

**В.А.ШЕВНИН**, *д-р физ.-мат. наук, профессор, shevninv@rambler.ru*

**А.А.БОБАЧЕВ**, *канд. физ.-мат. наук, доцент, bobachev@rambler.ru*

**И.Н.МОДИН**, *д-р техн. наук, профессор, imodin@yandex.ru*

**Т.В.ЯЛОВ**, *магистр, аспирант, yalka@inbox.ru*

*Московский государственный университет*

**V.A.SHEVNIN**, *Dr. in phys. & math., professor, shevninv@rambler.ru*

**A.A.BOBACHEV**, *PhD in phys. & math, associate professor, bobachev@rambler.ru*

**I.N.MODIN**, *Dr. in eng. sc., professor, imodin@yandex.ru*

**T.V.YALOV**, *master, post-graduate student, yalka@inbox.ru*

*Moscow State University*

## РАЗЛИЧИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ГАЛЬВАНИЧЕСКИХ И ИНДУКТИВНЫХ МЕТОДОВ, НОВЫЕ ПРИМЕРЫ ДЛЯ ДИП И БИЭП

Различие в кажущихся сопротивлениях, определяемых в гальванических и индуктивных методах электроразведки, определяется влиянием макроанизотропии слоистого разреза и уменьшением глубинности исследования гальванических методов без изменения глубинности индуктивных методов. На контрастных по сопротивлению разрезах эти факторы приводят к отличиям кажущихся сопротивлений в десятки раз.

**Ключевые слова:** метод дипольного индуктивного профилирования, бесконтактные измерения электрического поля, гальванические и индуктивные методы, поперечное сопротивление, продольная проводимость.

## DIFFERENCE IN GALVANIC AND INDUCTIVE METHODS' RESULTS, NEW EXAMPLES FOR DIP AND BIEP

Difference in apparent resistivity values determined in galvanic and inductive electrical and electromagnetic methods depends on macroanisotropy of layered cross-section and decreased penetration depth of galvanic methods without changing penetration depth of inductive methods. Joint influence of these two factors in case of high contrast of layers' resistivities results in difference in several tens of apparent resistivity values.

**Key words:** dipole inductive profiling, non-contact measurements of electrical field, galvanic and inductive methods, transversal resistance, longitudinal conductance.

Отличия гальванических и индуктивных методов (или способов возбуждения и измерения электромагнитного поля) известны давно [1]. Рождение методов частотного зондирования (ЧЗ) и становления поля (ЗС) было вызвано стремлением проникнуть под слои высокого сопротивления в разрезе осадочного чехла Восточно-Европейской платформы для поиска нефтяных структур, что

не удавалось сделать методом вертикального электрического зондирования или дипольного зондирования (ВЭЗ, ДЭЗ). Аналогичные отличия гальванических и индуктивных методов наблюдаются и при изучении малых глубин. На практике по электроразведке студентов-геофизиков МГУ в д. Александровка Калужской области в последние годы используются методы диполь-

ного индуктивного профилирования (ДИП) и бесконтактного измерения электрического поля (БИЭП) [3], в том числе на одних и тех же участках и профилях. БИЭП аналогичен обычному электропрофилированию (ЭП) с заземленными электродами, т.е. это гальванический метод, а вот ДИП – типичный индуктивный метод.

Первое различие ДИП и БИЭП можно увидеть на рис.1, где представлены гистограммы кажущегося сопротивления по нескольким профилям в районе Александровского плато, для каждого метода использовано от 600 до 900 точек измерений. Данные ДИП получены с аппаратурой ЕМ-34 с горизонтальными диполями на разnose 20 м, частота 1,6 кГц; БИЭП – на разnose 37 м, частота 625 Гц. Там же представлена гистограмма для ВЭЗ, разnose от 1,5 до 110 м. Глубина изучения тремя перечисленными методами достигает 15 м у ДИП [4] и БИЭП и 30 м у ВЭЗ.

