

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОЗОНДИРОВАНИЙ С УСТАНОВКОЙ AMNB И КОМБИНИРОВАННОЙ ТРЕХЭЛЕКТРОДНОЙ УСТАНОВКОЙ AMN+NMA НАД ЛОКАЛЬНЫМИ НЕОДНОРОДНОСТЯМИ

*Федорова О.И.* – Институт геофизики УрО РАН, Екатеринбург

**Аннотация.** Представлены результаты физического и математического моделирования электрических зондирований с установками AMNB и AMN+NMA,  $B \rightarrow \infty$  над локальными неоднородностями. Выделены особенности распределения кажущегося сопротивления в структуре геоэлектрического разреза над параллелепипедом и сферой. Основное преимущество зондирований с установкой AMN+NMA состоит в менее выраженных в разрезе краевых эффектах и оконтуривании нижней границы неоднородности.

*Электрические зондирования, установки зондирований, геоэлектрический разрез, краевые эффекты.*

## MODELLING OF ELECTRICAL SOUNDINGS WITH PLANTING AMNB AND COMBINED PLANTING AMN+NMA ABOVE LOCAL INHOMOGENEITIES

*Fedorova O.I.* – Institute of Geophysics UB of RAS, Yekaterinburg

**Abstract.** Results of manual and mathematical modelling electrical soundings with plantings AMNB and AMN+NMA,  $B \rightarrow \infty$  above local inhomogeneities are presented. Features of distribution of apparent resistance in a structure of a geoelectric section above parallelepiped and sphere are identified. Main advantage of soundings with planting AMN+NMA consists in side effects less expressed in a section and contouring of bottom line of inhomogeneity.

*Electrical sounding, planting of soundings, a geoelectric section, side effects.*

### **Введение**

При изучении верхней части геологического разреза и решении инженерно-геологических задач часто применяют вертикальные электрические зондирования (ВЭЗ) с симметричной установкой Шлюмберже AMNB. Верхняя часть разреза наиболее подвержена интенсивным геологическим процессам, приводящим к нарушению слоистого залегания горных пород и образованию геологических неоднородностей. Неоднородности будут влиять на результаты электрозондирований. В некоторых случаях они являются геологическими «помехами». Так, приповерхностные неоднородности трансформируют кривую зондирования на больших разносах и вносят неверное представление о более глубинном строении среды. Геоэлектрические неоднородности на малых глубинах в электромагнитном поле будут создавать краевые эффекты, искажающие общую структуру геоэлектрического разреза (Хмелевской, Шевнин, 1994; Яковлев, 1989; Modin et al., 1994; Бобачев и др., 1995).

Для уменьшения искажающего влияния неоднородностей был предложен новый способ электрических зондирований с комбинированной установкой AMN+NMA  $B \rightarrow \infty$  (Федорова, 2015; Шестаков, Федорова, 2016). Используется трехэлектродная установка Гуммеля AMN, в которой электроды (A) и (N) находятся на равном расстоянии от центрального электрода (M), подключенного к клемме (M) измерителя. Второй питающий электрод (B) относится в бесконечность. Отметим, что установка Гуммеля применялась только для профилирования. Выполняются двойные измерения комбинированным способом AMN+NMA. Крайние электроды при втором измерении меняются местами, т. е. питающий электрод (A) подключается к клемме (N) приемника, а приемный (N), соответственно, в клемме (A) генератора тока. Зондирование осуществляется за счет перемещения крайних электродов на одинаковое расстояние от электрода (M). Полученные данные обрабатываются путем расчета среднего кажущегося сопротивле-

ния  $\rho_k^{cp} = (\rho_k^{AMN} + \rho_k^{MNA})/2$  на каждом раз- носе и значения относятся к центральному электроду (М).

