

ШЕВНИН В.А., БОБАЧЕВ А.А. КАФЕДРА ГЕОФИЗИКИ ГЕОЛОГИЧЕСКОГО Ф-ТА МГУ

Резюме

Электротомография (ЭТ) начала широко использоваться в малоглубинных изысканиях с середины 90-х годов 20 века и очень быстро распространилась на все страны мира. Некоторым препятствием к ее распространению является высокая стоимость аппаратуры и оборудования по сравнению с классическим методом сопротивлений. В работе показано, что можно выполнять ЭТ и без специальной аппаратуры, необходимо лишь программное обеспечение для инверсии. Одно время казалось, что ЭТ полностью вытесняет метод ВЭЗ, но и это не так. Во многих случаях возможно разумное сочетание 1D и 2D алгоритмов в процессе интерпретации результатов.

Введение

Метод ВЭЗ скоро отметит 100-летний юбилей. Большую часть этого периода преобладало использование модели 1D, на которую были настроены методика и интерпретация. Появление электротомографии (ЭТ) в середине 90-х годов 20 века принесло очень большие изменения в традиционный метод ВЭЗ, иногда излишнее увлечение ЭТ приводило к отбрасыванию всего накопленного наследия 1D. Опыт работы с ВЭЗ и ЭТ показал, что каждая из модификаций имеет свои плюсы и минусы, и что возможно использовать плюсы каждой методики. Для этого нужно попытаться облегчить переходы от одной модификации к другой. Ряд шагов для этого был предпринят авторами и их коллегами. В программу IPI (А.А.Бобачев) было встроено преобразование данных ВЭЗ к формату программы двумерной инверсии Res2DInv. Позднее появилась программа X2IPI (А.А.Бобачев), позволяющая данные ЭТ превратить в данные ВЭЗ (обе операции выполнялись при определенных ограничениях на тип данных). Определенную сложность представляло различие в методиках полевых измерений, но и это различие не является непреодолимым, и авторы предложили способы, как одни и те же данные можно использовать для 1D интерпретации и 2D инверсии.

На конференции ИнжГео в Геленджике уже был доклад на эту тему (Шевнин, 2009). После чего мы опубликовали развернутую статью в электронном журнале (2009). Не ставя под сомнение классическую методику электротомографии (ЭТ) (Бобачев, Модин, 2008), мы отмечаем ряд обстоятельств, ограничивающих применение ЭТ. Например, организация, выполняющая работы методом сопротивлений, может не иметь аппаратуры для ЭТ. Или эта аппаратура занята на других объектах, а доступна лишь традиционная аппаратура метода сопротивлений. В дополнение к предлагавшимся ранее способам ручных переключений электродов, размещенных заранее на профиле с линейным шагом, и интерполяции обычных кривых ВЭЗ к формату ЭТ (Шевнин, 2009), можно изменить разметку разносов на проводах для ВЭЗ, и выполнять измерения на новых разносах, чтобы получаемые результаты могли одновременно подвергаться 1D интерпретации и 2D инверсии. Такая разметка установки ВЭЗ была впервые реализована в полевых работах кафедры геофизики на объекте Холм Жирковский (2004) и начала применяться на учебной практике по электроразведке в д. Александровка Калужской области.

Чем отличаются методики ВЭЗ и ЭТ? В обоих случаях это зондирования. Различие заключается в том, что данные ВЭЗ ориентированы на 1D интерпретацию, а данные ЭТ на 2D инверсию. В первом случае каждая кривая ВЭЗ может интерпретироваться отдельно, в рамках своей 1D модели среды, хотя, как правило, делается увязка результатов ВЭЗ по профилю при построении геоэлектрического разреза с относительно выдержанными по профилю числом слоев, сопротивлениями и мощностями. Каждая кривая ВЭЗ измеряется на системе разносов возрастающих в геометрической прогрессии. Расстояния между точками ВЭЗ по профилю могут быть произвольными, хотя чаще используется равномерный шаг. В случае ЭТ измерения собирают с размещенных по профилю равноотстоящих электродов, то есть разносы возрастают с линейным шагом и шаг между зондированиями в ЭТ, как и длина MN, жестко увязан с расстоянием между электродами. Полученные данные для всего профиля и всех разносов подвергаются 2D инверсии, используя специализированную программу, например, Res2DInv (Loke, Barker, 1996). Модель разреза имеет вид сетки прямоугольных блоков, залегающих слоями, высота блоков в пределах каждого слоя и ширина блоков постоянна, а объектом определения в ходе инверсии служит лишь сопротивление каждого блока.

