

Результаты многолетнего применения электротомографии на Александровском геофизическом полигоне в Калужской области

Бобачев А.А., Ерохин С.А., Геологический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова, г. Москва

Введение

С 1992 года на геофизическом полигоне кафедры геофизики геологического факультета МГУ в деревне Александровка Юновского района Калужской области проводятся студенческие геофизические практики. Кроме летней практики для студентов МГУ проводятся практики для студентов-геофизиков целого ряда других ВУЗов (Российский Государственный Геологоразведочный Университет, Саратовский Государственный Университет, Дубнинский международный университет природы, общества и человека) [Бобачев и др., 2009]. Там же проходят различные семинары по электро-магнитным методам. За прошедшие годы накопился большой объем геофизических данных. Помимо образовательных задач, в рамках практики исследуются также вопросы опытно-методического характера. Для изучения геологического строения территории полигона применяется целый комплекс геофизических методов, подкрепленных на некоторых участках данными бурения.

Одним из основных методов при малоуглубленных геофизических исследованиях является электроразведка методом сопротивлений. В ходе учебных практик использовались различные методики наблюдений этим методом: электропрофилирование, ВЭЗ, ДЭЗ, сплошные электрические зондирования. С 2002 года начались работы по методике электротомографии [Бобачев и др., 2006]. За это время было отработано более 10 км профилей с шагом 5-10 метров (рис. 1). При этом использовались различные измерительные комплексы и электроразведочные установки. Полученные данные и опыт проведения исследований позволяют сравнивать различные методики, выявляя их особенности, преимущества и недостатки. Кроме того, сейчас уже можно оценить возможности и ограничения электротомографического подхода при решении геологических задач в наших условиях. Это особенно актуально, так как сейчас метод электротомографии активно внедряется в практику отечественной геофизики.

Краткое описание геологического строения геофизического полигона

Верхняя часть разреза участка сложена ледниковыми отложениями (моренные суглинки мощностью до 20 м с удельным сопротивлением около 50 Ом.м, перекрытые покровными флювиогляциальными песками (мощность до 4 м с сопротивлением 200-4000 Ом.м в зависимости от влажности)). Кроме того, в долинах рек Воря и Угра распространены аллювиальные отложения. Подморенные отложения — это терригенно-карбонатная толща нижнего карбона с интегральным удельным сопротивлением 150 Ом.м. Верхняя часть этой толщи сложена плотными известняками веневского горизонта визейского яруса.

Создается впечатление относительно простой геологической ситуации. Однако проведенные исследования показали, что изучаемые гео-

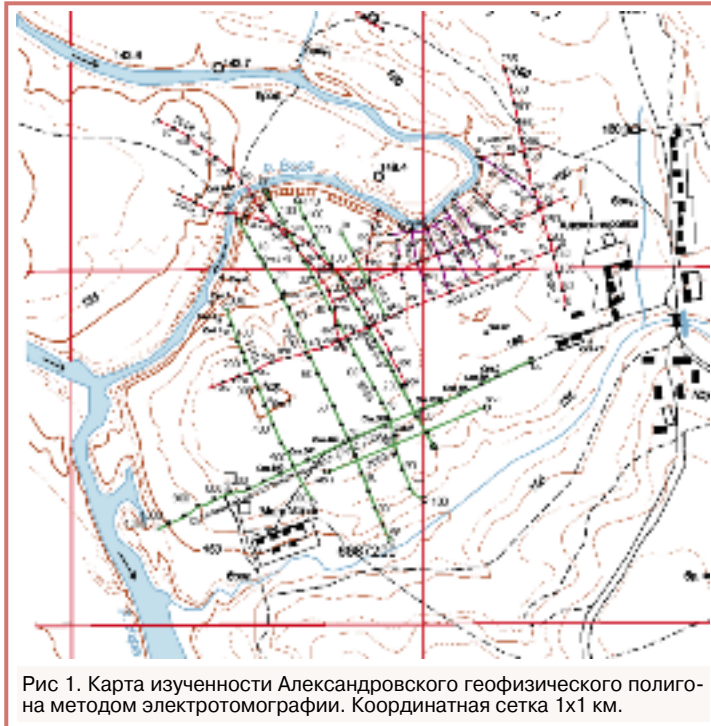


Рис 1. Карта изученности Александровского геофизического полигона методом электротомографии. Координатная сетка 1x1 км.

логические структуры оказываются достаточно сложными для геофизической и геологической интерпретации геофизических данных. Толща моренных суглинков оказалась неоднородной. В ней встречаются прослои песков и супесей. Возможно, эти отложения принадлежат к двум фазам московского оледенения. Внизу морены иногда встречаются глины, которые могут быть как среднеюрского возраста (по мнению проф. Алексеева А.С.), так и относиться к нижнему карбону. В целом кровля толщи нижнекарбонных оказалась достаточно неровной. Кроме того, рядом с современными руслами рек могут находиться палеорусла. Нельзя исключить и наличия тектонических нарушений, к которым могут быть приурочены долины рек. Таким образом, изучаемый разрез существенно отличается от одномерного.