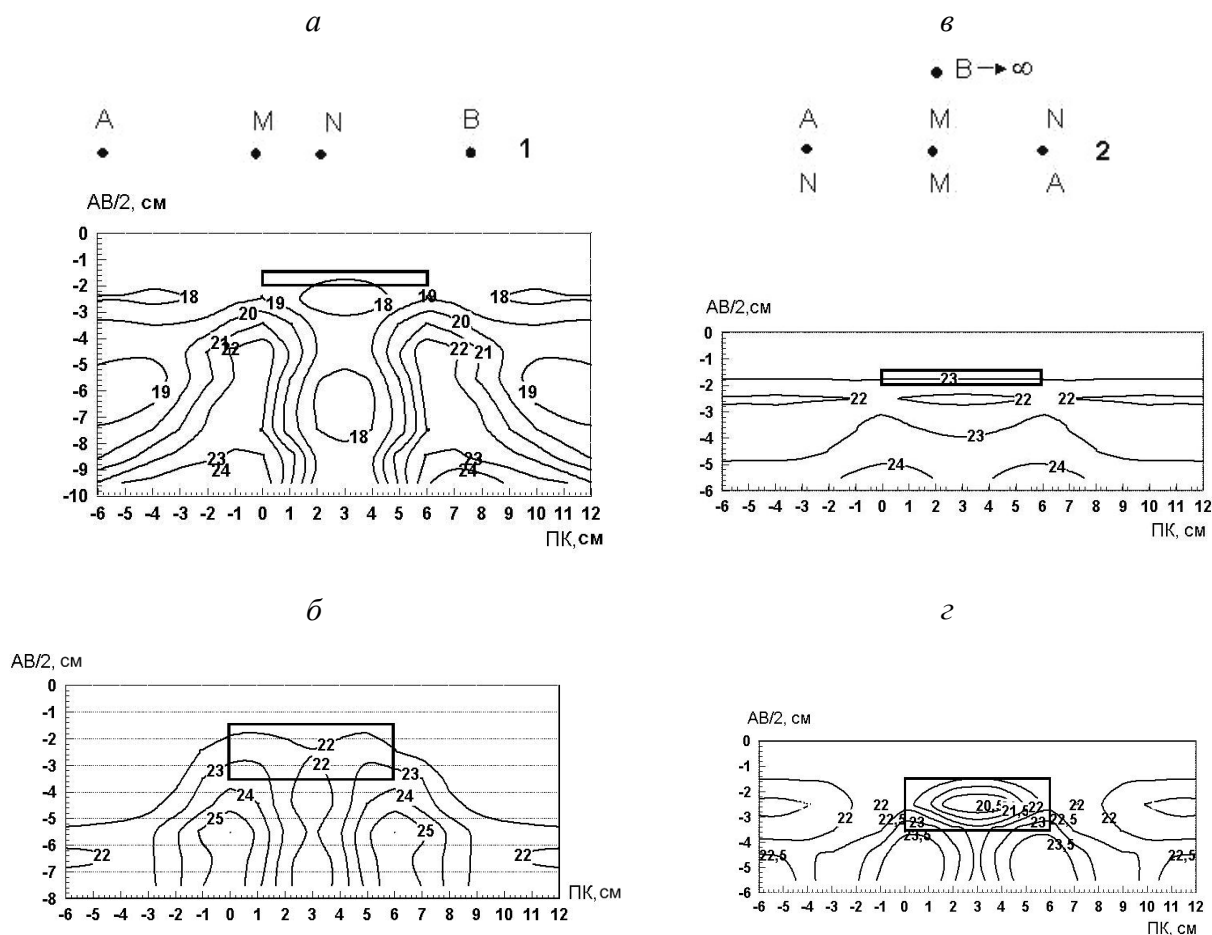
В статье рассматриваются результаты электротондирований с симметричной установкой AMNB и трехэлектродной установкой AMN+MNA над локальными объектами, полученные физическим и математическим моделированием.

