

Шевнин В.А., Бобачев А.А., Модин И.Н., Ялов Т.В.

МГУ им. М.В.Ломоносова, Геологический факультет, каф. Геофизики

РАСХОЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ГАЛЬВАНИЧЕСКИХ И ИНДУКЦИОННЫХ МЕТОДОВ НА ПРАКТИКЕ ПО ЭЛЕКТРОРАЗВЕДКЕ В АЛЕКСАНДРОВКЕ

Обсуждается проблема заметных различий данных электропрофилирования методом дипольного индуктивного профилирования (ДИП) и метода бесконтактного измерения электрического поля (БИЭП), а также вертикального электрического зондирования (ВЭЗ). Показано, что различия вызваны использованием индуктивной (ДИП, ЗСБ) и гальванической (БИЭП, ВЭЗ) компонент поля у разных методов. Причиной различий является высокая степень макроанизотропии разреза, вызванная переслаиванием двух контрастных слоев - моренных суглинков (40 Ом.м) и флювиогляциальных песков (5000 Ом.м). Учет макроанизотропии необходим для более точной количественной интерпретации ВЭЗ, а сведения о макроанизотропии при отсутствии скважин можно получить из сравнения ДИП и БИЭП.

Введение

Расхождение результатов на практике в Александровке отмечается у таких методов, как вертикальное электрическое зондирование (ВЭЗ), зондирование становлением поля в ближней зоне (ЗСБ), электропрофилирование (ЭП), бесконтактное измерение электрического поля (БИЭП), дипольное индуктивное профилирование (ДИП). Связано это не с ошибками в применении перечисленных методов, а с особенностями геологического строения района практики. Например, такой особенностью строения является наличие ледниковых отложений, включающих практически повсеместно моренные суглинки (40 Ом.м), сочетаемые местами с отложениями флювиогляциальных песков (5000 Ом.м). Необычно высокий контраст двух слоев в верхней части разреза, залегающих почти горизонтально, и приводит к различию результатов гальванических и индукционных методов электроразведки.

Обсуждение проблемы

Материалы по этой теме применительно к ВЭЗ и ЗСБ были представлены в докладе на конференции ИнжГео-2011 (Иванов и др., 2011).

Авторы объясняют расхождение результатов ВЭЗ и ЗСБ использованием этими методами разных составляющих электромагнитного поля (ЭМП): ВЭЗ использует гальваническую моду и ЗСБ - индукционную. В методе ВЭЗ, использующим гальваническую составляющую, действующим сопротивлением слоистого разреза является *среднее квадратичное сопротивление* $\rho_m = \sqrt{\rho_n \cdot \rho_l}$, где ρ_l - продольное, а ρ_n -

поперечное сопротивление слоистой толщи. В методе ЗСБ, использующим индукционную составляющую, действующим сопротивлением слоистого разреза является *продольное сопротивление* ρ_l . Аналогичные соображения были ранее высказаны в пособии по Александровской практике (2005) и еще ранее в книге Л.Л. Ваньяна (1965).

Трехлетний опыт применения метода ДИП с аппаратурой ЕМ-34-3XL (Geonics) на Александровской практике выявил некоторые видимые особенности метода, требующие дополнительного изучения.

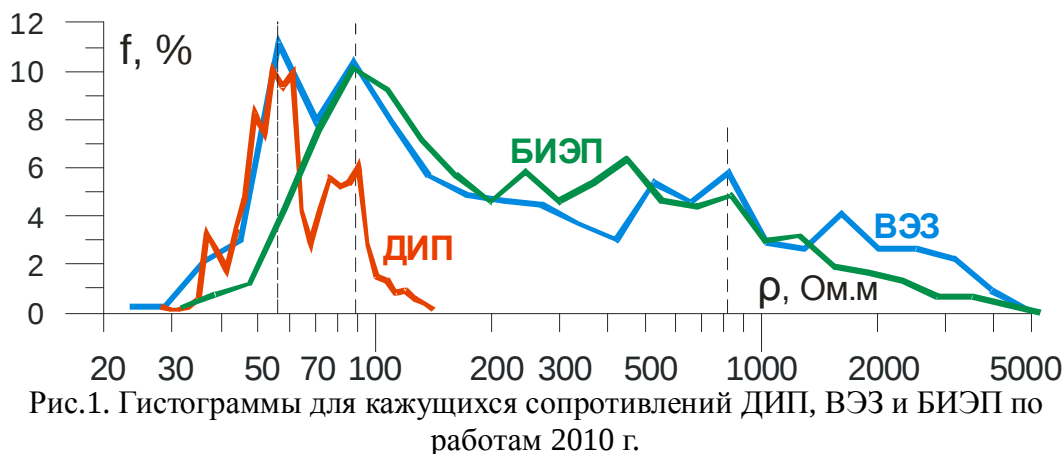


Рис.1. Гистограммы для кажущихся сопротивлений ДИП, ВЭЗ и БИЭП по работам 2010 г.

Гистограммы ρ_k на рис.1 в компактной форме показывают различия гальванических методов сопротивлений (в данном случае ВЭЗ и БИЭП) и индукционного - ДИП. Гистограммы построены по результатам измерений 2010 г., для каждого метода использовано от 600 до 900 точек измерений, взятых примерно с одной площади. Нужно подчеркнуть, что все методы изучали однотипные разрезы слоистой толщи четвертичных отложений. Казалось бы, что и гистограммы должны быть сходными, но этого не происходит. В левой части гистограммы ДИП и ВЭЗ показывают очень похожие распределения, БИЭП от них мало отличается, а гистограммы в правой части резко различаются: гистограмма ДИП заканчивается на 130 Ом.м, а гистограммы ВЭЗ и БИЭП на 5000 Ом.м.

В работе (Шевнин, Бобачев, 2011) было показано, что геоэлектрический разрез района практики отличается сильной макроанизотропией горизонтально-слоистой толщи ледниковых отложений, сложенных флювиогляциальными песками (ρ - 5000 Ом.м) и моренными суглинками (ρ - 40 Ом.м). Рассмотрим далее несколько примеров.