Новая разметка разностей ВЭЗ

Классическая сетка ВЭЗ с коэффициентом геометрической прогрессии $q=1.39$ (7 точек на декаду), показанная синим цветом на рис.1 имеет такие разности: 1.39; 1.93; 2.68, 3.72; 5.18; 7.20, 10; 13.9; 19.3; 26.8, 37.2; 51.8; 72.0, 100; 139 (отмечены символом **В**). Мы предлагаем использовать сетку разностей, которая внешне напоминает геометрическую прогрессию, но при этом является вариантом сетки разностей для ЭТ. Рассмотрим сетку, использованную на практике, и подходящую одновременно для ВЭЗ и ЭТ, она показана на рис.1 красными метками: 1.5; 2.5; 3.5; 5.5; 7.5; 9.5; 13.5; 17.5; 21.5; 29.5; 37.5; 45.5; 53.5; 61.5; 77.5; 93.5; 109.5 (отмечена символами **Т**); с 2 линиями MN 1 и 11 м, и воротами на 17.5 и 21.5 м. Для ЭТ расстояния между точками ВЭЗ должны быть жестко связаны с сеткой разностей, и должны быть кратны (в данном случае) 1 метру. Для данной сетки ВЭЗ-ЭТ шаг может быть, например, равен 20, 22, 25, 30 м. Если делать ЭТ со специализированной аппаратурой и косами, то шаг между зондированиями мог бы быть 1 м или 2 м, что в 10-20 раз чаще, чем для предлагаемой альтернативной методики. Нет препятствий для выполнения ВЭЗ с шагом 1 м и максимальными разностями 109.5 м, только вручную это будет очень медленно. Можно задаться шагом между электродами в 2 м, или 3 м, и для этого шага с помощью программы X2PI сформировать сетку разностей для ВЭЗ и ЭТ. Тогда расстояния между ВЭЗ должны быть кратны 2 или 3 м.

Основным параметром методики ЭТ является расстояние между электродами **a**. Для ВЭЗ этим параметром определяется минимальная длина линии MN. Расстояние между точками ВЭЗ должно быть кратно **a**. Чем меньше шаг по профилю, тем более надежными будут результаты 2D инверсии. В электротомографии этот шаг равен **a**. Длины MN и сетка разностей подбираются, чтобы все электроды попадали на виртуальную косу электродов с шагом **a**. Получим следующие формулы:

$$MN = (N + 1) \cdot a; AB = (N + 1) \cdot a, \text{ где } N - \text{целое число, начиная с } 0.$$

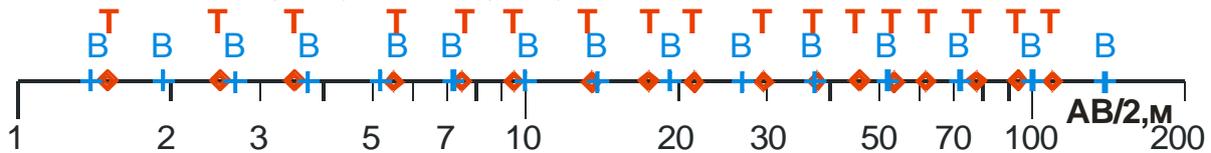


Рис.1. Синие метки - разности ВЭЗ с $q=1.39$, красные метки - новые разности ВЭЗ и ЭТ