**Результаты физического моделирования**

Физическое моделирование выполнено над двумя металлическими параллелепипедами, помещенными в бак с водой на глубину 1,5 см: латунь, размерами 0,7×6×10 см, нержавеющая сталь, размерами 2×6×8 см. Профиль измерений проходил над серединой параллелепипедов. При-

емная линия в установке AMNB составляла MN = 1 см, минимальный полуразнос питающих электродов AB/2 = 1,5 см, полуразносы увеличивались с шагом 1 см. Разрезы кажущихся сопротивлений  $\rho_k$  построены от полуразноса AB/2. В установке AMN+MNA начальный полуразнос равен AM = 1 см, который так же увеличивался с шагом 1 см. Результаты зондирований представляются разрезом  $\rho_k$  от полуразносов AM. Измерения проводили с электроразведочной аппаратурой ЭРА-ЗНАК.

В методе вертикальных электрических зондирований боковые стороны параллелепипедов выделяются краевыми эффектами в виде вытянутых аномалий повышенного сопротивления (рис. 1, а, б). Над самим объектом аномальная зона пониженного



**Рис. 1.** Физическое моделирование электротондирований над проводящими параллелепипедами с установками: 1 – AMNB – а, б; 2 – AMN+MNA – в, г

сопротивления так же распространяется в глубь разреза. В методе с установкой AMN+MNA над параллелепипедом с малой вертикальной мощностью ( $h/H = 3$ , где  $h$  – глубина до верхней кромки объекта;  $H$  – его горизонтальная мощность) боковые эффекты слабо выражены, (рис. 1, в) аномалия от объекта смещена под его нижнюю кромку. Аномалия от параллелепипеда с большей вертикальной мощностью ( $h/H = 0,75$ ) находится в разрезе непосредственно на месте изучаемого объекта, имеются боковые эффекты слабой интенсивности (рис. 1, з).

Краевые эффекты в ВЭЗ возникают при прохождении одного из питающих заземлений через локальный объект. Максимум аномалии наблюдается, когда приемные заземления MN находятся над боковыми гранями параллелепипеда. В методе AMN+MNA  $B \rightarrow \infty$  за счет того, что разнится не только питающее заземление А, но и приемное N, а потом они меняются местами, то, во-первых, увеличивается расстояние между приемными заземлениями М и N, во-вторых, полученные значения  $\rho_k$  осредняются, что приводит к уменьшению краевых эффектов.

#### **Результаты математического моделирования**

Математическое моделирование электрозондирований провели над шаром в однородном полупространстве. Используя приближенное выражение для потенциала точечного источника на дневной поверхности при наличии погруженного шара (Заборовский, 1943), получили выражения кажущегося сопротивления для рассматриваемых установок.

Расчеты выполнили для проводящего шара:  $\rho_2/\rho_1 = 0,1$ ;  $h = 1,5b$ , где  $\rho_1, \rho_2, b, h$  – удельное сопротивление среды и шара, радиус шара и глубина его залегания, соответственно. Все линейные размеры приведены к радиусу шара. Разрезы кажущегося сопротивления  $\rho_k/\rho_1$  построены для зондирований с установкой AMN+MNA от полуразноса  $r/b = AM/b$ , а в методе ВЭЗ от  $r/b = AB/2b$ .

Слева и справа от шара в обоих случаях

наблюдаются краевые эффекты сравнительно небольшой интенсивности (рис. 2, а, в). Верхняя кромка шара четко выделяется обеими установками. Отличительная особенность в поведении изолиний на разрезе  $\rho_k/\rho_1$  состоит в том, что при зондировании с установкой AMN+MNA изолинии сопротивлений, начиная с 0,8 и меньше, концентрируются внутри шара, они замкнуты, и ниже шара сопротивление близко к значению сопротивления вмещающей среды (см. рис. 2, в). На разрезе ВЭЗ (см. рис. 2, а) изолинии не замкнутые и, как в случае с параллелепипедом, вытянуты вниз, создавая ложный аномальный эффект.

