

О ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ МЕТОДА НАЛОЖЕНИЯ ПОЛЕЙ К БЛИЗПОВЕРХНОСТНЫМ ГЕОЭЛЕКТРИЧЕСКИМ НЕОДНОРОДНОСТЯМ

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

Аннотация. Рассмотрены результаты математического и физического моделирования зондирования методом наложения полей над геоэлектрическими неоднородностями. Получены зависимости интенсивности аномального поля от глубины залегания и удельного сопротивления шара в однородном полупространстве, аппроксимирующего неоднородность. Оценена чувствительность применяемой в методе однополярной установки к изменению размера приемной линии. Показана возможность определения размера и удельного сопротивления геоэлектрического объекта.

Однополярная установка, геоэлектрическая неоднородность, удельное сопротивление, разность потенциалов.

ABOUT SENSITIVITY OF THE METHOD IMPOSED OF FIELDS TO SURFACE-NEAR GEOELECTRIC INHOMOGENEITIES

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

Abstract. The results of mathematical and physical modelling of sounding by imposed fields method above geoelectric inhomogeneities are considered. Received are dependences of abnormal field intensity from the depth of occurrence and resistivity of a sphere in homogeneous half space approximating inhomogeneity. The sensitivity of unipolar array applied in the method to changes in the size of acceptance line is evaluated. The opportunity to determine the size and resistivity of geoelectric object is shown.

Unipolar array, geoelectric inhomogeneity, resistivity, potential difference.

Введение

Метод наложения полей (МНП) был предложен и развивался в 50–70 гг. уральскими геофизиками для поисков рудных месторождений. Напомним, что в МНП используется симметричная четырехэлектродная однополярная установка $AMNA'$, в которой питающие заземления A и A' подключаются к одному полюсу источника тока и токи, стекающие с них, поддерживаются одинаковыми. Третье питающее заземление B , отнесенное в «бесконечность», подключается к другому полюсу генератора тока. В центре установки между приемными электродами M и N измеряется разность потенциалов ΔU , которая в однородной и горизонтально-слоистой среде равна нулю. Геологическая неоднородность фиксируется экстремумами ΔU_{\max} разного знака, с переходом через нуль над центром объекта. Поэтому измерения с однополярной установкой относят к методам чистых аномалий (Тархов, 1957).

В настоящее время электроразведочные исследования ориентированы в большей степени на изучение геоэлектрическо-

го строения верхней части геологического разреза для решения инженерно-геологических, инженерно-экологических и других задач. В этой связи возникает интерес к оценке возможностей метода наложения полей при малоглубинных исследованиях.

Чувствительность однополярной установки к неоднородностям близповерхностного слоя недостаточно изучена. В работах (Саковцев, 1959; Редозубов, 2010) рассмотрены теоретические графики электропрофилирования МНП для модели шара в однородном полупространстве, аппроксимирующего геоэлектрическую неоднородность. Выполнены расчеты для крайних случаев, упрощающих формулу потенциала точечного источника в присутствии проводящего ($\rho_2 = 0$) и непроводящего ($\rho_2 = \infty$) шара. В работе (Григорьева, 1953) приводятся зависимости аномалии ΔU от глубины залегания центра шара лишь для трех размеров питающих линий.

Наибольшую информацию о чувствительности МНП к неоднородностям верх-

ней части разреза могут дать зондирования с однополярной установкой, поскольку с изменением размеров приемной и питающей линий фиксируется как максимальный аномальный сигнал, так и затухание поля, возбужденное вблизи геоэлектрического объекта. В данной статье представляются результаты исследования чувствительности метода наложения полей в варианте зондирования, выполненные над локальными объектами с изометричным сечением и конечными значениями удельного сопротивления.

Теоретические и экспериментальные исследования

За чувствительность однополярной установки примем относительную разность потенциалов ($\Delta U_{\text{отн}}$), по которой будем оценивать интенсивность аномального эффекта:

$$\Delta U_{\text{отн}} = \Delta U / |\Delta U_{\text{max}}|,$$

где ΔU – вычисленная или измеренная разность потенциалов в точке наблюдения; ΔU_{max} – максимальное значение ΔU .