Такая новая установка (Рис.1) позволяет удовлетворить требованиям как классического ВЭЗ и проводить 1D интерпретацию с IPI2Win (Электроразведка..., 1994), так и выполнять 2D инверсию с Res2DInv (Loke, Barker, 1996). Геофизик сам решает, какая методика интерпретации дает лучшие результаты, сравнение двух вариантов интерпретации в любом случае полезно. Сопоставляя результаты обоих подходов можно выявить места искажений кривых ВЭЗ, где 1D интерпретация дает заметные ошибки, понять плюсы и минусы обеих методик. К настоящему времени собраны примеры полевых работ, когда методика 1D вполне эффективна и достаточна, когда можно применять 1D и 2D методики, и когда лишь 2D дает геологический результат. Причем такие разные примеры, в частности, нами собраны на учебной практике, на участке размером 2*2 км.

Примеры работы на учебной практике в Александровке

Пример 1. Профиль "Плато" состоящий из 10 точек ВЭЗ с шагом 22 м располагался по профилю из 5 скважин, пробуренных в июне 2009 г. Скважины должны были встретить известняки, но из 5 скважин лишь две встретили известняки, что и заставило изучать данный профиль более детально.

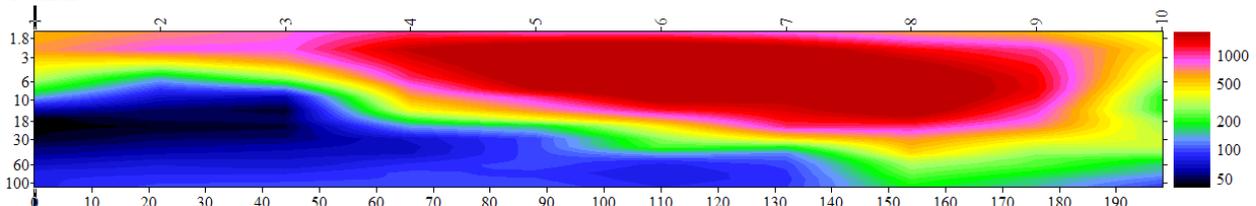


Рис.2. Псевдоразрез кажущихся сопротивлений по профилю Плато

Главной особенностью псевдоразреза по профилю Плато является примерно двухслойная модель (сверху видны флювиогляциальные пески высокого сопротивления, под ними моренные суглинки).

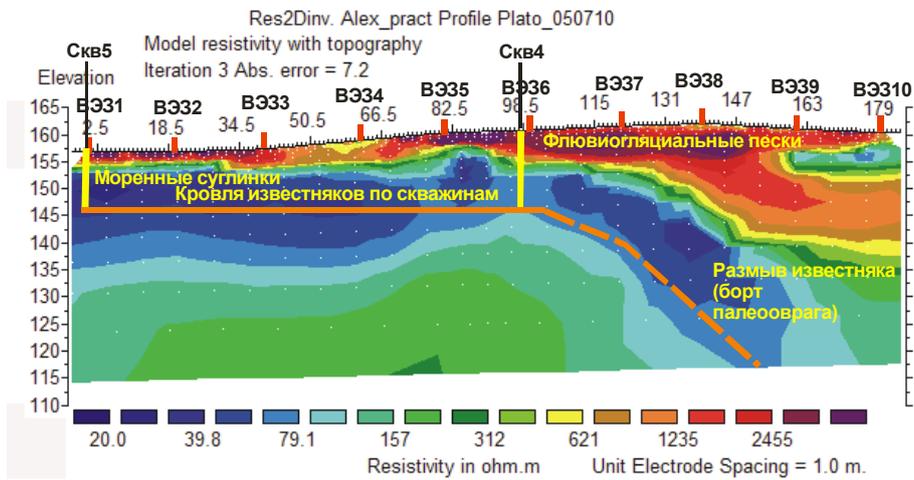


Рис.3. Геоэлектрический разрез по 2D инверсии данных с рис.1 с дополнительной информацией