Пример 1. Профиль "Плато"

На профиле "Плато" состоящем из 10 ВЭЗ с шагом 20 м рассмотрим это проявление макроанизотропии. Результаты ВЭЗ показаны в виде геоэлектрических разрезов после 2D

инверсии и 1D интерпретации с учетом результатов бурения (Рис.2,3). По данным скважин известна глубина кровли известняков карбона, число слоев в разрезе, их мощности и литология, по которой задается сопротивление каждого слоя, а потом в процессе подбора эти сопротивления уточняются. Таким образом, для каждой из 10 точек ВЭЗ получены модели разреза, по которым можно рассчитать интегральные параметры разреза, включая ρ_m и ρ_l (формулы 1) и коэффициент макроанизотропии (рис.4, кривая 1).

$$\rho_L = \frac{H_\Sigma}{S_\Sigma}, \quad \rho_M = \sqrt{\frac{T_\Sigma}{S_\Sigma}}, \quad \rho_N = \rho_M \cdot \lambda, \quad \lambda = \rho_M / \rho_L, \quad H_{Macro} = H_\Sigma \cdot \lambda \quad (1)$$

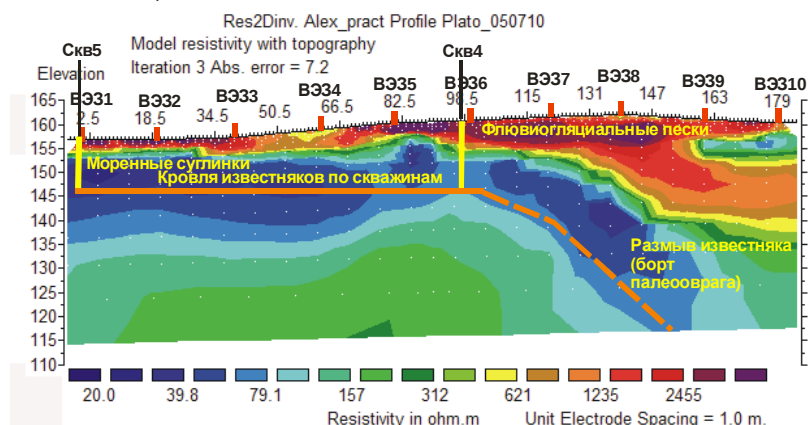


Рис.2. Геоэлектрический разрез по 2D инверсии данных профиля Плато

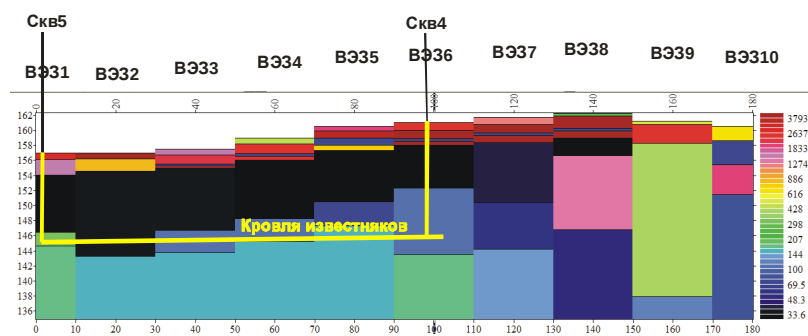


Рис.3. Геоэлектрический разрез 1D по профилю Плато после интерпретации с учетом данных бурения

Пример модели разреза по ВЭЗ 80 м вблизи Александровского городища на профиле у скважины N4 2009 г.

Таблица 1. Расчет обобщенных параметров по модели ВЭЗ у скв. N4, Профиль "Плато".

Rho	h						
1917	0.562						
3584	1.01						
74.8	0.879						
779	0.714						
18.2	6.84						
75.9	3.17						
157							
H_sum	S_sum	T_sum	Rho_L	Rho_m	Lam	Rho_n	H_macro
13.175	0.43	5684.24	30.6	115	3.7	431	49.5

Обращает на себя внимание резкое отличие сопротивлений ρ_l и ρ_m (30 и 115 Ом.м) и высокое значение их отношения ρ_m/ρ_l (коэффициента макроанизотропии $\lambda_{\text{Макро}}$), завышающее глубину до слоя известняков при интерпретации без использования априорной информации почти в 4 раза (13 и 49 м) (Таб. 1).

Зная модели разреза в каждой точке профиля "Плато", можно рассчитать по этим моделям теоретические кривые ВЭЗ и кажущееся сопротивление для метода ДИП (с установкой ДИП с горизонтальными диполями и разномом рамок 20 м - 20Н). Для расчета ρ_k ДИП использовалась программа Freq_EM (www.geoelectric.org). С теоретических кривых ВЭЗ, совпадающих с полевыми, снимались значения ρ_k для разноса 37.5 м, а проводимость ДИП пересчитывалась в кажущееся сопротивление (для горизонтальных диполей на разноте 20 м (20Н), глубина - 15 м). Первое кажущееся сопротивление согласно теории метода сопротивлений близко к ρ_m , а второе к ρ_l .