Теоретические расчеты зондирования выполняли над погруженным в однородное изотропное полупространство шаром. Для такой модели известно решение для потенциала поля точечного источника, расположенного на дневной поверхности (Заборовский, 1943):

$$U(r, d, \theta) = \frac{I\rho_1}{2\pi} \left[\frac{1}{R} + 2 \sum_{n=0}^{\infty} p_n \frac{b^{2n+1}}{d^{n+1} r^{n+1}} P_n(\cos\theta) \right], \quad (1)$$

где I – сила тока; ρ_1, ρ_2 – удельные сопротивления среды и шара, соответственно;

$$p_n = \frac{n(\rho_2 - \rho_1)}{n\rho_1 + (n+1)\rho_2}; \quad b - \text{радиус шара}; \quad R -$$

расстояние от питающего до приемного заземления; d, r, θ – расстояние от центра шара до питающего и приемного заземления и угол между ними; $P_n(\cos\theta)$ – полином Лежандра.

Разность потенциалов для однополярной установки вычисляли по полученному выражению:

$$\Delta U = U_{AM}(r_1, d_1, \theta_1) + U_{A'M}(r_1, d_2, \theta_2) - U_{AN}(r_2, d_1, \theta_3) - U_{A'N}(r_2, d_2, \theta_4), \quad (2)$$

где $U_{AM}, U_{A'M}, U_{AN}, U_{A'N}$ – потенциалы в точ-

ках M и N приемной линии от питающих заземлений A и A' , подключенных к положительному полюсу источника тока.

В расчетах приемную линию MN приняли много меньше питающей линии (0,01 м) и, соответственно, меньше радиуса шара, чтобы исключить ее влияние на величину и распределение аномального поля при различных значениях радиуса (b) и глубины до центра шара (H). Однополярная установка перемещалась по профилю, проходящему через эпицентр шара. В каждой расчетной точке профиля менялся разнос питающей линии AA' (от 0,25 до 12 м) с шагом 0,25 м и вычислялась разность потенциалов.

На рис. 1а приведен разрез интенсивности аномального поля $\Delta U_{\text{отн}}$ от полуразноса установки ($l = AA'/2$) для проводящего шара ($b = 1$ м) с отношением $\rho_2/\rho_1 = 0,1$ и глубиной до его центра $H = 3$ м. Изолиния $\Delta U_{\text{отн}} = 0,9$ проходит над верхней кромкой шара, а изолиния 0,5 – над нижней. Расстояние между экстремумами приближенно равно глубине до центра шара (H). Расчеты показали, что при дальнейшем погружении шара расстояние между экстремальными значениями изменяется и также сопоставимо с глубиной до его центра (Федорова, 2011).

Рассмотрим результаты зондирования с однополярной установкой, полученные физическим моделированием над непроводящим кубом серпентинита (5x5x5 см), помещенным в воду. Расстояние до верхней кромки равнялось 1,5 см. Профиль измерений проходил над эпицентром модели, $MN = 1$ см, что составляет меньше половины стороны куба. На разрезах $\Delta U_{\text{отн}}$ верхняя граница вмещающей среды и объекта выделяется экстремальными значениями ΔU_{max} на полуразносе $l = 1,5$ см (рис. 1б). Расстояние между экстремумами приближенно равно глубине до центра куба (4 см). На нижней границе поле практически затухает (изолиния 0,2). Таким образом, зависимость интенсивности аномального поля от размеров питающей линии однополярной установки над кубом,

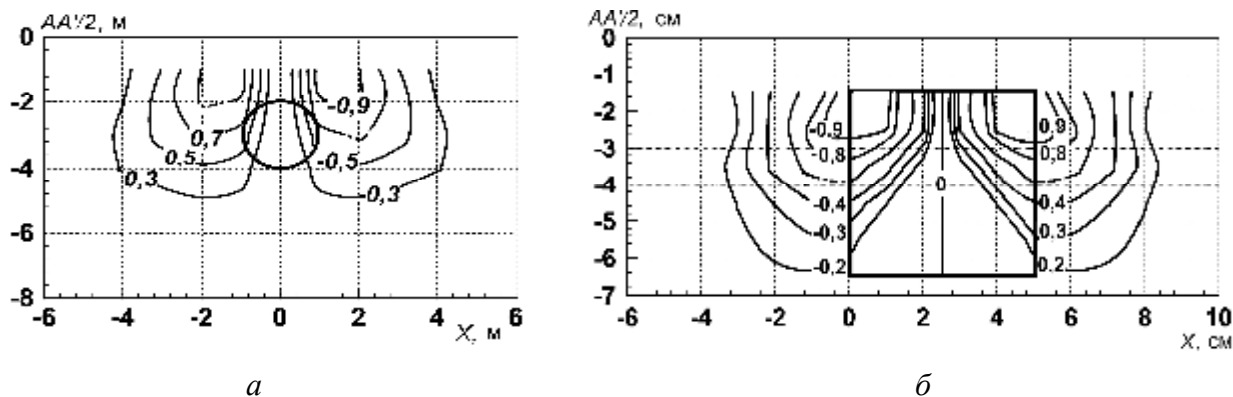


Рис. 1. Разрезы $\Delta U_{отн}$: а – над шаром; б – над кубом

в силу изометричной формы объекта, схожа с интенсивностью над шаром.