2D инверсия (Рис.3) показывает наличие третьего слоя в геоэлектрическом разрезе - в левой части профиля видно тело высокого сопротивления - это известняки. По виду разреза можно предположить, что известняки в правой части профиля уходят на глубину недоступную для бурения или исчезают совсем (черный пунктир). Известняки выявлены скважинами 5 и 4, но не встречены в скв. 3. Глубина известняков по бурению 12-15 м, а по 2D инверсии они кажутся залегающими значительно глубже (25-40 м). Детальное изучение данных бурения и ЭТ показало, что модель разреза, включающая слой известняков, не трехслойная, а пятислойная (Рис.4), она включает два слоя песков и два слоя суглинков и в силу контраста сопротивлений такой разрез создает значительную макроанизотропию. В примере на рис. 4 коэффициент макроанизотропии равен 4.2. Модель построена для профиля проходящего вблизи городища, севернее нашего.

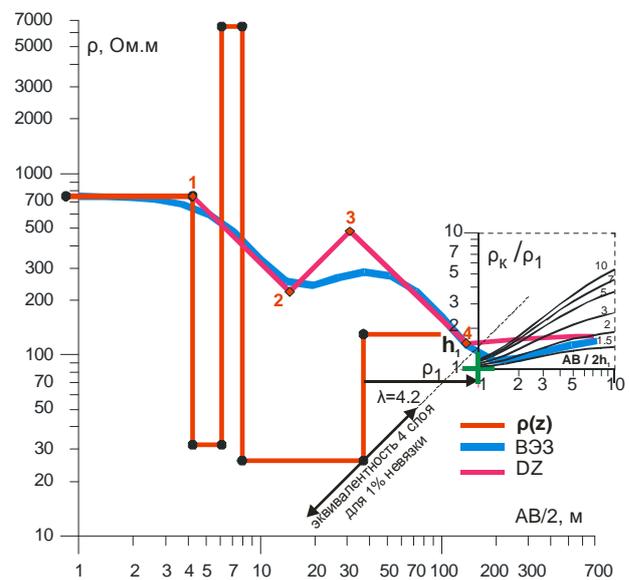


Рис. 4. Модель разреза для профиля Плато и кривые ВЭЗ и Дар-Заррук (ДЗ)

Учет модели разреза и априорной информации о глубине слоя известняков, а также о резком погружении известняков правее скв. 4, позволил получить геоэлектрический разрез по данным 1D интерпретации (Рис.5), удовлетворяющий всем сведениям о разрезе.

На профиле Плато 1D интерпретация позволила преодолеть проблему макроанизотропии. Но 2D инверсия дала идею модели разреза, в рамках которой уже была выполнена 1D интерпретация. Таким образом, оба подхода были одинаково полезны для формирования итоговой модели.

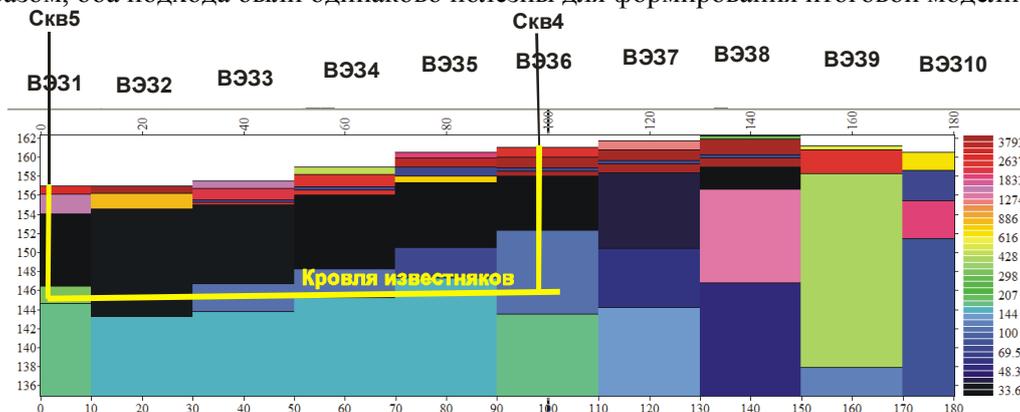


Рис.5. Геоэлектрический разрез по профилю Плато после 1D интерпретации с учетом данных бурения