В геологическом разрезе района практики до глубины 15 м находятся флювиогляциальные пески ( $\rho = 300 \div 5000 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ ) и моренные суглинки ( $\rho = 30 \div 50 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ ) четвертичного возраста, на глубине 12-15 м встречаются известняки михайловского горизонта каменноугольного возраста ( $\rho = 150 \div 500 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ ), залегающие почти горизонтально. Поэтому неудивительно, что гистограммы  $\rho$  трех методов включают значения от 30 до 5000 Ом·м. Заметно сходство гистограмм БИЭП и ВЭЗ (гальванические методы) и резкое отличие от них гистограммы ДИП (индуктивный метод), у которого правая граница гистограммы заканчивается при  $\rho = 100 \div 140 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ . Причина такого различия кроется в анизотропии гори-

зонтальных напластований и в том, что гальванические методы отражают сопротивление горизонтально-слоистой анизотропной толщи как квадратичное сопротивление  $\rho_m = \sqrt{\rho_n \rho_l}$ , а индуктивные методы – как продольное сопротивление  $\rho_l$ .

**Пример различия квадратичного и продольного сопротивлений.** По скважинам, пробуренным в 2009 г. на Александровском плато, выявлена модель разреза (табл.1)

Таблица 1

Модель ВЭЗ вблизи скважины 4, Александровское плато

Сопротивление, Ом·м	Мощность, м	Описание
1917	0.562	Почва и подпочва
3584	1.01	Песок сухой
74.8	0.879	Суглинок
779	0.714	Песок
18.2	6.84	Суглинок
75.9	3.17	Суглинок с включениями известковой муки
157	–	Известняк

Далее рассчитывали обобщенные параметры по модели ВЭЗ у скв. 4, профиль «Плато»:

$H_{\text{sum}}$   $S_{\text{sum}}$   $T_{\text{sum}}$   $Rho_L$   $Rho_m$   $\lambda$   $Rho_n$   $H_{\text{macro}}$   
 13.18 0.43 5684.24 30.6 115 3.7 431 49.5

Данный расчет обобщенных параметров разреза показывает разницу в значениях продольного  $\rho_l$  и квадратичного  $\rho_m$  сопротивлений, достигающую 3,7 раз. Макроанизотропия завышает глубину до слоя известняков с 13,2 до 49,5 м. Так и выглядят результаты интерпретации ВЭЗ, если интерпретация ведется без использования априорной информации.

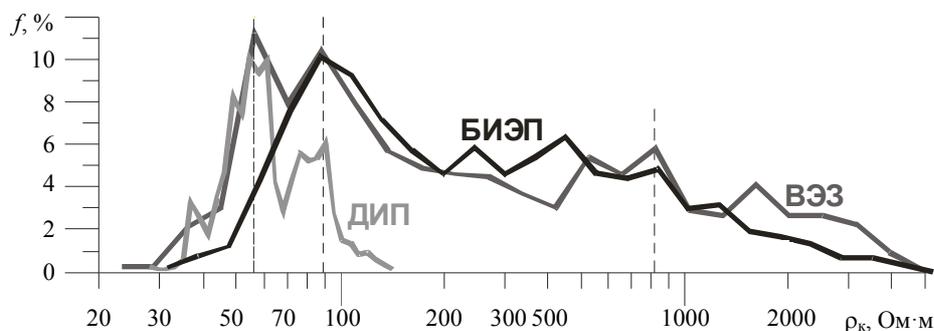


Рис. 1. Гистограммы для кажущихся сопротивлений ДИП, ВЭЗ и БИЭП по работам 2010 г.

**Влияние макроанизотропии.** В ближней зоне ДИП с горизонтальными диполями с разномом  $L$  [2]

$$h_{xx} \approx 1 - \frac{k_t^2 L^2}{2} \left[ 1 + \frac{1}{3} i k_t L \left( 1 + \frac{3}{\lambda^2} \right) \right] \approx \approx 1 - \frac{k_t^2 L^2}{2},$$

т.е. величина магнитного числа  $h_{xx}$  определяется продольным сопротивлением (через волновое число  $k_t$ ) и практически не зависит от  $k_n$  и коэффициента анизотропии  $\lambda$ ;  $i$  – мнимая единица.

