, и соляной карст – до 4 млн. кв. км. Таким образом, территории, занятые карстовыми процессами и явлениями, занимают приблизительно 1/6 часть всей обитаемой площади суши Земли.

Эти карстовые явления и процессы могут происходить на очень небольших глубинах, соответствующих нескольким метрам, или могут наблюдаться на очень больших глубинах – до нескольких сотен метров.

Развитие карстовых процессов проходит в течение длительного времени и связано с гидрогеологическим режимом данной местности, когда большое количество выпадающих осадков постепенно приводит к растворению карстующихся горных пород. Особенно опасными последствиями это явление угрожает при строительстве, причем наибольшую угрозу несут два процесса[10]:

1. Обрушение карстовых полостей и образование карстовых провалов на поверхности земли.
2. Постепенная суффозия или перемещение мелкодисперсного грунта из верхних слоев в карстовые полости. Такое перемещение грунта в нижние горизонты геологического разреза в конце концов вызывает обрушение поверхности земли.

На Европейской территории России выявлено множество зон с благоприятной ситуацией для развития карста. В частности, на *Рисунке 1* показана схема районирования карстовых проявлений и процессов в центральных районах Европейской территории России[3]. Обращает на себя внимание что вокруг Москвы образовалось два гигантских пояса карстующихся пород, каждый из которых имеет ширину 150-250 км. Формирование этих карстовых провинций тесно связано с строением Московской синеклизы, в южной части которой наблюдаются выходы к поверхности земли карстующихся карбонатных и гипсоносных пород. Особое значение имеют Подмосковно-Окский карстовый округ, который оккупирует непосредственно территорию Москвы и Новой Москвы, распространяясь к юго-западу от Москвы до Оки в южном направлении и до верховьев Днепра в западном направлении, включая долину р.Москвы. К северу от Москвы расположен огромный Валдайский карстовый округ, который охватывает все верховья Волги, включая практически целиком Тверскую область, и выходит своими северными границами на линию: Онежское озеро - Белое озеро - Кубенское озеро. К востоку от Москвы в низовьях Оки и Клязьмы расположен Окско-Клязьминский округ, в котором карстовые процессы встречаются чрезвычайно широко.

ко, нанося огромный ущерб строительству зданий, дорогам и трубопроводному транспорту.

Электрическая томография для изучения карста

Исследования проявлений карстовых процессов с помощью геофизических методов проводятся начиная с 60-х годов прошлого века и имеют большое прикладное и научное значение. В специальной литературе можно найти множество примеров успешного решения задач в этой сфере. При этом в качестве основных методов используются вертикальное электрическое зондирование, сейсморазведка методом преломленных волн и сейсморазведка методом общей глубинной точки [5,9].

В течение 20 последних лет на кафедре геофизики геологического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова разрабатывались теория, методика и техника двумерной электроразведки постоянным током, которая у нас в стране получила название **электрической томографии** [2]. В 2009 году были разработаны отечественные электротомографы, которые предназначены специально для решения задач инженерной геологии [6,8,11]. С этого момента в Московском университете начинают проводиться интенсивные методические и проектно-изыскательские исследования для определения эффективности и информативности указанного метода [8]. В течение нескольких последних лет был выполнен большой объем работ при проектировании трасс магистральных газопроводов. При этом метод электротомографии стал обязательным при выполнении изысканий под ННБ. Понимая огромную важность электротомографии в повышении качества и надежности результатов геофизических изысканий, нами была выдвинута инициатива, которая реализовалась в виде нормативного документа [17], в соответствии с которым электрическая томография должна выпол-