Пример 2. Профиль вдоль дороги на Малое Устье, состоящий из 10 точек ВЭЗ с шагом 20 м, располагался по профилю бурения скважин (0, 50, 100 и 200 м) (Электроразведка..., 2005). На псевдоразрезе кажущихся сопротивлений (Рис.6), в отличие от профиля "Плато", более четко видны 3 слоя, причем нижний слой соответствует известнякам.

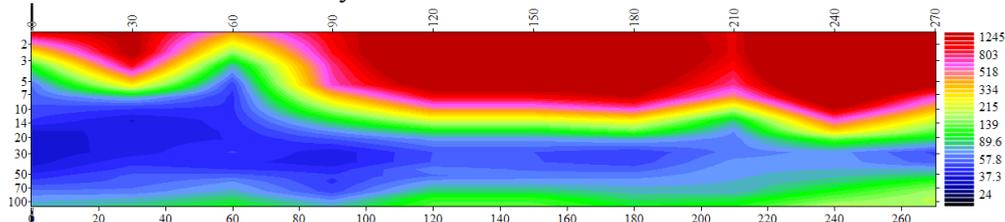


Рис.6. Псевдоразрез кажущихся сопротивлений по профилю на Малое Устье

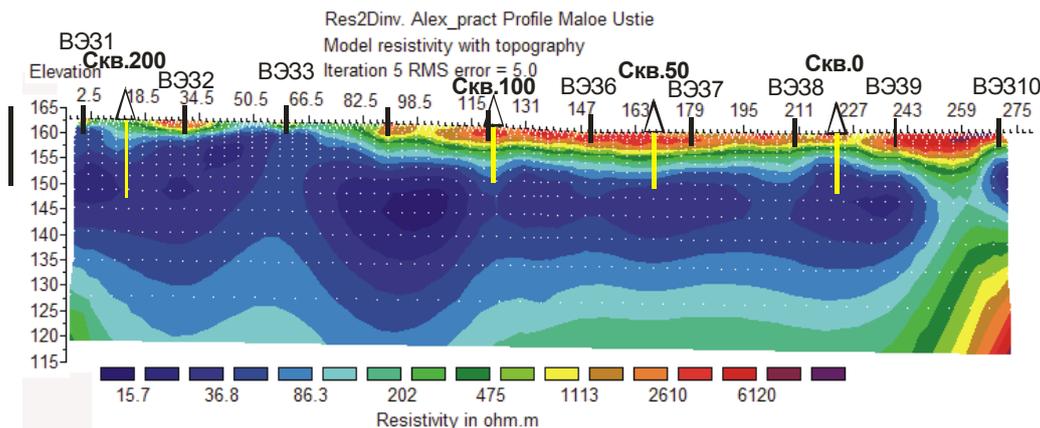


Рис.7. Геоэлектрический разрез по 2D инверсии данных с рис.6.