На территории полигона пробурено более десятка неглубоких скважин (около 25 метров) и одна скважина глубиной 300 м. Данные бурения подтвердили наши предположения о сильной латеральной изменчивости верхней части изучаемого разреза.

Электротомография

В первые годы проведения геофизических наблюдений на Александровском полигоне для изучения верхней части разреза применяли классические вертикальные электрические зондирования с шагом 100-200 метров с последующей одномерной интерпретацией. Опыт показал, что при работах вблизи современных речных долин этот подход мало информативен. Даже сгущение шага наблюдений до 20 метров не дало результата из-за ограничений одномерной интерпретации для разрезов с быстрыми латеральными изменениями [Шевнин, Бобачев, 2009].

Переход от одномерной интерпретации к двумерной позволяет работать с моделями

РУБРИКА

ТЕМА НОМЕРА

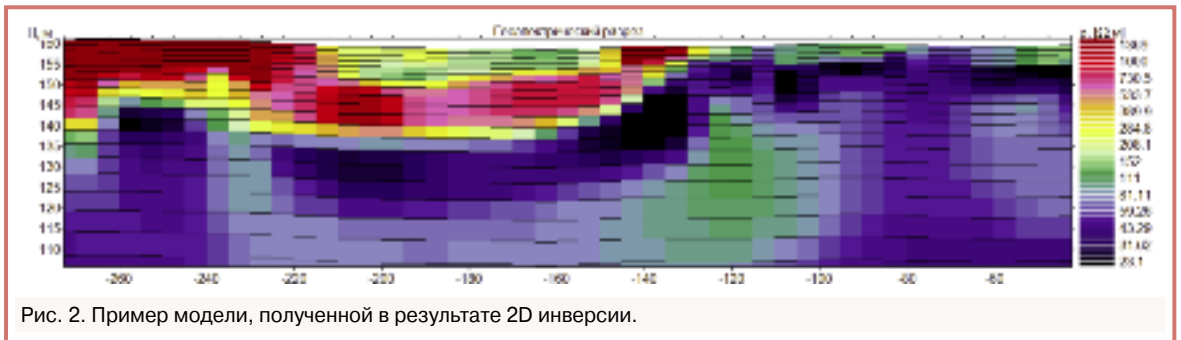


Рис. 2. Пример модели, полученной в результате 2D инверсии.

более адекватными геологической среде. Практическая двумерная интерпретация основана на двумерной инверсии данных (Loke and Barker, 1996). Она использует всю совокупность данных по профилю (матрицу данных) для получения единой геоэлектрической модели. Результат 2D инверсии - это модель геоэлектрического разреза (ГЭР), состоящая обычно из прямоугольных блоков небольшого размера (рис.2), размеры которых определяются методикой наблюдений: шагом по профилю и диапазоном разностей. Удельное сопротивление каждого блока определяется при решении обратной задачи. Как правило, подбирается гладкое распределение удельного сопротивления в разрезе. Поэтому результирующую модель показывают как непрерывное распределение сопротивлений в вертикальном разрезе, приписывая сопротивление каждого блока его центру. В этом случае нет явного выделения границ геологических объектов, которые можно лишь предполагать по положению зон максимальных градиентов.

Для устойчивой двумерной инверсии нужна высокая плотность наблюдений, что в свою очередь требует использования высокопроизводительной аппаратуры и специализированных

методик наблюдений. Такой комплекс, включающий в себя как методику полевых наблюдений, так и технологию обработки и интерпретации полевых данных, и позволяющий проводить двумерную интерпретацию получил название - электротомография [Бобачев и др., 2006]. На Западе он основывался на методике многоэлектродных зондирований [Griffiths, Barker, 1993]. В России к этой технологии были наиболее близки сплошные электрические зондирования [Бобачев и др., 1995].

В 2D моделях удельное сопротивление может меняться по горизонтали и вертикали разреза произвольно, что более адекватно отражает строение геологической среды. Также при расчете прямой и обратной задачи учитывается влияние рельефа профиля на измеренное кажущееся сопротивление. 2D инверсия в неоднородных средах дает более внятные результаты, которые нередко оказываются ближе к реальным геологическим ситуациям. Преимущества 2D инверсии перед традиционной одномерной интерпретацией привели к тому, что сегодня во всем мире большинство данных электрических зондирований получают и обрабатывают по электротомографической 2D технологии.