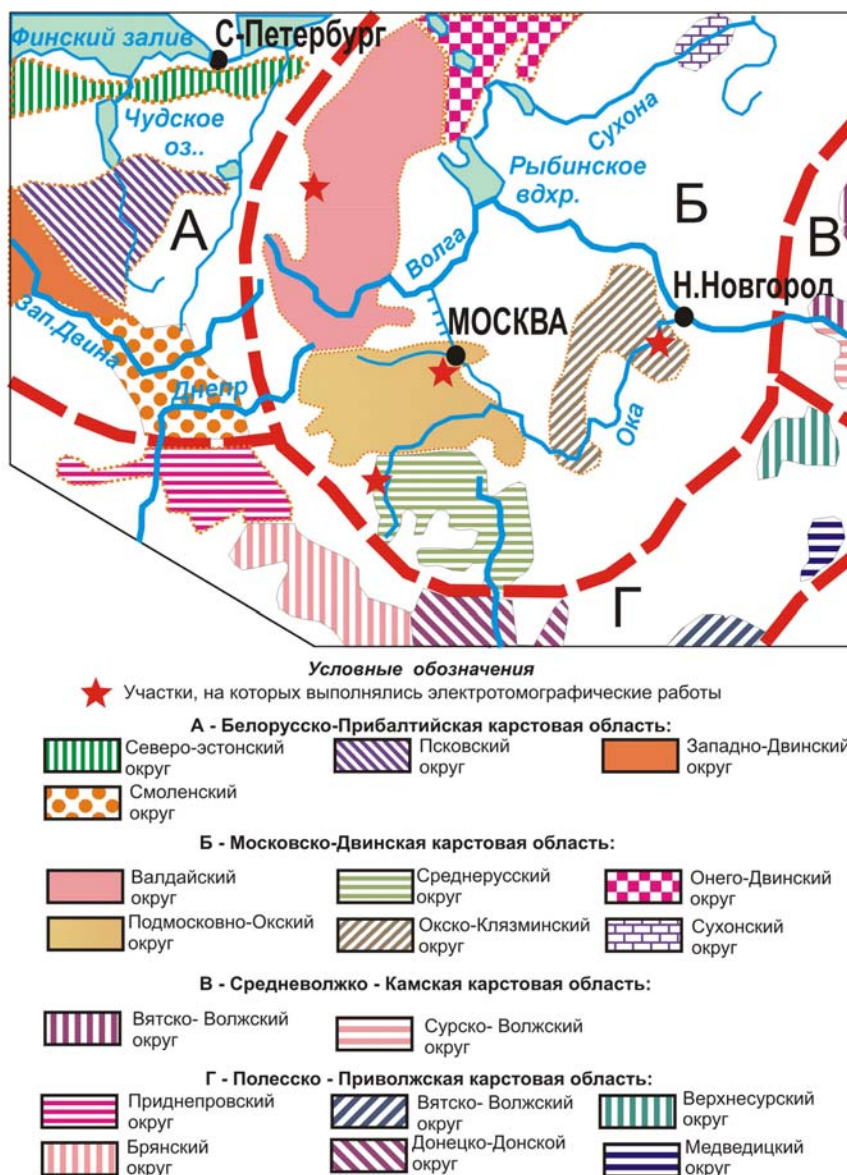


Рисунок 1. Районирование карста на Европейской территории России (по Н.А.Гвоздецкому)

няться с целью решения целого ряда геологических задач в условиях сложных горизонтально-неоднородных сред. В частности, с помощью этой технологии рекомендуется картировать карстовые зоны. В рамках этой задачи нами были выполнены следующие работы:

- в Калужской области возле д.Красный Клин вблизи города Козельска,
- в районе дер. Мишенцы на севере Тверской области,
- на участке между г.Подольском и г.Домодедово Московской области,
- под городом Павлово в Нижегородской области на месторождении гипса возле дер. Гомзово.

Подобные исследования были выполнены европейскими геофизиками. Особенно активно электротомографические работы велись в Словении, в которой известно очень большое количество карстопроявлений [15,16].

Участок Красный Клин(Калужская область,Среднерусский карстовый округ).

По классификации Н.А.Гвоздецкого [3], данная структура по своему генетическому типу относится к воронкам просасывания, или коррозионно-суффозионным, которые образуются в результате вымывания и проседания рыхлых покровных отложений в колодцы и полости карстующегося цоколя, выноса частиц в подземные каналы

По классификации академика Е.М. Сергеева[13], исследуемый объект относится, скорее, к типу «живущих воронок с крутыми обрывистыми склонами. Рядом с рассматриваемой воронкой имеется еще несколько сходных структур, вытянутых вдоль древней палеодолины и образующих карстово-эрозионный овраг[1].