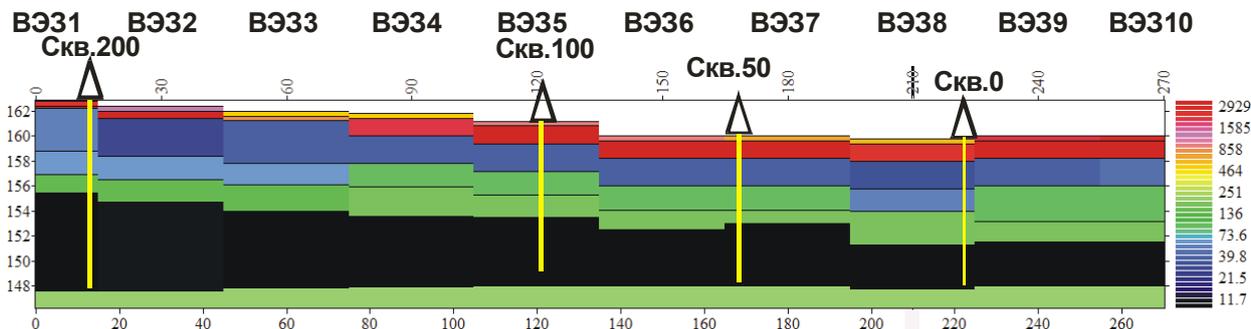


Рис.8. Геоэлектрический разрез после 1D интерпретации с учетом модели и глубины известняка

По модели разреза, показанной на рис.9 могут быть сделаны замечания. Откуда берется 7-слойная модель, если кривая по виду 4-слойная? Эта модель (Рис.9) задана по результатам бурения ближайшей к точке ВЭЗ скважины 50 и не противоречит остальным скважинам. Глубина по ВЭЗ и по скважине слоя известняков 12 м. Слой над известняком это глины. Верхние два слоя - флювиогляциальные пески, под ними моренные суглинки, и еще ниже - супеси.

В данном примере (Рис.8) один из вариантов геоэлектрического разреза получен с помощью 1D интерпретации и данных бурения. Роль 2D инверсии невелика. 2Д инверсия (Рис.7), выполненная без учета априорных

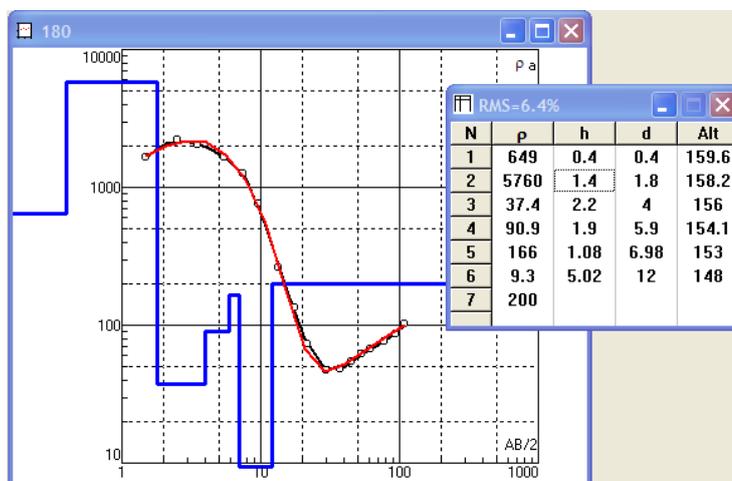


Рис.9. Кривая ВЭЗ на пикете 180 и модель разреза с учетом данных скважин. Точность интерпретации 6.4%, глубина кровли известняков 12 м.

данных, дает сильно заглаженный, искаженный влиянием макроанизотропии и малоинформативный результат.

Пример 3. Профиль Ю-С вдоль дороги на Инмезево, состоящий из 10 точек ВЭЗ с шагом 30 м и длиной 270 м, пройден вблизи 700 м профиля ранее выполненной ЭТ (Рис.10).

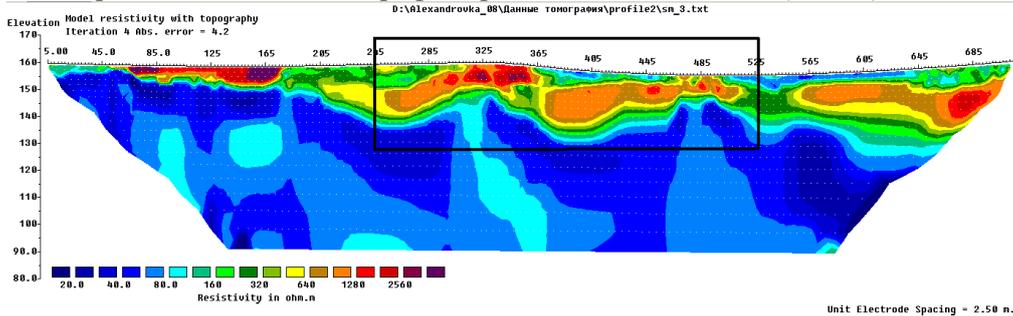


Рис.10. Геоэлектрический разрез после 2Д инверсии настоящей ЭТ с шагом электродов 5 м на профиле Ю-С. Черной рамкой отмечен участок детализации ВЭЗ.