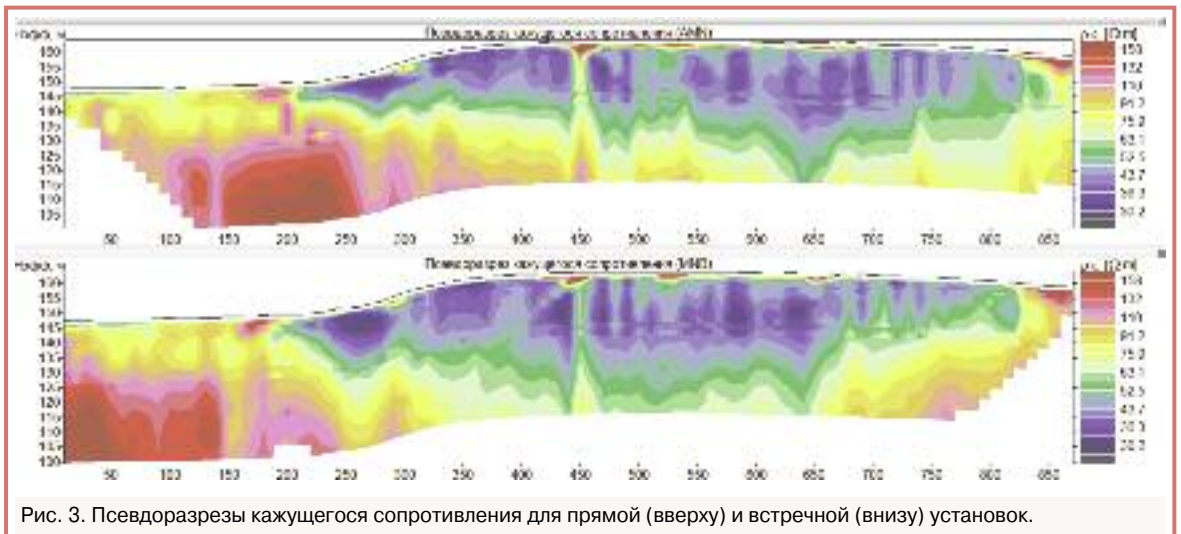


Рис. 3. Псевдоразрезы кажущегося сопротивления для прямой (вверху) и встречной (внизу) установок.

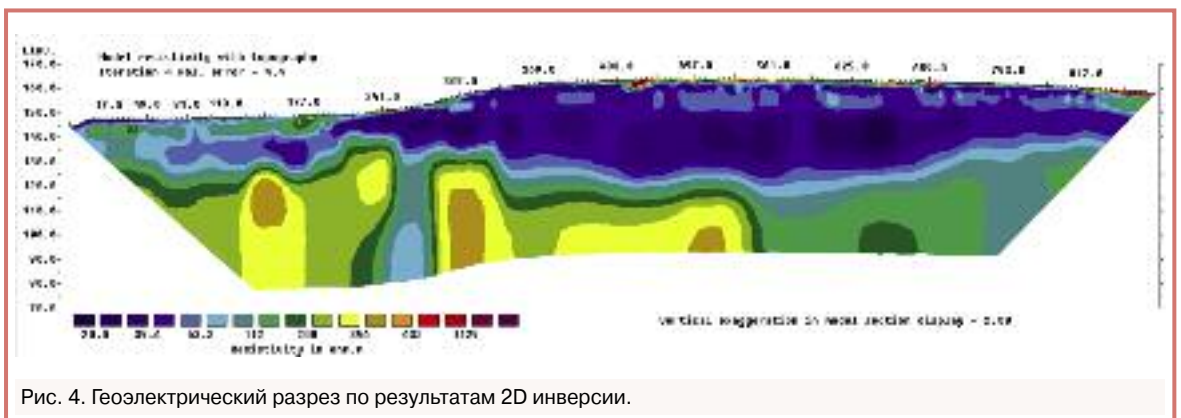


Рис. 4. Геоэлектрический разрез по результатам 2D инверсии.

Для достижения высокой скорости и плотности полевых измерений оптимальным является использование многоэлектродной аппаратуры. Однако раньше такая аппаратура нам была недоступна, поэтому работы проводились с обычной аппаратурой при адаптации сетки разносов

Электротомография с обычной аппаратурой

Рассмотрим результаты работ 2006 года. Для измерений мы использовали комбинированную трех электродную установку Шлюмберге с адаптированной сеткой разносов (табл. 1).

Таблица 1. Сетка разносов, адаптированная к электротомографии с шагом 2 м.

AB/2	3	4	5	7	9	11	15	19	25	35	45
MN	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
AB/2	45	55	55	65	75	85	95	105	115	125	
MN	14	2	14	14	14	14	14	14	14	14	

В такой сетке разносов выполняется условие $AM=nMN$, где n -целое число. Исключением является второй разнос ($AB/2=4$), который добавлен, чтобы уменьшить разрыв между первым и третьим разносами (3 и 5 м), характерный для многоэлектродных зондирований.

За один полевой день удавалось измерить 200-300 метров профиля с шагом между точками зондирования 10 метров. Это примерно 1000 измерений в день.