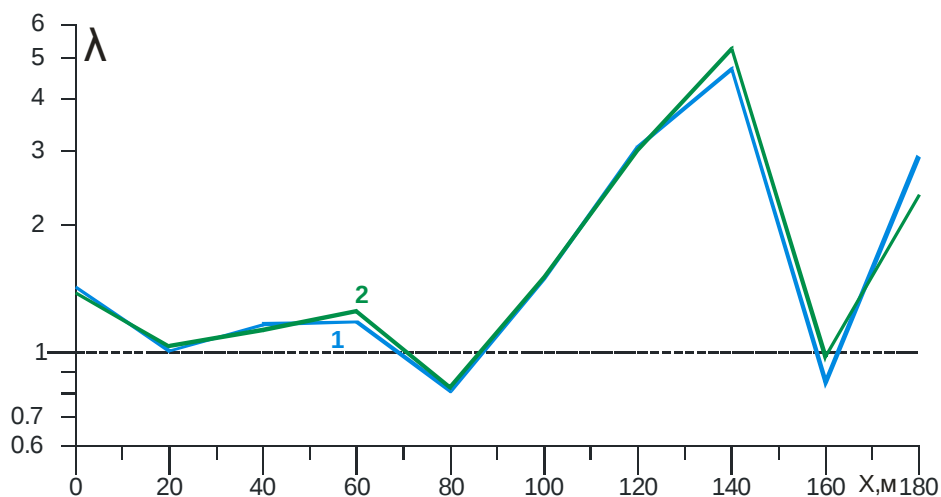


Рис.4. Графики отношения сопротивлений 1 и 2 по профилю Плато

По отношению ρ_m/ρ_l по ВЭЗ (рис.4, кривая 1) и отношению ρ_k для разноса 37.5 м ВЭЗ и разноса 20 м ДИП (рис.4, кривая 2) посчитаны значения $\lambda_{\text{Макро}}$. Совпадение этих кривых показывает, что ρ_k ДИП действительно близко к ρ_l , а ρ_k ВЭЗ к ρ_m . Почему

отношение сопротивлений резко возрастает на пикетах 100-150. Потому что, судя по рис.2, в этой части профиля растет мощность флювиогляциальных песков высокого сопротивления от малых долей метра до 1-2 м, что резко увеличивает ρ_m и слабо влияет на ρ_l (См. рис.5). Разнос 37.5 м взят потому, что на базе практики выполнен большой объем бесконтактного электропрофилирования (БИЭП) с аппаратурой ЭРА со стелящимися линиями на таком действующем разнесе, и по этим же профилям есть результаты ДИП. Глубинность БИЭП на разнесе 37.5 м близка к глубинности ДИП на разнесе 20 м (15 м).

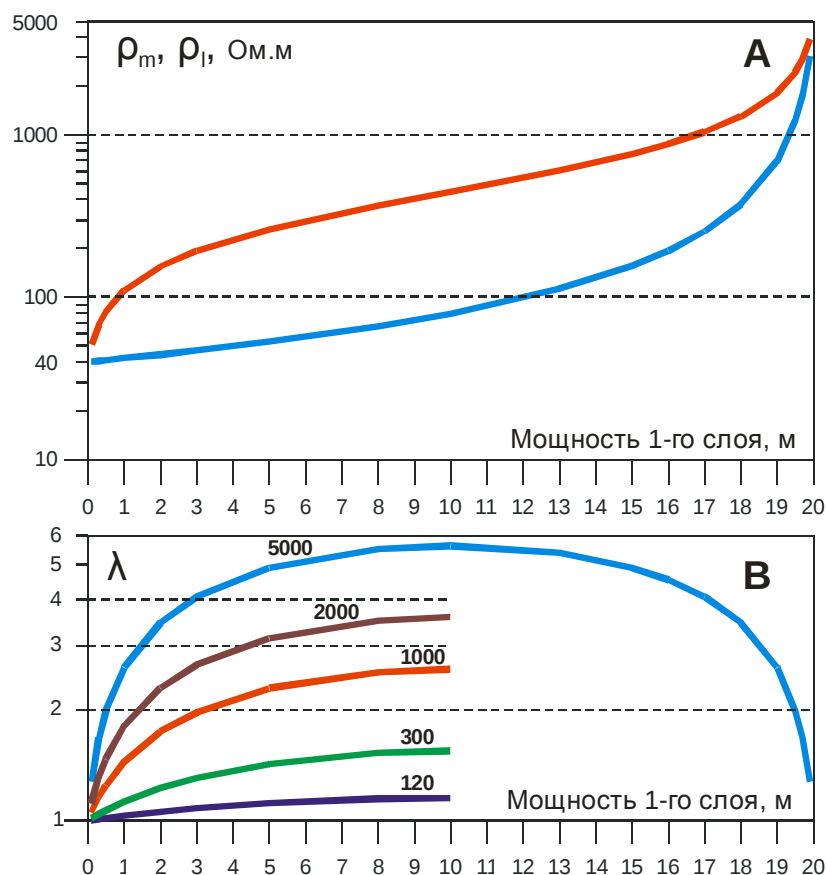


Рис.5. А - Расчетные графики сопротивлений ρ_m (красный) и ρ_l (синий) для 20 м толщи из слоев 5000 и 40 Ом.м при переменной мощности первого слоя. В - Графики $\lambda_{\text{Макро}}$. Цифры на кривых - значение ρ_2 от 120 до 5000 Ом.м.

На рис.5 представлен результат теоретического расчета ρ_m и ρ_l для 20 м толщи из двух слоев с сопротивлением 5000 Ом.м (флювиогляциальные пески) и 40 Ом.м (моренные суглинки), типичных для Александровской практики. Общая мощность толщи из двух слоев фиксирована на 20 м (больше глубины ДИП-20Н и БИЭП-37), а мощность песков меняется от 0.1 м до 19.9 м. При мощности песков от 0.1 м до 6 м (типичная ситуация на практике) ρ_m растет быстрее ρ_l , и возрастает их отношение $\lambda_{\text{Макро}}$. При мощности песков от 0.5 до 10 м $\lambda_{\text{Макро}}$ меняется от 2 до 5.6. Максимальное значение $\lambda_{\text{Макро}}$ получается при равных мощностях слоев песков и суглинков.

Пример 2. Сравнение разных видов ЭП

В 2009 году было выполнено электропрофилирование по одному профилю скважин 2009 года на Александровском плато методами ДИП, дипольного осевого профилирования (ДОП) и БИЭП с разными разносами и глубинами изучения.

Это было сделано для сравнения разных вариантов ЭП, оценки возможностей ДИП и выбора оптимальной установки ДИП для условий Александровского плато.