Для нового метода зондирований выполнили оценку чувствительности установки AMN+MNA к локальным неоднородностям на примере проводящего шара  $\rho_2/\rho_1 = 0,1$ . Шар помещали на разную глубину и над центром шара по кривой зондирования определяли разнос, при котором наблюдается максимальный аномальный эффект (рис. 2, б). График величины полуразноса  $l = AM$  в точках экстремумов  $\rho_k/\rho_1$  от глубины до центра шара, приведенные к радиусу шара, начиная с  $H/b = 1,5$ , имеет приблизительно линейную зависимость:  $l/b = H/b - 0,25$ . Для найденных полуразносов построили зависимость экстремальных значений  $\rho_k/\rho_1$  от соотношения глубины до центра шара к его радиусу (рис. 2, з, сплошная линия).

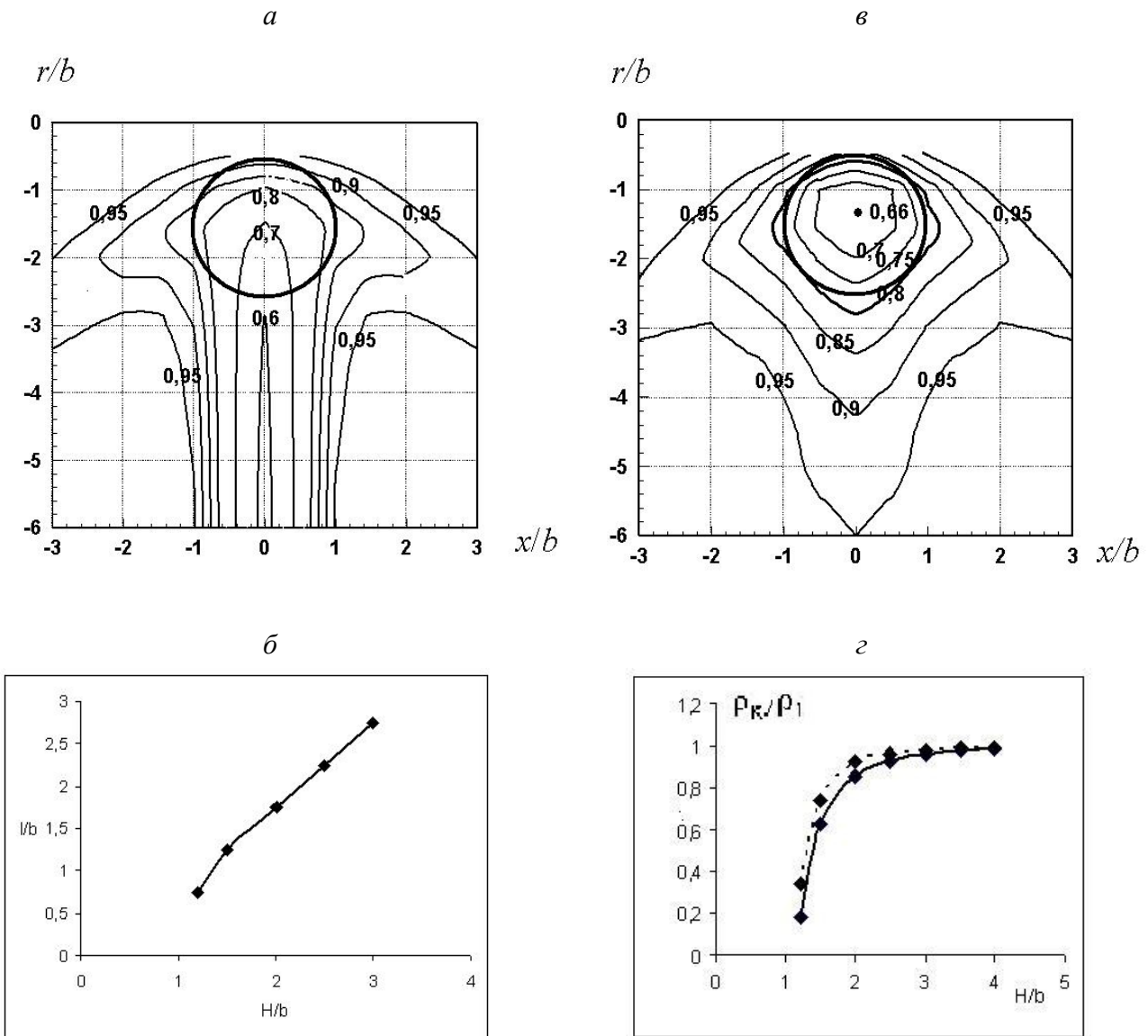
Чтобы сравнить чувствительность с методом ВЭЗ, по этим же разносам получили зависимость значений  $\rho_k/\rho_1$  от глубины залегания центра шара для установки AMNB (см. рис. 2, з, пунктирная линия). Установка AMN+MNA наиболее чувствительна к локальному объекту. Так, при  $H/b = 1,2$  для ВЭЗ  $\rho_k/\rho_1 = 0,34$ , а для нового метода  $\rho_k/\rho_1 = 0,186$ . Чем больше параметр  $H/b$ , тем чувствительность установок становится близкой друг к другу.