В результате работ по профилю, пересекающему террасу реки Воря (ПК0-250), получены псевдоразрезы кажущегося сопротивления представленные на рис. 3.

Псевдоразрезы построены в линейном вертикальном масштабе с учетом рельефа. Точка записи – центр приемного диполя. Отметим существенное различие между прямой и встречной установками в зонах резкого изменения кажущегося сопротивления (ПК150-300 и 750-850), что указывает на двумерность разреза на этих пикетах. В результате 2D инверсии по программе Res2dInv (Geotomo software, Малайзия) получился разрез, представленный на рис. 4.

В целом, геоэлектрический разрез, полученный по автоматической инверсии, хорошо согласуется с априорными данными. Высокоомное основание соответствует терригенно-карбонатной толще нижнего карбона. Вышележащий проводящий слой – это моренные суглинки с прослеживающимся прослоем песчаных пород (ПК 300-820). На террасе выделяется слой аллювиальных песков (ПК 10-180). Более детальный анализ результатов вызывает вопросы. В первую очередь непонятно насколько отвечает действительности кровля карбона. Её понижение в центре профиля может быть связано с завышенной мощностью суглинков из-за неправильно определенного их сопротивления. Наблюдаемая корреляция между рельефом и глубиной карбона выглядит странно. На ПК 260 в результате инверсии получилась вертикальная проводящая зона, существование которой маловероятно.

Электротомография с коммутацией приемных электродов (COMx64)

Электротомография с обычной аппаратурой оказалась достаточно трудоемкой. Необходимая высокая скорость измерений негативно сказывается на качестве результатов. Поэтому на кафедре геофизики был разработан коммутатор приемных



Рис. 5. Полевые работы с коммутатором COMx64 в комплекте с измерителем МЭРИ-24.

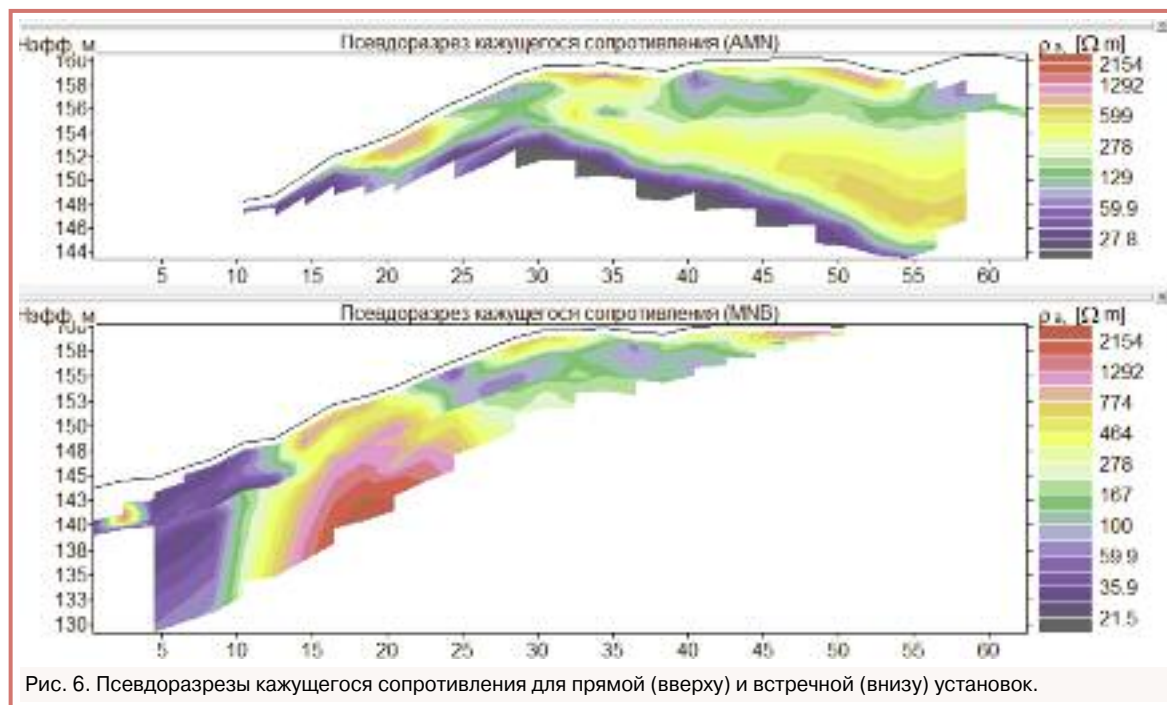


Рис. 6. Псевдоразрезы кажущегося сопротивления для прямой (вверху) и встречной (внизу) установок.