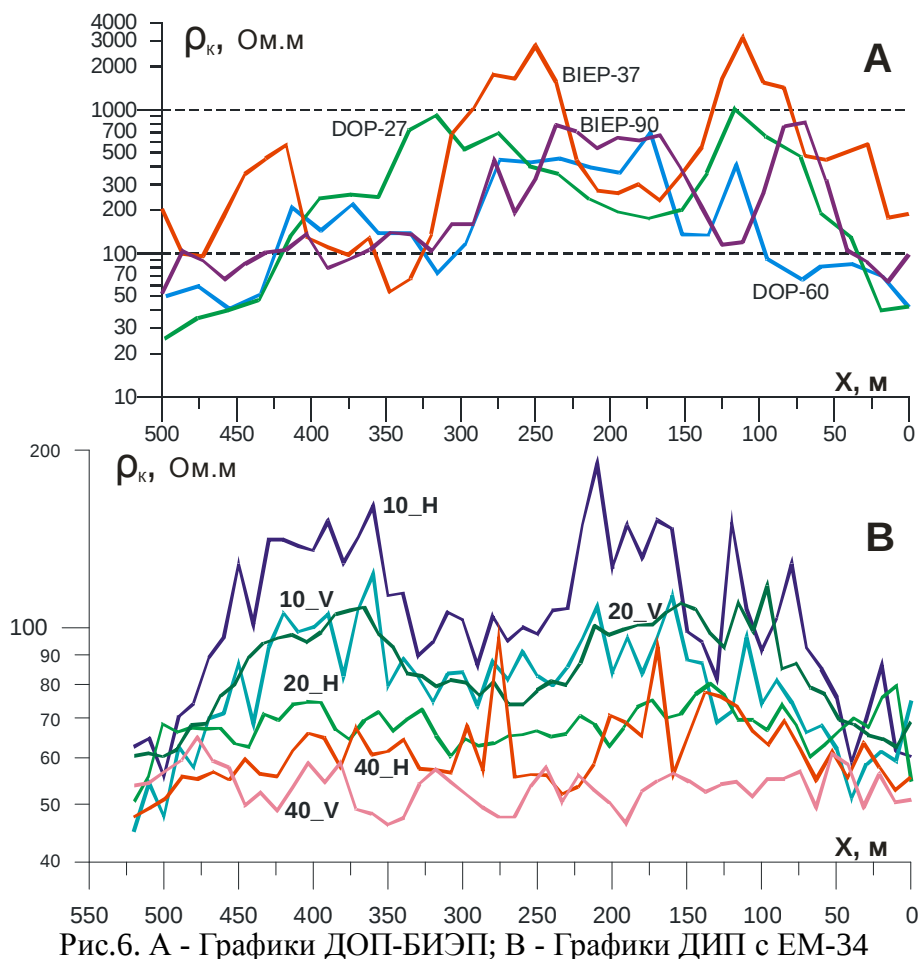


Рис.6. А - Графики ДОП-БИЭП; В - Графики ДИП с ЕМ-34

Профиль сравнения для разных установок (Рис.6) идет по линии скважин 2009, от скважины 1 на востоке ($X=0$) до скважины 5 ($X=500$). Графики на рис.6, А имеют отметки вида ЭП (ДОП или БИЭП) и разноса установки (от 27 до 90 м). Графики ДИП на рис.6, В также имеют отметки разноса и ориентации диполей: Н- горизонтальная и V - вертикальная. Применяя к каждому из 10 графиков на рис.6 статистическую обработку были определены средние геометрические значения сопротивлений и стандартные отклонения логарифмов сопротивлений (Рис.7).

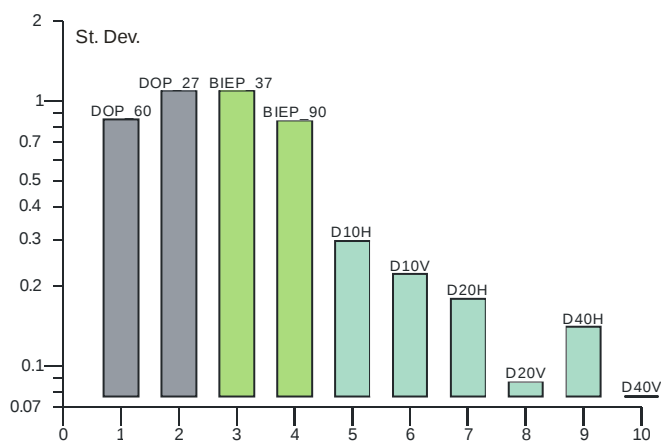


Рис.7. Диаграмма стандартных отклонений для разных установок ЭП (ДОП, БИЭП, ДИП)

Обращает на себя внимание заметное снижение дисперсии для ДИП (5-10), по сравнению с ЭП (1-4), из всех ДИП наибольшая дисперсия у установки 10Н (у всех Н она больше, чем у соответствующих V). Дисперсия 10Н выше, чем 20Н в 1.65 раза, а у 20Н выше, чем 40Н в 1.29 раза. Интересно отметить, что при одинаковой глубинности установок 20V и 40Н равной 30 м (McNeil, 1980) дисперсия второй (0.14) в 1.6 раза больше, чем первой (0.087). Эта разница связана с разной чувствительностью ДИП с горизонтальными и вертикальными диполями (McNeil, 1980) к верхней части разреза. На рис.8 показаны графики, взятые из работы Мак Нейла (1980), наглядно демонстрирующие различия в чувствительности установок ДИП с горизонтальными и вертикальными диполями к верхней части разреза. Для горизонтальных диполей чувствительность возрастает вплоть до поверхности земли, а для вертикальных диполей вблизи поверхности она падает до нуля. Максимальное различие для 20V и 40Н существует до 1/4 глубины, т.е. до $30/4=7.5$ м. Флювиогляциальные пески (5000 Ом.м) имеют мощность в районе практики не более 6-8 м и залегают вблизи поверхности на моренных суглинках (40 Ом.м). Это две самые контрастные породы, которые и влияют на показания ДИП.