Судя по рис.1 правые границы гистограммы ДИП и БИЭП (и ВЭЗ) отличаются до 36 раз. С чем связано такое различие? Прежде всего, с наличием макроанизотропии. Вблизи поверхности отмечается переслаивание флювиогляциальных песков и моренных суглинков, причем эта пара слоев нередко встречается более одного раза (разные фазы осадконакопления). Коэффициент макроанизотропии может достигать 6,5, если мощности песков и суглинков равны (рис.2). В этом случае  $\rho_m$  будет больше  $\rho_l$  в 6,5 раз. Однако различие в 36 раз это не объясняет, нужно найти еще другие факторы, увеличивающие эту разницу дополнительно в 5,5 раз.

**Уменьшение глубинности гальванических методов.** Вторым фактором различия ДИП и БИЭП является уменьшение глубинности гальванических методов в разрезе с макроанизотропией. На индуктивные методы макроанизотропия не влияет, и глубинность ДИП не уменьшается.

Рассмотрим четырехслойную модель (рис.3, А), типичную для изучаемой площади (табл.2)

Таблица 2

Параметры модели слоистого разреза			
Номер слоя	Сопротивление, Ом·м	Мощность, м	Описание пород
1	500	1	Поверхностный слой песка
2	$\rho_2$ -var	3	Флювиогляциальные пески
3	50	8	Моренные суглинки
4	200	–	Известняки

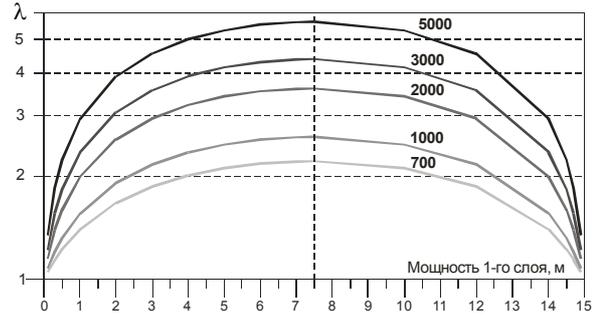


Рис.2. Графики макроанизотропии. Числа на кривых – значения  $\rho_2$  от 700 до 5000 Ом·м;  $\rho_1 = 40$  Ом·м. Суммарная мощность двух слоев 15 м

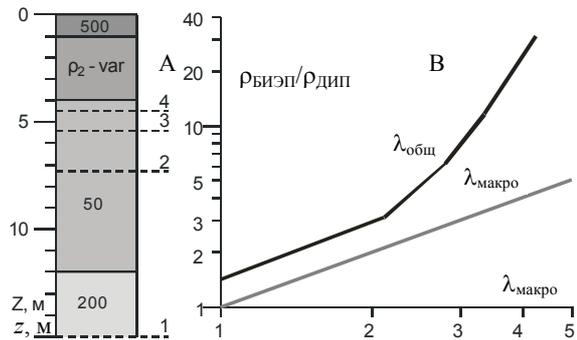


Рис.3. Результаты моделирования ДИП-БИЭП для модели (А); отношение сопротивлений БИЭП/ДИП: полное для модели, черная линия и только за счет макроанизотропии, серая линия (В)

Второй слой (флювиогляциальные пески) будет иметь сопротивление 1000, 2000, 3000, 5000 Ом·м. Посчитаем коэффициент макроанизотропии до кровли известняков (4-й слой) в зависимости от  $\rho_2$ :

$\rho_2$ , Ом·м	1000	2000	3000	5000
$\lambda_{\text{макро}}$	2,1	2,8	3,3	4,2

При использовании гальванических методов мощности слоев и глубины границ завышаются (при интерпретации без использования априорной информации) в число раз, равное коэффициенту макроанизотропии. Это явление можно представить как эквивалентное уменьшение глубинности (рис.3, А). Если глубинность гальванического метода равна 15 м и коэффициент макроанизотропии равен 1, 2, 3, 4, то фактическая глубинность  $15/\lambda$ , как показано на рис.3, А пунктирными линиями. Для «усеченных» моделей разреза можно рассчитать сопротивление  $\rho_m$ , которое будет соответствовать