Физическое моделирование над горизонтальным цилиндром (кernом мрамора с размерами: $b = 2$ см, $L = 8$ см), помещаемым на разные глубины, показало, что расстояние между экстремальными значениями разности потенциалов равно глубине до центра цилиндра (Федорова, 2011). Чувствительность установки с погружением объекта значительно падает; так максимальное значение ΔU_{max} при глубине до центра цилиндра $H = 2,5$ см в 50 раз больше, чем при $H = 5,5$ см.

Для вычисления интенсивности аномального эффекта необходимо наиболее точно установить полуразнос ($l = AA'/2$), при котором фиксируется максимальное значение разности потенциалов (ΔU_{max}). Из формулы (1) следует, что этот полуразнос будет зависеть от глубины залегания центра шара, поскольку через нее рассчитываются параметры r , d , $\cos\theta$, и радиуса шара, коэффициент p_n не влияет на положение экстремумов ΔU . По расчетам зондирования, выполненных для малой приемной линии, получена приближенная зависимость полуразноса питающей линии, отнесенного к радиусу, $l/b = (AA'/2)/b$ в точках экстремумов от относительной глубины до центра шара (H/b), справедливая при любых соотношениях ρ_2/ρ_1 .

Полученную зависимость (рис. 2) аппроксимировали линейной функцией

$$l/b = 0,438H/b - 0,0569. \quad (3)$$

Таким образом, при профилировании методом наложения полей оптимальный полуразнос для поиска изометричных объектов, аппроксимируемых шаром, можно рассчитать по ф-ле (3), исходя из предполагаемых размера и глубины залегания объекта: $l = 0,438H - 0,0569b$. И, наоборот, по экспериментальным результатам зондирования определяется полуразнос в точках экстремумов, глубина до центра объекта по расстоянию между экстремумами и оценивается размер объекта $b = 7,7H - 17,57l$. Например, для случая, когда $b = 1$ м, $H = 3$ м, оптимальный полуразнос при профилировании равен $l = 1,26$ м, а по результатам зондирования, зная l в точках экстремумов и H , получим размер объекта $b = 0,96$ м. Для случая $b = 2$ м, $H = 7$ м получим опти-

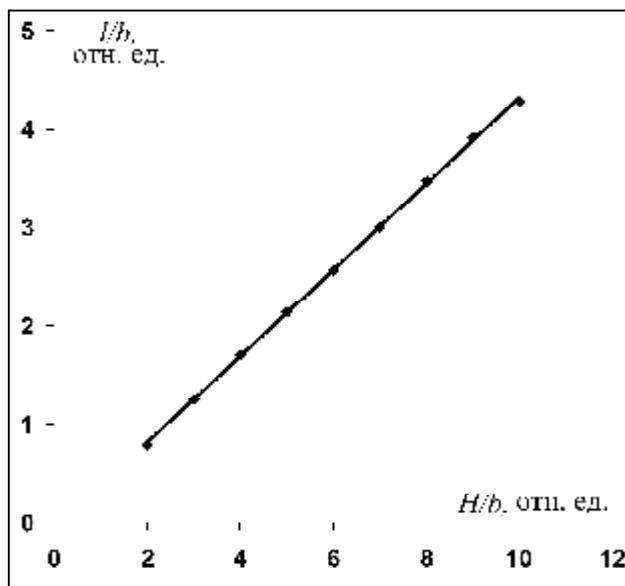


Рис. 2. График зависимости величины полуразноса питающей линии в точках экстремумов от глубины до центра шара

Таблица 1. Расчетные значения E_{\max}

$\rho_2/\rho_1 = 0,001$										
H/b	2	2,5	3	4	5	6	7	8	9	10
E_{\max} , отн.ед.	1	0,3	0,1059	0,0235	0,00745	0,00294	0,00135	0,000686	0,00038	0,000215
$\rho_2/\rho_1 = 1000$										
E_{\max} , отн.ед.	1	0,272	0,0995	0,0216	0,00678	0,00266	0,00121	0,000618	0,000335	0,000197

мальный полуразнос $l = 2,95$ м, а размер объекта $b = 2,07$ м.