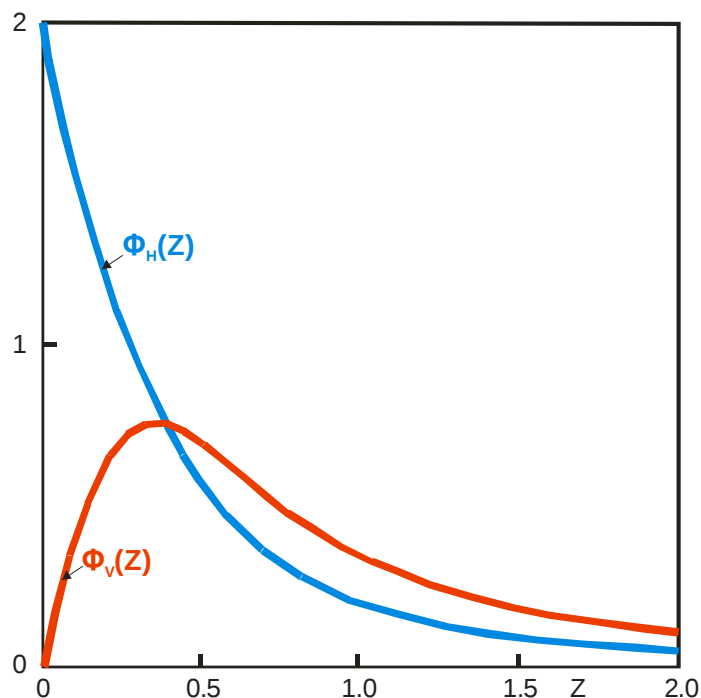


Рис.8. Сравнение относительной чувствительности вертикальных и горизонтальных диполей к ВЧР (по McNeil, 1980).

Глубинность установки ДИП-10Н - 7.5 м, что лучше соответствует максимально возможной мощности слоя песков, поэтому эта установка показывает максимальную дисперсию (Рис.7).

Средние геометрические значения сопротивлений использовались для расчета отношений средних для разных пар установок (рис.9). Подобные отношения сопротивлений (гальванического метода к индукционному) можно рассматривать как проявление макроанизотропии (хотя и на фоне несколько разной глубинности). Код каждого столбца на рис.9 - отношения ρ_k двух установок в соответствии с их номерами, использованными на рис.7. Если рассмотреть отношение 3/7 (БИЭП-37/ДИП - Н20) и 3/5 (БИЭП-37/ДИП - Н10), то отношение глубинностей двух методов будет $9/15=0.6$ и $9/7.5=1.2$ со средним отношением сопротивлений 4 (4.5 и 3.7).

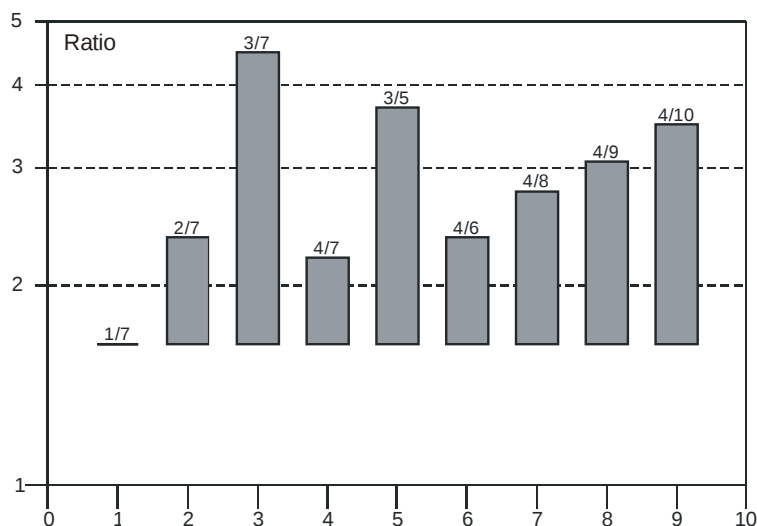


Рис.9. Диаграмма отношений средних сопротивлений разных установок. Номера соответствуют рис.7.

Аппаратура ДИП ЕМ-34 имеет три диапазона проводимостей, выбираемых оператором: 10, 100 и 1000 мСим/м (миллисименс на метр, где Сим = 1/Ом) (это максимальные значения в каждом диапазоне). Учитывая, что отсчет проводимости записывается прибором в виде 2-3 значащих цифр, каждому диапазону проводимостей можно поставить в соответствие интервал сопротивлений, а именно: диапазон 1000



Рис.10. Карта сопротивлений БИЭП 37 м на топооснове. Синий цвет шкалы сопротивлений - суглинки, желтый и красный - пески.

мСим/м - соответствует сопротивлениям от 1 до 50 Ом.м; 100 мСим/м - от 10 до 500 Ом.м и 10 мСим/м - от 100 до 5000 Ом.м. Можно считать, что значения сопротивления свыше 5000 Ом.м данный прибор не регистрирует. Сходный прибор ЕМ-31 той же фирмы Geonics сохраняет чувствительность лишь к сопротивлениям среды ниже 200 Ом.м.

На рис.10 представлена карта кажущихся сопротивлений по БИЭП с разносом 37 м, наглядно показывающая распределение флювиогляциальных песков в районе практики, подстилающие их моренные суглинки залегают повсеместно. Именно наличие двух слоев высокого контраста приводит к сильному проявлению макроанизотропии.

Пример 3. Участок Малое Устье

На участке был выполнен профиль из 10 ВЭЗ длиной 270 м, и параллельно ему на расстоянии около 50 м пройдены профили ДИП и БИЭП. Вблизи точек ВЭЗ имеются 4 скважины (Рис.11).