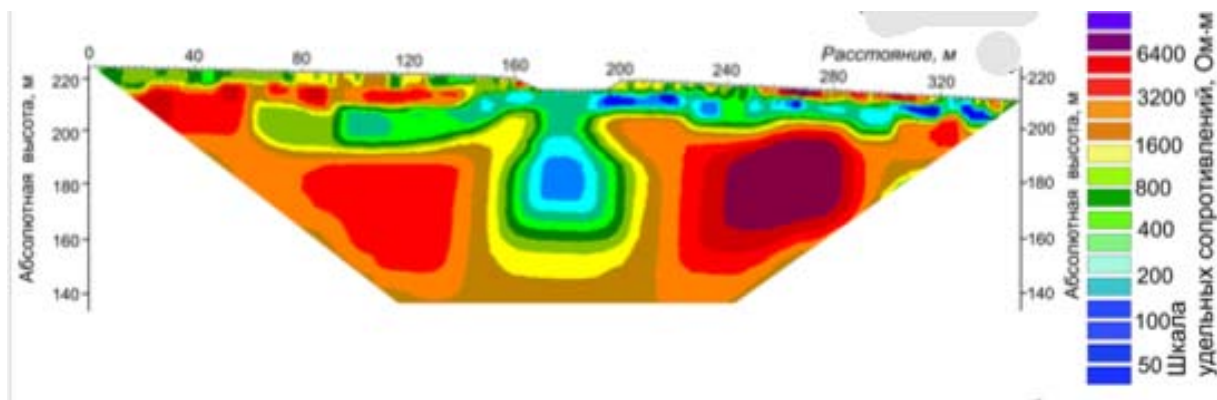


Рисунок 2. Геоэлектрический разрез по результатам электрической томографии на участке Красный Клин с одной расстановкой длиной 355 м и шагом между электродами 5 м

На **Рисунке 2** показан геоэлектрический разрез до глубины 80 м. Видно, что под карстово-суффозионной воронкой расположена большая полость, размеры которой в несколько раз превышают размеры самой воронки. Эта полость заполнена проводящим материалом, вероятно, бобриковского горизонта, который формирует второй горизонт геоэлектрического разреза. Ниже расположен слой, который имеет удельное сопротив-

ление 2000 Ом·м. Это скальные грунты, сложенные известняками упинского горизонта [12].

Размер исследуемой карстово-суффозионной воронки составляет поверху 46 м с севера на юг и 50 м с запада на восток. Видимые размеры ее нижней части составляют от 30 до 32 м. Глубина современной поверхности дна воронки равна 4,5 м.

По геологическим данным, в районе рассматриваемого объекта карстующиеся известняки упинского горизонта нижнего отдела турнейского яруса (C_{1up}) расположены на глубине не более 50 м, залегая под толщей четвертичных отложений и отложений бобриковского горизонта (C_{1bb}) незначительной мощности [4]. Механизм образования таких огромных воронок должен предусматривать развитие в известняках очень больших карстовых полостей. По оценкам авторов, во время образования данной воронки из приповерхностного слоя земли произошло перемещение грунта объемом не менее 10000 м³. Ее дно заболочено, покрыто коркой оторфованного грунта и завалено плавающими полусгнившими стволами деревьев. Диаметр карстовой полости составляет примерно 25–30 м, а центр находится на глубине около 40 м.

На глубине 15 м наблюдается проводящий блок, имеющий низкое сопротивление, характерное для грунтов бобриковского горизонта, перемешанных с выветрелыми известняками верхней части упинского горизонта. Вероятно, это масса грунта, которая закупорила горловину воронки. Ширина этой «пробки» составляет 13–14 м, а ее верхняя кромка находится на уровне кровли известняков.

Мшенцы (Север Тверской области, Валдайский карстовый округ)

Электротомографические исследования выполнены возле проектируемой скоростной автомобильной дороги Москва–Санкт-Петербург на территорию расположения памятника природы "Родники Мшенцы". Российской академией Естественных наук (РАЕН) совместно с Московским университетом в течение августа 2013 года проведена общественно-экологическая экспертиза этой территории. В геологическом отношении участок расположен на западном склоне крупной региональной структуры, так называемого Главного карбонового плато. В этой зоне мощный покров рыхлых четвертичных отложений преимущественно ледникового происхождения сочленяется с высоко поднятой кровлей пород нижнего карбона. В связи с этим инженерно-геологические условия определяются с одной стороны составом и свойствами рыхлого покрова, а с другой стороны сохранностью и состоянием коренных скальных пород, в частности развивающимися в них карстовыми процессами. Согласно приведенным данным, родники Мшенцы располагаются в поле развития пород стешевского горизонта C_{1st} , который имеет неоднородный литологический состав, представленный преимущественно доломитизированными известняками, содержащими желваки кремня. В породах стешевского горизонта широко развиты интенсивные карстовые процессы. На поверхности они проявляются в образовании воронок, оврагов, поноров, провалов и др. Карстовое происхождение имеют и некоторые озера, расположенные в этом районе. Отмечаются случаи поглощения рек карстовыми полостями вплоть до образования сухих русел.