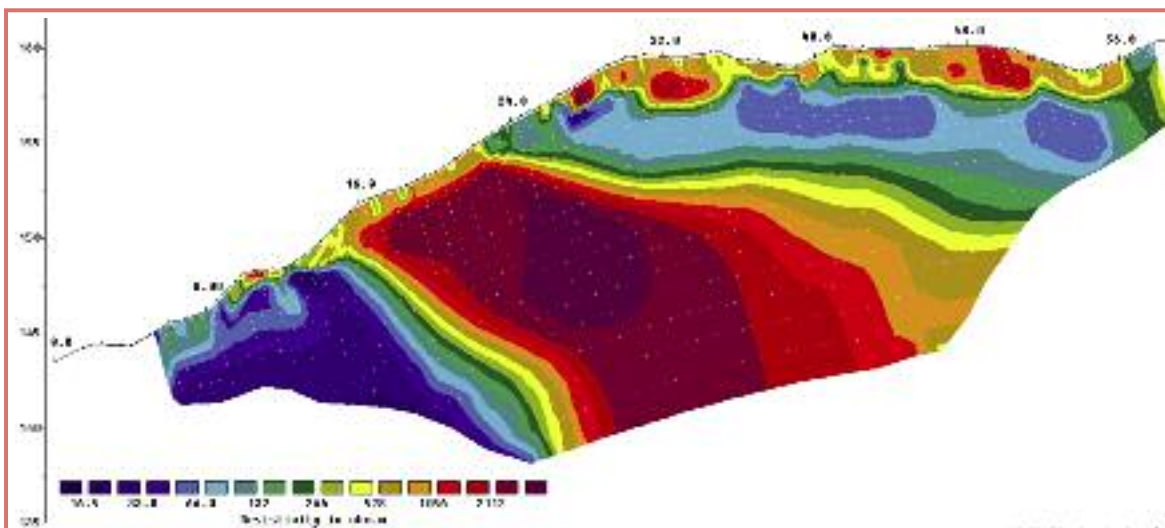


Рис. 7. Геоэлектрический разрез по результатам 2D инверсии (вертикальный масштаб равен горизонтальному).



Рис. 8. Полевые работы на зимней практике со станцией Syscal-Pro.

линий COMx64, работающий в комплексе с обычной аппаратурой (рис. 5) [Бобачев, Модин, 2008].

Идея предлагаемого подхода в том, что в процессе съемки коммутируются только приемные электроды, соединенные косой. Выбор рабочей пары приемных электродов обеспечивается программой, записанной в памяти интеллектуального коммутатора. Питаящий электрод переносится вручную. Для возбуждения и измерения электрического поля используется обычная электроразведочная аппаратура, применяемая в методе ВЭЗ (ЭРА-МАКС, ЭРП-1, МЭРИ-АСТРА). При этом предусматривается использование трех электродной установки Шлюбмерже. Тогда можно так организовать коммутацию, что при одном положении питающего электрода проводятся измерения для всех требуемых приемных диполей.

Использование коммутатора позволило повысить качество и эффективность полевых измерений. Неподвижность измерителя во

время измерений и разделение приемных и генераторных линий дало возможность проводить полевые работы в любую погоду. За один полевой день удавалось измерить 350-500 метров профиля с шагом между точками зондирования 3 метра и максимальным разносом АО=120 м. Получается 2000 - 3000 измерений в день.

С этим комплексом удалось провести исследования на крутом берегу р. Воря (крутизна склона превышает 30 градусов). Рассмотрим результаты по одному из коротких профилей детальных работ с шагом 1 м. На рис.6 представлены полевые разрезы кажущегося сопротивления.

Псевдоразрезы построены в линейном вертикальном масштабе с учетом рельефа. Резкий разрыв на псевдоразрезах кажущегося сопротивления на эффективной глубине примерно 6 м связан с изменением длины приемной линии. На первых разносах кажущееся сопротивление для обеих установок практически совпадает. На больших разносах высокоомная аномалия для встречной установки (MNB) соответствует резкому падению кажущегося сопротивления для прямой установки (AMN). В таких условиях проведение одномерной интерпретации практически невозможно.

На рисунке 7 показан результат автоматической 2D инверсии по этому профилю. Полученный мощный (около 5 м) высокоомный прослой соответствует сухим пескам, залегающим на границе между двумя слоями моренных суглинков. Ошибкой 2D инверсии является наклонное залегание этого слоя. Более вероятным представляется, что он залегает почти горизонтально.