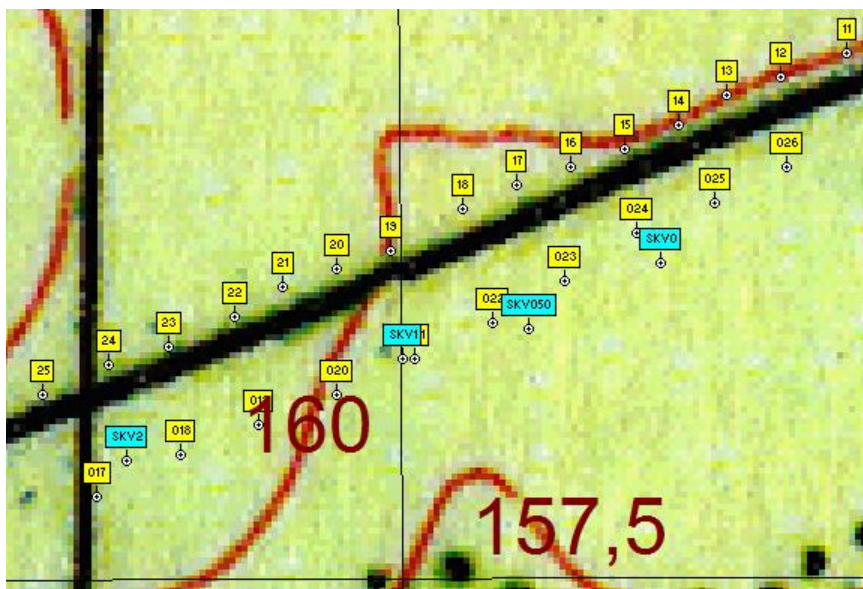


Рис.11. Фрагмент карты фактического материала - КФМ. Пикеты GPS для БИЭП и для ВЭЗ профиля "Малое Устье"

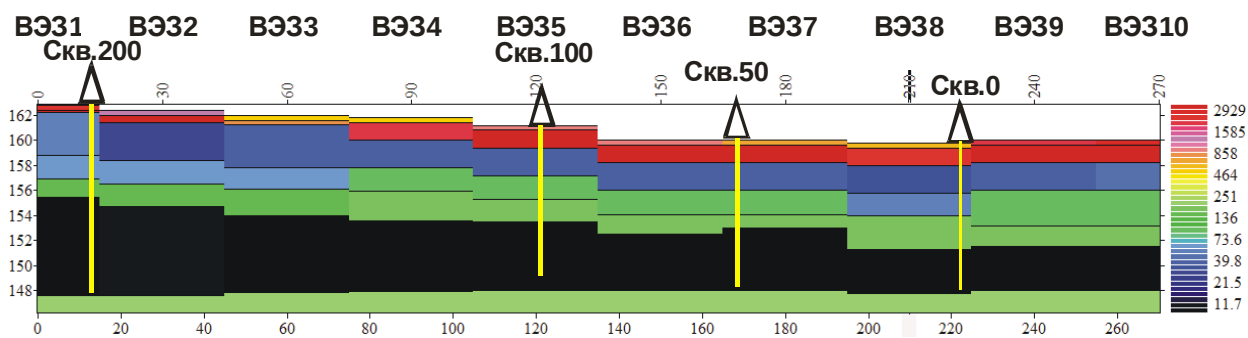


Рис.12. Геоэлектрический разрез после 1D интерпретации с учетом модели и глубины известняка по бурению. На профиле имеются 4 скважины.

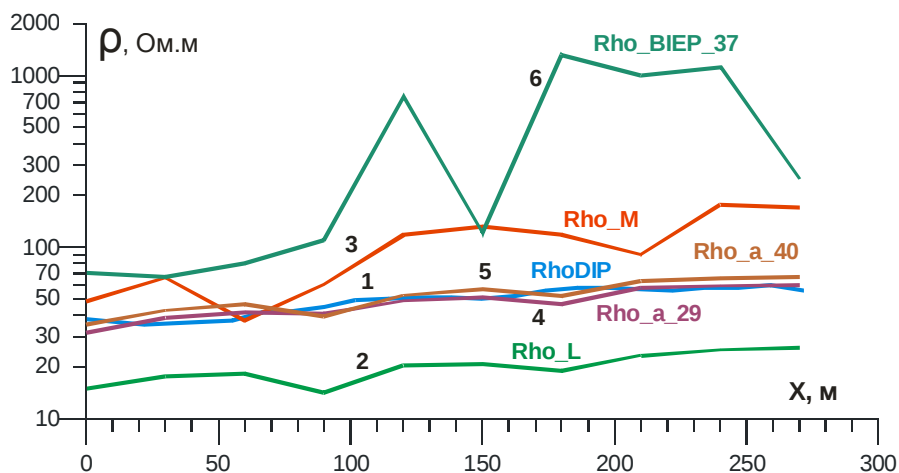


Рис.13. Графики сопротивления ρ_k по профилю: 1 - ρ_k ДИП; 2 - ρ_l по ВЭЗ; 3 - ρ_m по ВЭЗ; 4 - ρ_k ВЭЗ-29 м; 5 - ρ_k ВЭЗ-40 м; 6 - ρ_k БИЭП-37 м.

Рис.13 обладает рядом особенностей, которые не до конца понятны. Например, ρ_k ДИП (1) не совпадает с ρ_l по ВЭЗ (2), как ожидалось, но совпадает с ρ_k по ВЭЗ на разносах 29-40 м (4-5). Графики ρ_m по ВЭЗ (3) и ρ_k БИЭП (6) довольно заметно отличаются. Одно из возможных объяснений состоит в том, что профили ВЭЗ и ДИП-БИЭП не совпадают, а идут параллельно и разнесены примерно на 50 м (рис.11). Хотелось бы провести сравнение результатов для профилей, совпадающих в пространстве и измеренных в одно время.

С учетом расхождения графиков ρ_k на рис.13, понятно, что графики отношения сопротивлений ρ_m/ρ_l и отношения ρ_k БИЭП-37/ДИП не совпадают, хотя характер их изменения сходен. Отношение БИЭП/ДИП может достигать больших значений, чем отношение ρ_m/ρ_l и не совпадает с моделью 5000-40. Может быть, значения БИЭП следует предварительно осреднить, так как графики БИЭП намного сильнее изрезаны, чем данные ДИП или ВЭЗ.