Особенностью данного разреза является заметная изменчивость слоя флювиогляциальных песков по глубине, мощности и сопротивлению, над ними местами есть проводящие суглинки, а местами их нет. Близкое расположение к поверхности двух контрастных по свойствам типов пород сказалось на форме кривых ВЭЗ.

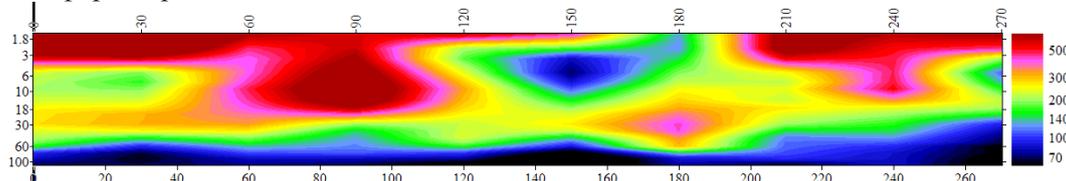


Рис.11. Разрез кажущихся сопротивлений по 10 ВЭЗ на 270 м участке профиля Ю-С.

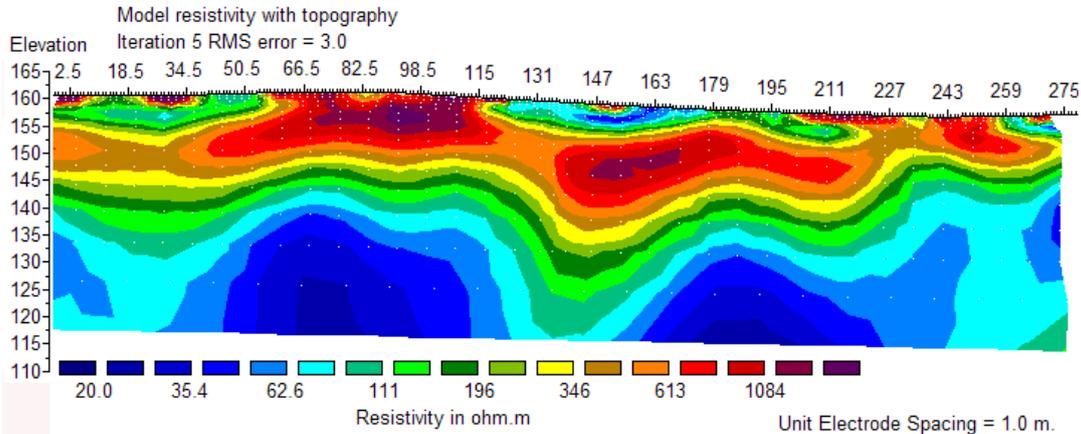


Рис.12. 2D геоэлектрический разрез на участке детализации профиля Ю-С.

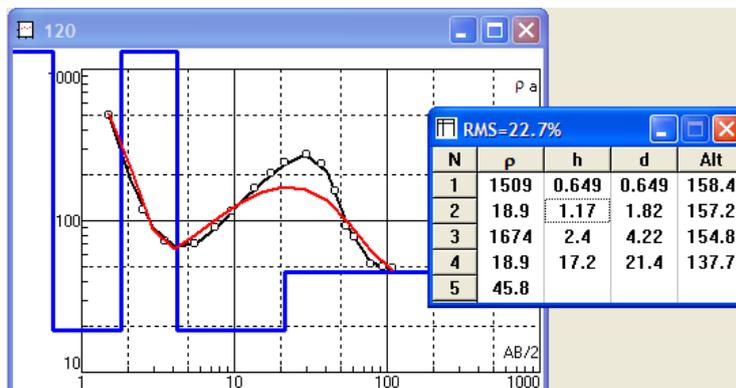


Рис.13. Кривая ВЭЗ типичная для профиля Ю-С плохо совмещаемая с 1D теоретической кривой, для таких данных нужна 2D инверсия.