#### **Заключение**

Результаты физического и математического моделирования электрозондирований с симметричной установкой AMNB и трехэлектродной установкой AMN+MNA над локальными объектами показали сле-

дующее. Краевые эффекты появляются в районе локального объекта при зондировании с обеими установками, но в методе ВЭЗ они более интенсивные и вытянуты в глубь разреза. Верхняя кромка неоднородности фиксируется в обоих случаях и тем точнее, чем больше вертикальный размер объекта. С установкой AMNB нижняя граница неоднородности с вмещающей средой на разрезах кажущихся сопротивлений не выделяется, аномальная область вытя-

нута на глубину, создавая ложное представление о размерах искомого объекта. В новом способе зондирования с установкой AMN+MNA нижняя кромка геоэлектрической неоднородности ограничивается по физическому моделированию довольно четко для объекта с вертикальной мощностью, превышающей глубину залегания до его верхней кромки. Расчеты показали, что чувствительность нового способа к неоднородностям выше, чем в методе ВЭЗ, ес-



**Рис. 2.** Разрезы кажущихся сопротивлений  $\rho_k/\rho_1$  над проводящим шаром с установками: AMNB – а; AMN+MNA – в.

График зависимости величины полуразноса  $l = AM$  в точках экстремумов  $\rho_k/\rho_1$  от глубины до центра шара, приведенные к радиусу шара для установки AMN+MNA (б).

Зависимость экстремальных значений  $\rho_k/\rho_1$  от соотношения глубины до центра шара к его радиусу с установками (г): AMN+MNA – сплошная линия; AMNB – пунктирная линия

ли глубина залегания центра объекта не превышает в три-четыре раза половину его вертикальной мощности.

**Литература**

*Бобачев А.А., Марченко М.Н., Модин И.Н.* Новые подходы к электрическим зондированиям горизонтально-неоднородных сред // Физика Земли. 1995. № 12. С. 79–90.  
*Заборовский А.И.* Электроразведка. М.: Гостоптехиздат, 1943. 444 с.  
*Федорова О.И.* Способ комбинированных электрических зондирований с трехэлектродной установкой // Уральский геофизический вестник. 2015. № 1. С. 58–62.  
*Хмелевской В.К., Шевнин В.А.* Электроразведка методом сопротивлений. М.: МГУ, 1994. 160 с.  
*Шестаков А.Ф., Федорова О.И.* Способ геoeлектроразведки. Патент РФ № 2581768, 2014.

*Яковлев А.Г.* Влияние геоэлектрических неоднородностей на результат электромагнитных зондирований: Автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. М.: МГУ, 1989.  
*Modin I.N., Shevnin V.A., Pervago E.V., Bobatchev A.A., Marchenko M.N., Lubchikova A.V.* Distortions of VES data, caused by subsurface inhomogeneities // Report, presented at EAEG 56th Annual Meeting, Austria, Vienna, June 6–10, 1994. P. 129.