Электротомография со станцией Syscal-Pro

Благодаря поддержке фирмы «Северо-Запад», удалось показать студентам и получить значительный объем данных с помощью современной 10-канальной многоэлектродной электроразведочной станции Syscal-Pro (Iris Instruments, Франция) (рис.8). 10-канальный измеритель позволяет добиться скорости до 200 измерений в минуту [Бобачев и др., 2006]. Таким образом, время полевых наблюдений с шагом 5 метров для одной расстановки составляет всего 30 минут. За один день можно отработать более 1-2 км, выполнив более 20000 измерений. Такая высокая скорость позволила не только резко увеличить объемы наблюдений, но и проводить сравнение различных методик и электроразведочных установок. Многоэлектродная аппаратура позволила также провести наблюдения по профилям, пересекающим русло р. Вори. В лет-

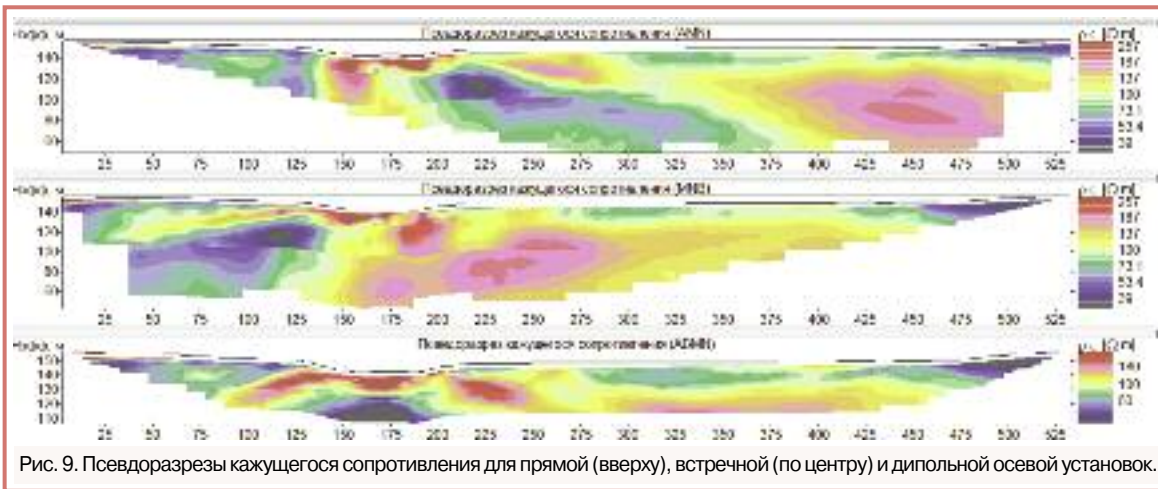


Рис. 9. Псевдоразрезы кажущегося сопротивления для прямой (вверху), встречной (по центру) и дипольной осевой установок.

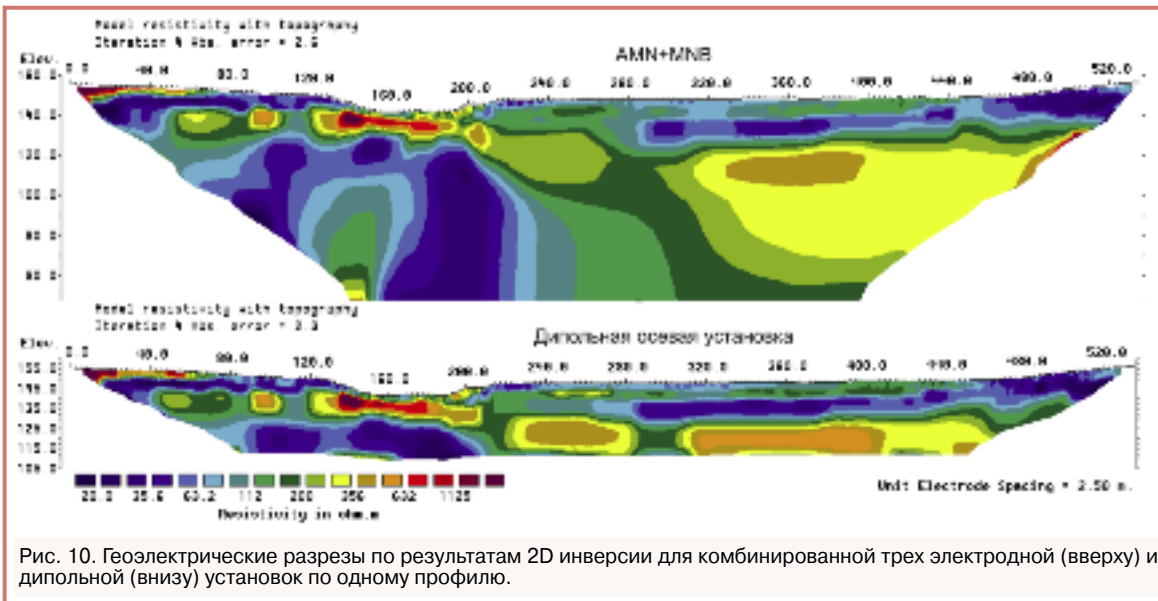


Рис. 10. Геоэлектрические разрезы по результатам 2D инверсии для комбинированной трех электродной (вверху) и дипольной (внизу) установок по одному профилю.