Попытки провести 1D интерпретацию ВЭЗ по данному профилю оказались безуспешными, многие кривые сильно искажены неоднородностями разреза (Рис.13) и не совпадают с теоретическими кривыми для горизонтально-слоистой модели, а вот 2D инверсия выполняется успешно. Это как раз тот случай, когда 2D инверсия уместна и даже единственно возможна. Ее результат (Рис.12) похож на разрез нормальной ЭТ с шагом электродов 5 м. Конечно, разрежение сети в 5 раз не могло не сказаться на детальности разреза, но 2D инверсия данных 10 ВЭЗ воспроизвела разрез близко к разрезу классической ЭТ.

Выводы

Рассмотрены варианты электротомографии: методики, которая широко используется во многих странах мира, но для которой аппаратура и оборудование стоят довольно дорого, и в некоторых случаях, может быть временно, без них можно обойтись.

Предложена методика выбора разносов ВЭЗ по протоколу ЭТ, позволяющая получать данные одинаково подходящие для 1D интерпретации и 2D инверсии. Опыт применения такой установки показал ее полезность. Очевидно, что не стоит списывать со счетов 1D интерпретацию, а вот использовать обе методики 1D и 2D, выбирая каждый раз наилучший результат, может быть полезно.

В некоторых случаях автоматическая 2D инверсия дает идею геологического строения для последующей 1D интерпретации с опорой на данные скважин, что необходимо для преодоления сильного влияния макроанизотропии, в других случаях 1D интерпретация неприменима из-за высокой степени неоднородности разреза и искажений кривых ВЭЗ, но уже полученные измерения не требуется переделывать, они одинаково подходят для пробы 1D интерпретации и 2D инверсии.

Опыт работы с 2D инверсией ВЭЗ может помочь в переходе к настоящей электротомографии.

Если выполняются большие объемы наблюдений, то нужно думать о приобретении нормальной аппаратуры и оборудования ЭТ, только в таком случае можно с высокой скоростью собирать большие объемы данных. Эти данные в основном подвергаются 2D инверсии, но в отдельных случаях могут быть проинтерпретированы и в рамках 1D моделей.

Ссылки

Бобачев А.А., Модин И.Н. Электротомография со стандартными электроразведочными комплексами. Разведка и охрана недр. 2008, N1, 43-47.

Шевнин В.А., 2D инверсия данных, полученных по обычной 1D технологии ВЭЗ. 5-я Международная научно-практическая конференция «Инженерная геофизика-2009», Геленджик, 2с.

Шевнин В.А., Бобачев А.А. 2D инверсия данных, полученных по обычной 1D технологии ВЭЗ. 14 стр. Опубликовано в электронном журнале Георазрез в выпуске №3-2009:

http://georazrez.uni-dubna.ru/articles/2009/3-5/shevnin-2d_inversiya_dannykh_po_vezh.pdf.

Электроразведка методом сопротивлений. / Под ред. В.К.Хмелевского и В.А.Шевнина. М., изд. МГУ, 1994 г., 160 с.

Электроразведка: пособие по электроразведочной практике для студентов геофизических специальностей. Под редакцией проф. В.К. Хмелевского, доц. И.Н. Модина, доц. А.Г. Яковлева – М.: 2005. - 311 стр.

Loke, M.H. and Barker, R.D., 1996. Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections using a quasi-Newton method. Geophysical Prospecting, 44, 131-152.

Контактная информация

Шевнин Владимир Алексеевич, shevning@rambler.ru;

Бобачев Алексей Анатольевич bobachev@rambler.ru