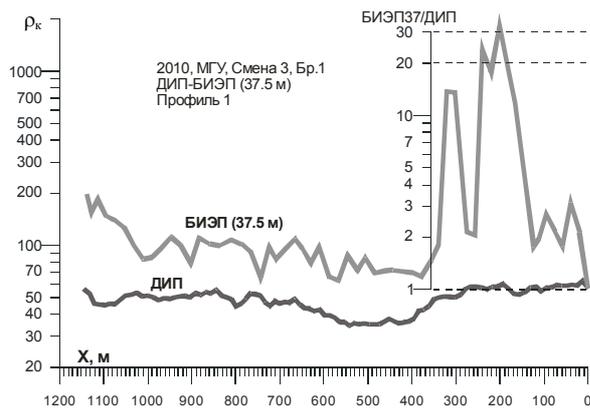


Рис.4. Графики  $\rho_k$  БИЭП и ДИП по профилю «запад-восток»

кажущемуся сопротивлению БИЭП. На ДИП макроанизотропия не действует, и кажущееся сопротивление ДИП будет равно  $\rho_l$  модели с рис.3, А. При  $\lambda = 4$  отношение  $\rho_{\text{БИЭП}}/\rho_{\text{ДИП}}$  ( $\lambda_{\text{общ}}$ ) достигает 30, т.е. значительно превышает коэффициент макроанизотропии  $\lambda_{\text{макро}}$ .

Насколько такая модель соответствует действительности? На рис.4 приведены практические результаты БИЭП и ДИП по профилю от р. Угра на западе к базе практики на востоке через Александровское плато. Дополнительная шкала показывает отношение кажущихся сопротивлений БИЭП и ДИП, которое достигает 30, причем за счет макроанизотропии с учетом сопротивлений пород коэффициент макроанизотропии не должен превышать 5,6. Оставшаяся часть отношения свидетельствует о снижении глубинности БИЭП, вызванном макроанизотропией.

**Выводы.** Контраст сопротивлений флювиогляциальных песков и моренных суглинков на территории Александровской практики в Калужской области при сочета-

нии методов БИЭП и ДИП (гальванического и индуктивного) приводит к различию кажущихся сопротивлений этих методов до 30 раз.

Частично это различие кажущихся сопротивлений БИЭП и ДИП вызвано макроанизотропией разреза, так как БИЭП отражает квадратичное сопротивление  $\rho_m$ , а ДИП – продольное сопротивление  $\rho_l$ , а частично вызвано снижением глубинности гальванических методов под влиянием макроанизотропии. Фактор снижения глубинности гальванических методов под влиянием макроанизотропии следует исследовать дополнительно.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Ваньян Л.Л. Основы электромагнитных зондирований. М., 1965. 108 с.
2. Каринский А.Д. Влияние электрической анизотропии горных пород на электромагнитное поле в скважине: Автореф. дис. ... д-ра физ.-мат. наук / МГРИ. М., 2008. 32 с.
3. Электропрофилирование с незаземленными рабочими линиями / Сост. А.С.Нахабцев, Б.Г.Сапожников, А.И.Яблучанский. Л., 1985. 96 с.
4. McNeil J.D. Technical Note TN-6. Electromagnetic terrain conductivity measurement at low induction numbers / Geonics Ltd. 1980. 13 p.

#### REFERENCES

1. Vanyan L.L. Fundamentals of electromagnetic soundings. Moscow, 1965. 108 p.
2. Karinsky A.D. Influence of rocks' electrical anisotropy on electromagnetic field in boreholes: Research Paper...Dr. phys. & math. / MGRI. Moscow, 2008. 32 p.
3. Resistivity profiling with non-grounded working lines / Authors: A.S.Nakhabtcev, B.G.Sapognikov, A.I.Yabluchansky. Leningrad, 1985. 96 p.
4. McNeil J.D. Technical Note TN-6. Electromagnetic terrain conductivity measurement at low induction numbers / Geonics Ltd. 1980. 13 p.