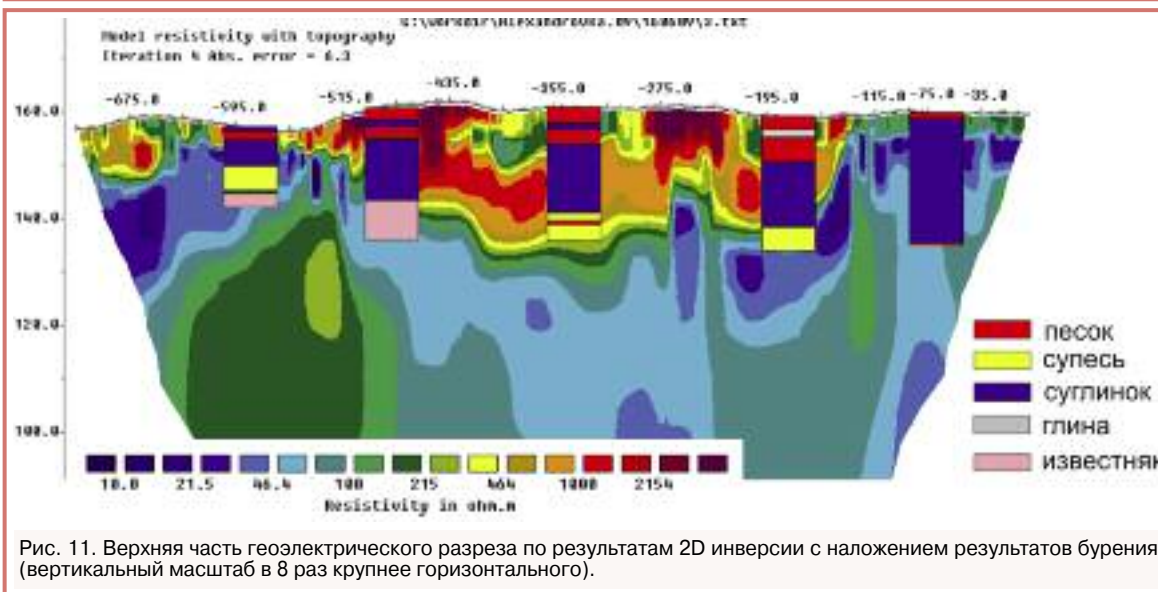


Рис. 11. Верхняя часть геоэлектрического разреза по результатам 2D инверсии с наложением результатов бурения (вертикальный масштаб в 8 раз крупнее горизонтального).

них условиях коса выкладывалась на дно реки (глубина реки на исследуемом участке до 1.5 м). Зимой во льду бурились лунки, через которые проводилось заземление электродов.

Рассмотрим результаты по участку профиля, пересекающего русло реки. Измерения проводились с тремя электроразведочными установками - прямая (AMN) и встречная (MNB) трех электродная установка Шлюмберже (максимальный разнос АО=250 м), плюс дипольная осевая установка (максимальный разнос ОО'=140 м) (рис. 9).

На псевдоразрезах кажущегося сопротивления видны резкие латеральные изменения кажущегося сопротивления, особенно вблизи русла реки (ПК 155-180). Одномерная интерпретация для таких данных практически не работает. Отметим также, что псевдоразрез для дипольной установки наиболее контрастный, что указывает на высокое разрешение этой установки для верхней части разреза.

На рисунке 10 показаны результаты автоматической 2D инверсии по этому профилю для двух



электроразведочных установок. Результаты, полученные на террасе р. Вори, похожи на геоэлектрический разрез по соседнему профилю (рис. 4). Блочный характер высокоомного слоя, соответствующего карбонатным отложениям, объясняется сложным характером кровли этого слоя. Вблизи русла получились субвертикальные структуры, несвойственные отложениям карбона. По-видимому, такой результат связан с эффектом экранирования на горизонте плотных известняков (удельное сопротивление более 500 Ом.м). Падение глубинности исследований под этим аномальным слоем и привело к раздуванию мощности нижележащих глинистых пород. Сравнение результатов по двум различным установкам показывает, что дипольная установка имеет более высокое разрешение и результаты с этой установкой более контрастные и четкие. Комбинирование этих двух установок позволяет повысить качество результатов. Резкая смена разреза на ПК 220 требует специального изучения.

Пример неблагоприятного геоэлектрического разреза

Летом 2009 г по одному из профилей электротомографии были пробурены пять скважин глубиной до 25 метров. Только в двух из них была вскрыта кровля известняков.

На рис. 11 результаты бурения наложены на геоэлектрический разрез. Очевидно плохое совпадение результатов 2D инверсии и бурения. На трех центральных скважинах бурение вскрыло суглинки на глубине 7-20 метров. По результатам инверсии на этих глубинах получились высокоомные пески. Такая ситуация нуждается в изучении и объяснении. Все эти скважины на глубинах примерно 4-7 метров прошли прослой песков. 2D инверсия раздула мощность этого слоя высокого сопротивления. Это результат неоднозначности интерпретации электрических зондирований.