Геофизические исследования были выполнены на площади, которая охватывает территорию около 1 квадратного километра. По результатам электрической томографии район исследования и в том числе трасса проектируемой автодороги необходимо отнести к участкам активного развития карстовых явлений в виде коррозионных воронок, провалов, полостей, деформаций и зон повышенной трещиноватости, которые располагались на глубинах от 20 до 70 м на всю глубину исследования. С помощью электротомографии выявлено 14 карстовых полостей. Надкарбонатный разрез, изученный по геофизическим данным, в основном представлен водными коллекторами (сверху пески и супеси, внизу залегают известняки) и является полностью проницаемым и геологически незащищенным от возможного негативного влияния автодороги. При этом излияния мшенских родников на поверхность земли находятся гипсометрически ниже автодороги на 15 м. Электротомография показала, что Мшенские родники приурочены к локальному поднятию карбонатов амплитудой около 15-20 м, осложненному малоамплитудными тектоническими нарушениями. Кроме этого было установлено, что формирование напорных вод происходит на глубинах 10-20 м, что подтверждается анализами проб воды и измерением ее температуры и удельных сопротивлений.

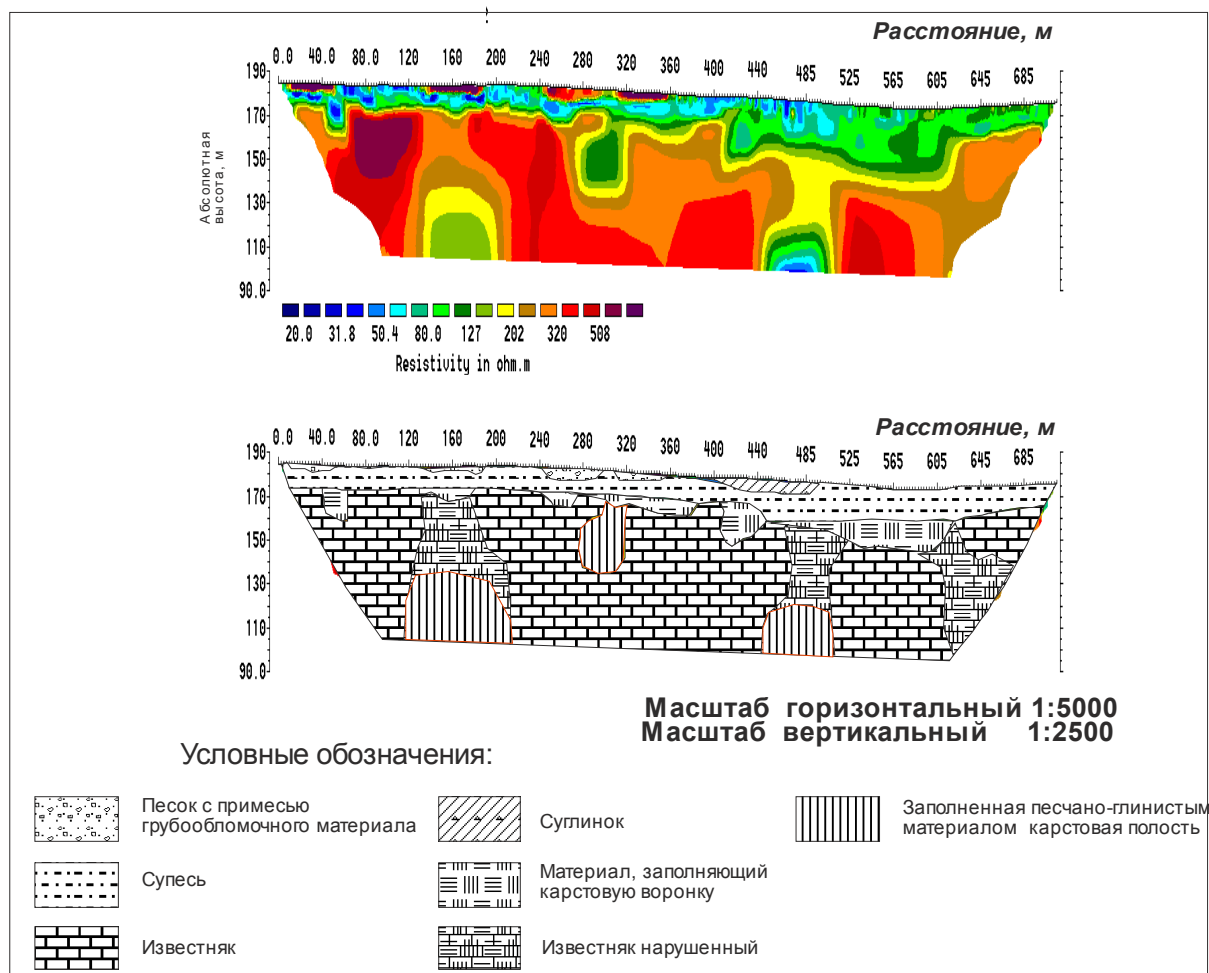


Рисунок.3. Результаты электротомографии по одному из профилей в районе д. Мшенцы