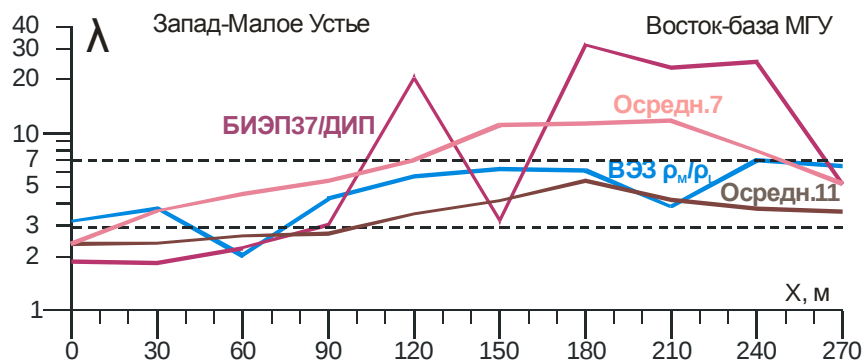


Рис.14. Графики отношения сопротивлений ρ_m/ρ_l по ВЭЗ и ρ_k БИЭП-37/ДИП 20Н (исходного и с осреднением) по профилю Малое Устье.

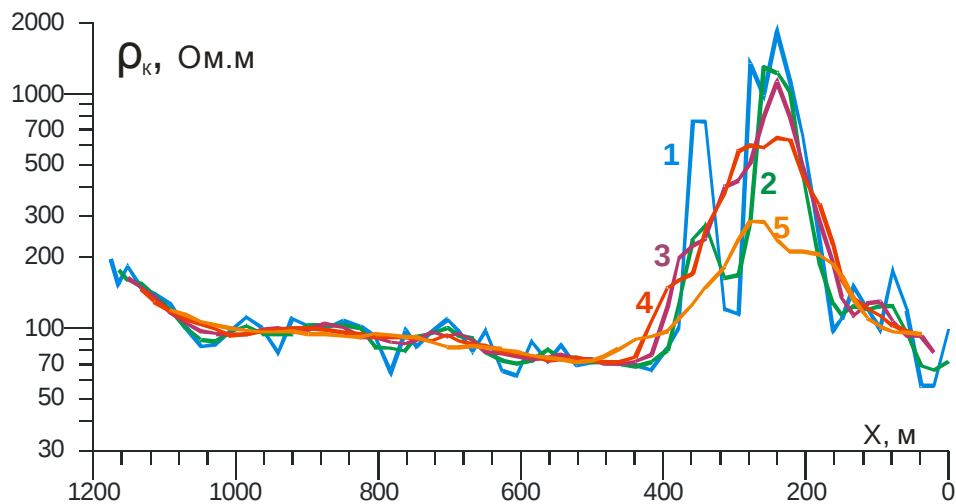


Рис.15. Графики БИЭП с разной степенью осреднения (расчет среднего геометрического): 1 - без осреднения; 2 - по 3 точкам; 3 - по 5 точкам; 4 - по 7 точкам; 5 - по 11 точкам.

Осреднение данных БИЭП в аномальной зоне сильно меняет ее амплитуду.

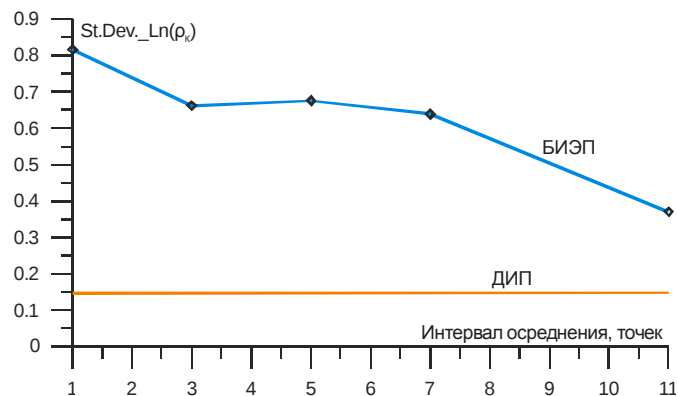


Рис.16. Изменение стандартного отклонения логарифмов ρ_k БИЭП при разных осреднениях и сравнение с ДИП (без осреднения).

Если для расчета брать значения БИЭП-37/ДИП, осредненные по 7 или 11 точкам, то они становятся больше похожи на данные ВЭЗ (с избытком и с недостатком) (рис.14). Вопрос влияния осреднения нужно изучать дополнительно.

Пример 4. Профиль "Ферма - слияние Угры и Вори"

Рис.17. КФМ профиля ДИП и БИЭП

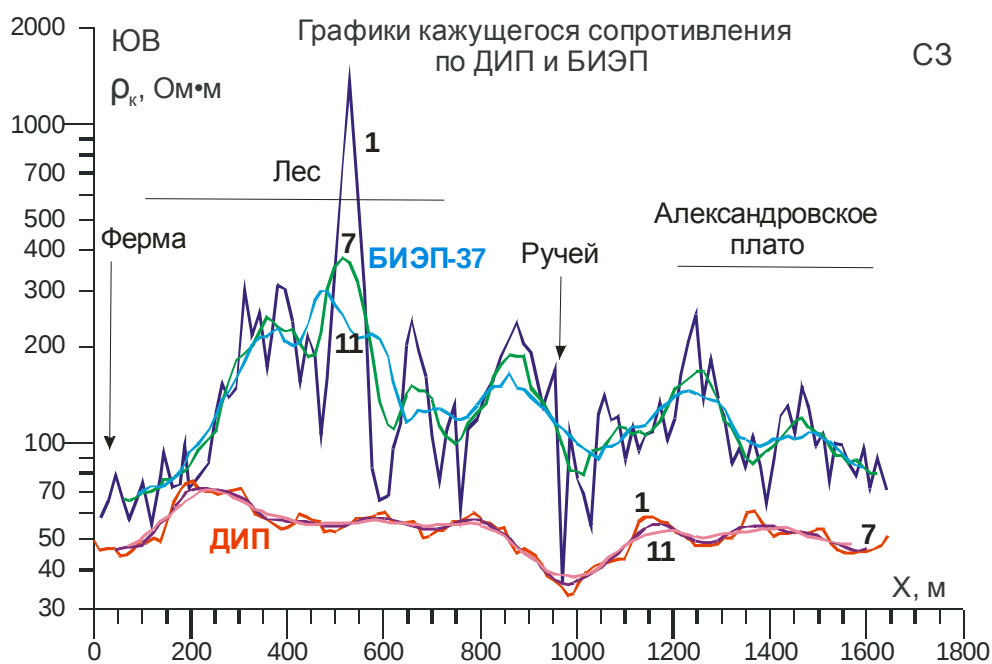


Рис.18. Результаты БИЭП и ДИП от фермы к слиянию (исходные и осредненные по 7 и 11 точкам)