На рис. 12 показан пример двух эквивалентных моделей с различным распределением удельного сопротивления. Модель, показанная зеленым цветом, отвечает результатам бурения, а синим – близка к результатам электротомографии. Алгоритм 2D инверсии основан на поиске решения в рамках гладких, наименее контрастных моделей. Это приводит к завышению мощности для высококонтрастных слоев. Более того, наличие таких высококонтрастных слоев приводит к эффекту экранирования. Высокоомный слой на глубине 35 м никак не проявляется на кривой ВЭЗ, хотя максимальный разнос $AB=300$ м.

Таким образом, мы получили пример геоэлектрического разреза, неблагоприятного для изучения методом сопротивлений в целом, в том числе и при использовании электротомографии. Для получения более адекватных геологических результатов в таких условиях необходим переход от полностью автоматической инверсии к 2D интерпретации, учитывающий априорные данные.

Заключение

Метод электротомографии завоевал весь мир и в последние годы все шире распространяется в России. Некоторое отставание с внедрением этой методики томографии в России было вызвано высокой стоимостью специализированного западного оборудования и отсутствием опыта. В последнее время ситуация стала меняться в лучшую сторону. Технология позволяет получать хорошие результаты там, где классический метод ВЭЗ практически неприменим. Применение современных измерительных комплексов повышает скорость и качество полевых измерений. Использование автоматической 2D инверсии предельно упрощает процесс интерпретации.

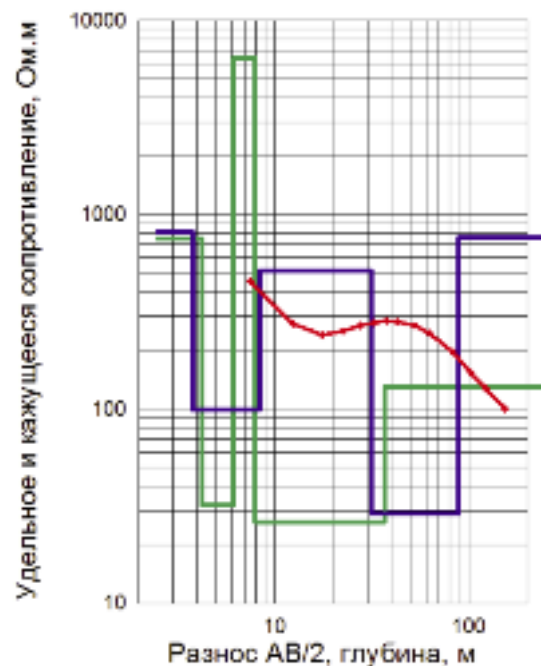


Рис. 12. Кривая ВЭЗ (красная) и две эквивалентные одномерные модели.

Однако, как и всякому другому геофизическому методу, электротомографии присущи свои недостатки и ограничения: падение разрешения с увеличением глубины исследования, существование эквивалентных моделей, проблема экранирования высококонтрастными горизонтами. Все это приводит к неоднозначности в интерпретации. Таким образом, результат 2D инверсии это всего лишь одно из возможных решений обратной задачи, далеко не всегда совпадающее с реальной геологией. В нашей работе мы на практических примерах постарались показать преимущества и недостатки электротомографии при изучении геологического строения Александровского геофизического полигона.

Литература

1. Бобачев А.А., Марченко М.Н., Модин И.Н., Перваго Е.В., Урусова А.В., Шевнин В.А. Новые подходы к электрическим зондированиям горизонтально-неоднородных сред. // Физика Земли. 1995 - N 12 - с.79-90.
2. Бобачев А. А., Горбунов А.А., Модин И.Н., Шевнин В.А.. Электротомография методом сопротивлений и вызванной поляризации. Приборы и системы разведочной геофизики. 2006, N02, 14-17.
3. Бобачев А.А., Модин И.Н. Электротомография со стандартными электроразведочными комплексами. Разведка и охрана недр. 2008, N1, 43-47.
4. Бобачев А.А. Модин И.Н., Шевнин В.А. Электроразведка на отделении геофизики геологического факультета МГУ. Журнал "Приборы и системы разведочной геофизики" 2009, N01, 26-28. 28.
5. Шевнин В.А., Бобачев А.А. 2D инверсия данных, полученных по обычной 1D технологии ВЭЗ. 13 стр. Опубликовано в электронном журнале Георазрез в выпуске №3-2009 (5).
6. Loke, M.H. and Barker, R.D.. 1996. Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudo-sections by a quasi-Newton method. Geophysical Prospecting, 44, 131-152.
7. Griffiths, D.H., Barker, R.D., 1993. Two-dimensional resistivity imaging and modelling in areas of complex geology. J. Appl. Geophysics 29, 211-226.