Участок мостового перехода проектируемой автодороги через р. Рожайка (Московская область, Подмосковно-Окский карстовый округ)

На участке мостового перехода через р. Рожайка измерения были выполнены по 5 параллельным профилям длиной по 470 м. Наиболее представительным является профиль 4, на котором наиболее ярко видны особенности геологического строения верхней части разреза. Общий перепад рельефа составляет на этом профиле 23 м (от абсолютной отметки 150 м на правом берегу до 127 м - отметка уреза воды в реке). Четко выделяется пойма и две надпойменные террасы, цоколи которых сложены высокоомным материалом. Долина имеет асимметричное строение: правый борт приподнят и характеризуется более крутыми склонами.

Разрез в целом имеет трехслойное строение (**Рисунок 4**), типичное для всей территории исследования, тип разреза Н. Верхний слой имеет неоднородное строение, его сопротивление составляет от 50 до 150 Ом·м, мощность от 2 до 5 м.

Второй слой является проводящим, представлен суглинками и глинами. Мощность второго слоя составляет до 10-12 м. На более высоких абсолютных отметках его мощность увеличивается до 12-13 м, а сопротивление понижается до 10-12 Ом·м. В пределах поймы сопротивление проводящего слоя возрастает до 20-30 Ом·м, а мощность уменьшается до 3-4 м.

На правом, высоком, берегу реки проводящий слой представлен глинами юрского возраста, которые сверху перекрыты суглинками. В пределах поймы низкоомный слой представлен только суглинками четвертичного возраста.