Изрезанность графиков БИЭП намного сильнее, чем ДИП (не только на данном профиле, но и на других профилях). Поэтому возникло желание осреднять эти графики и примеры осреднения по 7 и 11 точкам, вместе с исходными графиками, показаны на рис.18. Изменения при осреднении данных ДИП заметно меньше, чем у БИЭП.

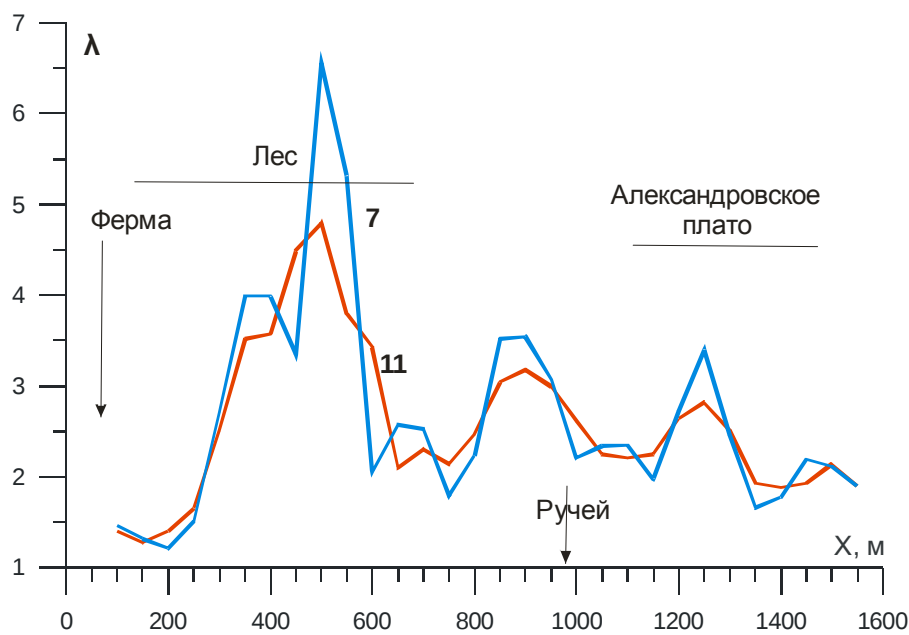


Рис. 19. Отношение сопротивлений БИЭП/ДИП после осреднения по 7 и 11 точкам.

После осреднения по 11 точкам график отношения БИЭП/ДИП укладывается в модель 5000-40 Ом.м по величине $\lambda_{\text{Макро}}$ (Рис.5), а при осреднении по 7 точкам в эту модель не входит. Это, правда не означает, что осреднение по 11 точкам оптимально, просто вопрос с осреднением требует более внимательного изучения.

Преимущества ДИП и других индукционных методов проявляются в высокой чувствительности к проводящим отложениям, в возможности изучать проводники под слоями-экранами высокого сопротивления. В условиях Александровской практики в верхней части разреза (глубина изучения до 15 м) нет условий для реализации подобных преимуществ ДИП, наоборот, из-за пониженной чувствительности к залегающим горизонтально высокоомным отложениям, метод ДИП дает распределение кажущихся сопротивлений заметно уже, чем метод сопротивлений. Является это отличие недостатком или достоинством метода ДИП, пока сказать затруднительно. Пока это факт, который нужно принять к сведению.

Выводы

Идея различия сопротивлений среднего квадратичного и среднего продольного для горизонтально-слоистого разреза, примененная Ивановым и др. (2011) к ВЭЗ и ЗСБ, в настоящей работе была распространена на отношение ρ_m к ρ_l ВЭЗ (или проявление макроанизотропии) и ρ_k ДИП и БИЭП (аналогичное отношению ρ_m/ρ_l ВЭЗ) при сопоставимой глубинности.

Высокая величина этого отношения БИЭП/ДИП (или степень макроанизотропии) на территории Александровской практики связана, прежде всего, с влиянием высокоомных (до 5000 Ом.м) флювиогляциальных песков, мощностью от первых сантиметров до 6-8 м. Это явление создает трудности при интерпретации данных ВЭЗ и электротомографии, порождает их отличие от ЗСБ, отличия результатов ДИП от БИЭП, и дает потенциальную возможность оценивать макроанизотропию по ДИП-БИЭП для введения поправок в ВЭЗ при отсутствии опорных скважин.

Литература

1. Ваньян Л.Л. Основы электромагнитных зондирований. – М., 1965. - 108 с.
2. Иванов П.В., Алексеев Д.А., Бобачев А.А., Яковлев А.Г. О комплексировании ВЭЗ и ЗСБ. Материалы конференции EAGE ИнжГео-2011, 5 стр.
3. Шевнин В.А., Бобачев А.А. 1D и 2D интерпретация зондирований методом сопротивлений. Материалы конференции EAGE ИнжГео-2011, 6 стр.
4. Электроразведка. Пособие по электроразведочной практике для студентов геофизических специальностей. МГУ, Москва, 2005. - 311 стр.
5. McNeil J.D. 1980. Technical Note TN-6. Electromagnetic terrain conductivity measurement at low induction numbers. Geonics Ltd. 13 pp.
6. www.geoelectric.org Программа Freq_EM для прямого расчета и интерпретации ДИП с EM-34.
7. <http://www.geonics.com> - сайт фирмы GEONICS