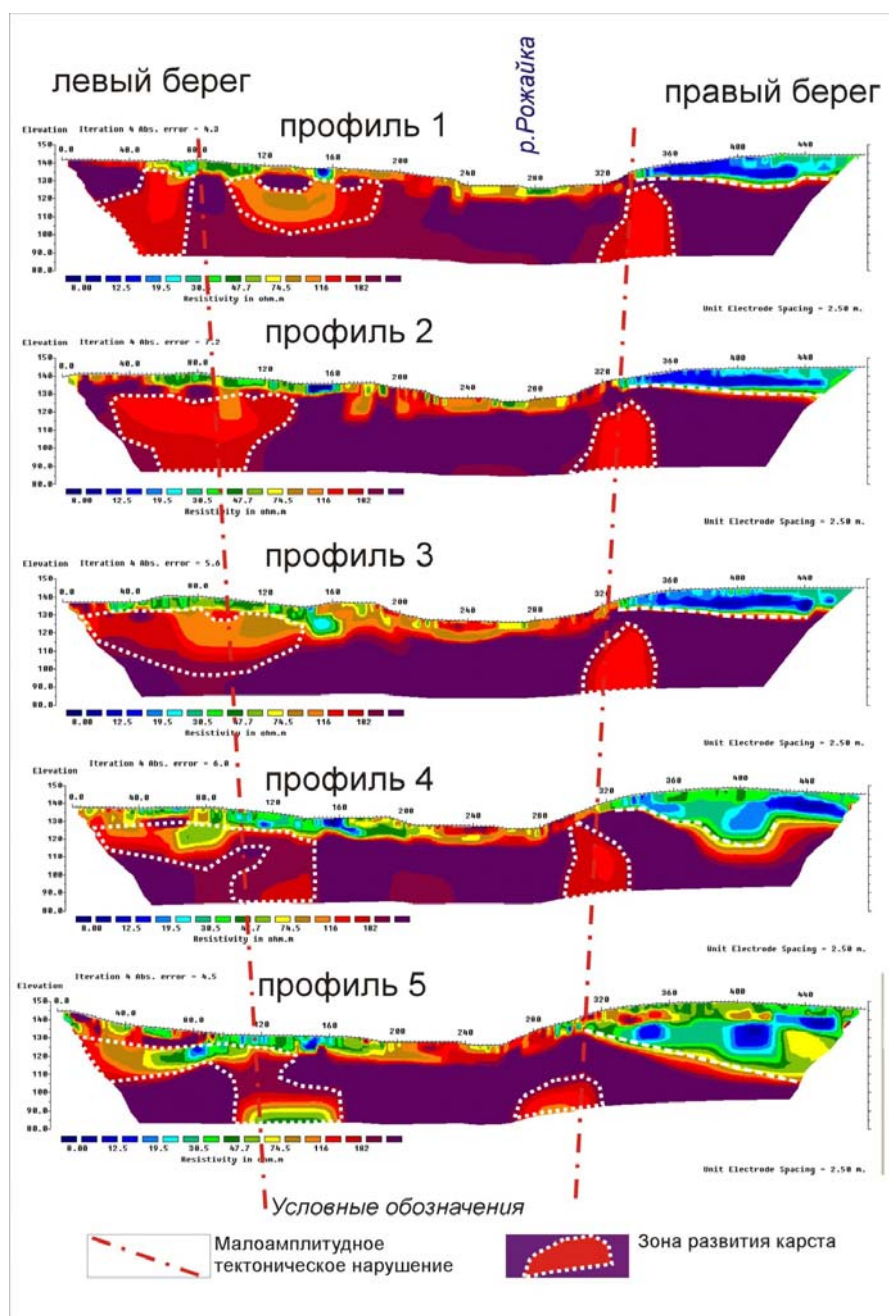


Рисунок 4. Геоэлектрические разрезы по профилям 1–5. Участок мостового перехода через р.Рожайка

В пределах поймы в нижней части разреза (ниже слоя суглинков) проявляется слой песков, сопротивление которого меняется от 70 до 150 Ом·м. Ниже располагается слой известняков, который является очень неоднородным. Кровля известняков залегает негоризонтально, по результатам электрической томографии ее верхние отметки меняются от 127 до 111 м. Наиболее высокие отметки проявляются на правом берегу в районе ПК340. Минимальные абсолютные отметки кровли известняков наблюдаются на левом берегу в районе ПК80. Наблюдаются две наиболее яркие структуры типа грабен. Ширина такого провала в районе ПК80 составляет порядка 45 м, в районе ПК400 - около 60 м. При этом глубина перепада кровли в этих местах примерно одинакова и составляет около 15 м. В пределах поймы кровля известняков неровная, и в целом эти неровности по своим горизонтальным размерам занимают около 20 м, переуглубления составляют порядка 5-7 м.

Кроме этих двух выявленных структур, в нижней части разреза наблюдаются зоны пониженных сопротивлений (в интервале ПК280-320, 200-240 и 60-140). Здесь наблюдаются более глубинные структуры, которые имеют сопротивления от 120 до 160 Ом·м, и находятся на глубинах от 15 до 30 м. На наш взгляд, эти структуры - проявления зон трещиноватости, которые наблюдаются на всех 5 профилях, проложенных через долину р. Рожайка и протягиваются параллельно руслу реки.

Таким образом, на данном участке встречаются карстовые структуры двух типов: поверхностный карст в виде обвалившейся и сильно измененной кровли известняков, и глубинный карст в виде зон трещиноватости, который не так ярко выражен (например, на участке профиля 5 в интервале пикетов 280-320) и, вероятно, соединяется с поверхностью (например, профиль 5 пикет 120). Поверхностный карст активно проявляется на профиле 4 и профиле 5, а глубинный проявлен на всех профилях.

Павловское месторождение гипса(Нижегородская область)

В 2012-2013 гг. на участке Павловского месторождения гипса и ангидрита были выполнены инженерно-геофизические изыскания методом электротомографии. Были выполнены площадные работы по серии параллельных профилей длиной до 2 км, с шагом между электродами 5 м и расстоянием между профилями от 30 до 50 м.

Основной целью выполнения полевых геофизических работ являлось исследование верхней части разреза (до 40 метров) для выявления карстовых воронок и каверн для обеспечения детализации строения водоупора.

По результатам выполненных работ были определены карстовые и кавернозные области и зоны трещиноватости.

На *Рисунке 5* представлен пример геоэлектрического разреза по профилю 7а. В правой части разреза выделяется карстовая воронка очень больших размеров шириной 200м и мощностью 30-40м.

На *Рисунке 6* представлена карта удельных электрических сопротивлений, построенная по данным со всей площади исследования для глубины 20м. При региональном падении гипсов с северо-запада на юго-восток, в северо-западной части карты карстовые области выделяется область проявляются как участки пониженных сопротивлений (фиолетовый контур).

Выводы

В результате натурных исследований, выполненных методом электротомографии, были получены результаты, которые позволяют выявить основные особенности провално-карстовых явлений. С помощью наземного геофизического метода в условиях неровной поверхности земли с помощью автоматической инверсии полевых данных были получены изображения структур, которые связаны с карстово-суффозионными процессами.

Электрическая томография позволяет обследовать карстовые структуры с детальностью, примерно равной шагу наблюдений. Поскольку шаг наблюдений сравнительно просто регулируется с помощью применения измерительных кос с характерными расстояниями между электродами, то для сравнительно небольших глубин до 30 м детальность исследований составляет порядка 1–3 м, а для глубин до 80–100 м – 5 м. В первом случае можно выявить карстовые структуры диаметром 10–15 м на глубинах 10–20 м. Во втором случае это будут пустоты диаметром 25–40 м на глубине 50–60 м.

Электротомография позволяет изучать карстовые структуры при площадных и линейных изысканиях при условии возможности размещения на открытом грунте линейных установок или специальных 3D-измерительных систем. В результате выполненных исследований доказано, что электрическая томография позволяет выявлять различные карстопроявления[14]: карстовые полости внутри толщи известняков, карстовые деформации, которые приводят к пространственным перемещениям кровли известняков и вещественным изменениям известняков в разрушенные формы карбонатов, коррозионные воронки, возникающие на поверхности карстующихся пород, и зоны трещиноватости, которые вызываются малоамплитудными тектоническими нарушениями, которые наиболее ярко проявляются в долинах рек.

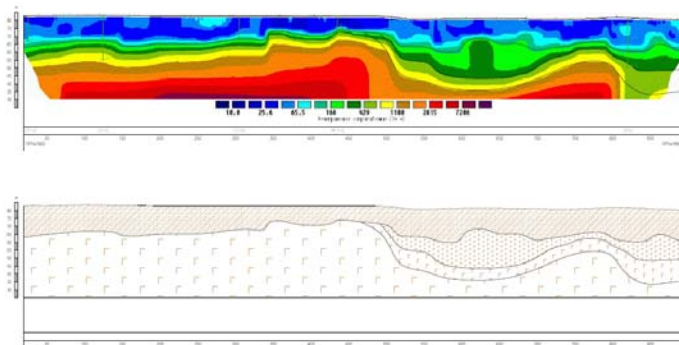


Рисунок 5. Результаты электротомографии по профилю 7 (выделен красным цветом на рис.6)

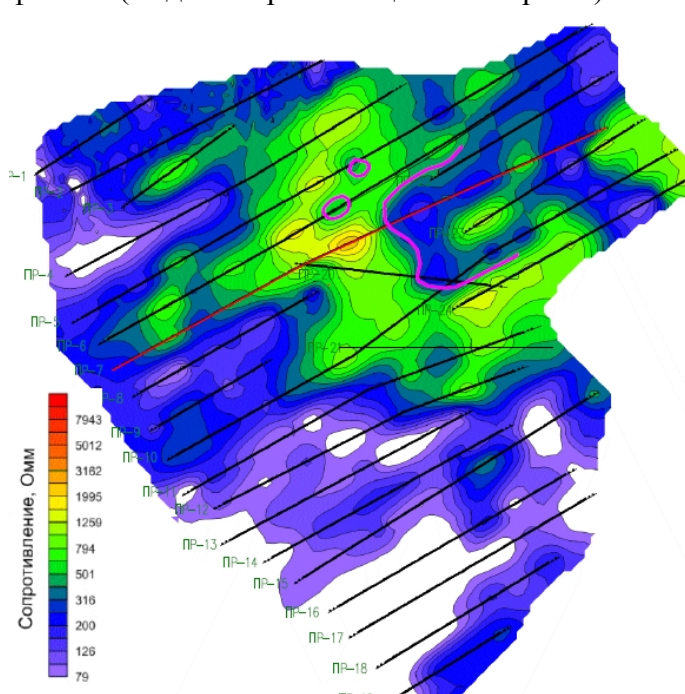


Рисунок 6. Карта среза сопротивлений на кровле гипсов на глубине 20 м

Библиография

- [1] Ананьев В.П., Потапов А.Д. [2007] Инженерная геология. М.: Высшая школа. 575 с.
- [2] Владов М.Л., Модин И.Н. [2009] Развитие инженерно-геофизических методов в МГУ // Инженерные изыскания. № 12. С. 64–69.
- [3] Гвоздецкий Н.А. [1981] Карст. М.: Мысль, 1981. 214 с.
- [4] Геологический атлас Калужской области [2007] / Составитель Бобров С.П. Калуга: МПР Калужской области, ООО ПГП «Притяжение». 72 с.
- [5] Дублянский В.Н., Смольников Б.М. [1969] Карстолого-геофизические исследования карстовых полостей приднестровской Подолии и Покутья. - Киев, "Наукова Думка". - 136 с.
- [6] Дукаревич Л.И., Волынин А.Ф., Сапожников Б.Г. [2009] «ERA-MULTI-MAX» – аппаратура многоэлектродной электроразведки / Материалы конференции «Инженерная и рудная геофизика – 2009». Геленджик: EAGE.
- [7] Модин И.Н., Марченко М.Н., Комаров О.И., Семейкин Н.П. [2010] Электротомография – инновационный геофизический метод для эффективного решения инженерно-геологических задач // Трубопроводный транспорт. № 1(17). С. 33–37.
- [8] Модин И.Н., Марченко М.Н., Семейкин Н.П., Дудник А.В., Монахов В.В. [2009] Электроразведочный комплекс для электротомографии методом вызванной поляризации «Омега-48» / Материалы конференции «Инженерная и рудная геофизика – 2009». Геленджик: EAGE.
- [9] Огильви А.А. [1990] Основы инженерной геофизики / Под ред. В.А. Богословского. Москва: Недра, 1990. 502 с.
- [10] Осипов Ю.Б., Чертков Л.Г. [1986] Методика инженерно-геологического изучения карстовых и суффозионно-провальных явлений в условиях крупного города // Инженерная геология. № 5. С. 72–84.
- [11] Панин Г.Л. [2009] Многоэлектродная аппаратура методов сопротивлений «Скала-48» / Материалы конференции «Инженерная и рудная геофизика – 2009. Геленджик: EAGE.
- [12] Петров В.Г. [2003] Геологическое строение и полезные ископаемые Калужской области. Калуга: Эйдос. 440 с.
- [13] Сергеев Е.М. [2011] Инженерная геология / 3-е изд., стереотипное. М.: Альянс. 248 с.
- [14] Толмачев В.В., Ройтер Ф.. [1990] Инженерное карстоведение.-М.: Недра, -151 с.
- [15] Kruse S.E., Grasmueck M., Weiss M., Viggiano D. [2006] Sinkhole structure imaging in covered karst terrain / Geophysical Research Letters. V. 33. P. L16405.
- [16] Stepisnik U. [2008] The application of electrical resistivity imaging in collapse doline floors: divaca karst, Slovenia // Studia geomorphologica Carpatho-Balcanica. V. 42. P. 41–51.
- [17] СП 11-105-97. [2004] Инженерно-геологические изыскания для строительства. Часть 6. Правила производства геофизических исследований.

Контактная информация

Модин Игорь Николаевич, профессор геологического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова, д.т.н., imodin@yandex.ru

Акуленко Светлана Анатольевна, инженер геологического факультета МГУ им.М.В.Ломоносова, sv-ak@yandex.ru