Оценивать величину разности потенциалов ΔU необходимо с учетом размера приемной линии $[MN]$, поэтому целесообразнее рассматривать их отношение $\Delta U/[MN]$, которое для малых $[MN]$ стремиться к горизонтальной составляющей напряженности электрического поля (E), и в этом случае структура разреза относительной напряженности поля $E_{\text{отн}} = E/E_{\max}$ не отличается от разреза $\Delta U_{\text{отн}}$.

По результатам расчетов зондирования получили зависимость максимального значения напряженности поля (E_{\max}) от соотношения глубины до центра шара к его радиусу для разных отношений удельных сопротивлений шара и вмещающей среды (ρ_2/ρ_1), когда $\rho_2 < \rho_1$ и $\rho_2 > \rho_1$ (рис. 3а, б), которая может быть аппроксимирована степенной функцией. Для идеально проводящего шара ($\rho_2/\rho_1 = 0,001$) такая функция приближенно равна:

$$E_{\max} = 34,879 (H/b)^{-5,22} \text{ отн.ед.}, \quad (4)$$

а для непроводящего ($\rho_2/\rho_1 = 1000$) шара:

$$E_{\max} = 34,043(H/b)^{-5,26} \text{ отн.ед.} \quad (5)$$

Значения E_{\max} для $\rho_2/\rho_1 = 0,001; 1000$ приведены в табл. 1.

На рис. 3г представлена зависимость изменения максимального значения напряженности поля от соотношения ρ_2/ρ_1 (сплошная линия) и ρ_1/ρ_2 (пунктирная линия), приведенная к $E_{\max}(1000)$.

Как видно из графиков, изменение поля происходит при соотношении удельных сопротивлений шара и вмещающей среды равных 1,1–20. Дальней-

шее повышение (ρ_2/ρ_1) или (ρ_1/ρ_2) практически не влияет на величину E_{\max} .

Чтобы перейти от относительных величин максимальной напряженности поля, представленных в номограммах, к абсолютным значениям $|E_{\max}|$ рассчитали зависимость E_{\max} (отн. ед.) при $H/b = 2$ от радиуса шара (рис. 3в).

Для минимального радиуса $b = 0,25$ м в случае $\rho_2/\rho_1 = 0,001$ $|E_{\max}| = 0,244$, а в случае $\rho_2/\rho_1 = 1000$ $|E_{\max}| = 0,137$ (в расчетах приняли $I = 1$ А).

Полученную зависимость также аппроксимировали степенной функцией:

$$\frac{|E_{\max}|}{0,137} = \frac{0,0625}{b^2}, |E_{\max}| = \frac{0,00856}{b^2} \text{ при } \rho_2 > \rho_1; \quad (6)$$

$$\frac{|E_{\max}|}{0,244} = \frac{0,0625}{b^2}, |E_{\max}| = \frac{0,0153}{b^2} \text{ при } \rho_2 < \rho_1. \quad (7)$$

Рассмотрим пример оценки величины $|E_{\max}|$ по полученным зависимостям.

Пусть $b = 1$ м, $H = 8$ м, $\rho_1 = 200$ Ом·м, $\rho_2 = 20$ Ом·м, $I = 1$ А, по ф-ле (2), выполняя зондирования, рассчитали $|E_{\max}| = 0,00158$ В/м. Находим:

1. Для параметра $H/b = 2$ $|E_{\max}| = 0,0153$ (по ф-ле 7).
2. Зная $\rho_2/\rho_1 = 0,1$ и $H/b = 8$ по номограмме (рис. 3а) определяем $E_{\text{отн}} = E_{\max} \text{ отн. ед.} \approx 0,0005$.
3. $|E_{\max}| = E_{\text{отн}} \cdot 0,0153 \cdot l \cdot \rho_1 = 0,0005 \cdot 0,0153 \cdot 1 \cdot 200 = 0,00152$ В/м,

т.е. величины максимальных напряженностей расчетной и определенной по зависимостям практически совпадают.

Для этого же теоретического примера оценим удельное сопротивление объекта (ρ_2), аппроксимируемого шаром. Зная радиус шара, глубину залегания его центра, сопротивление вмещающей среды и макси-

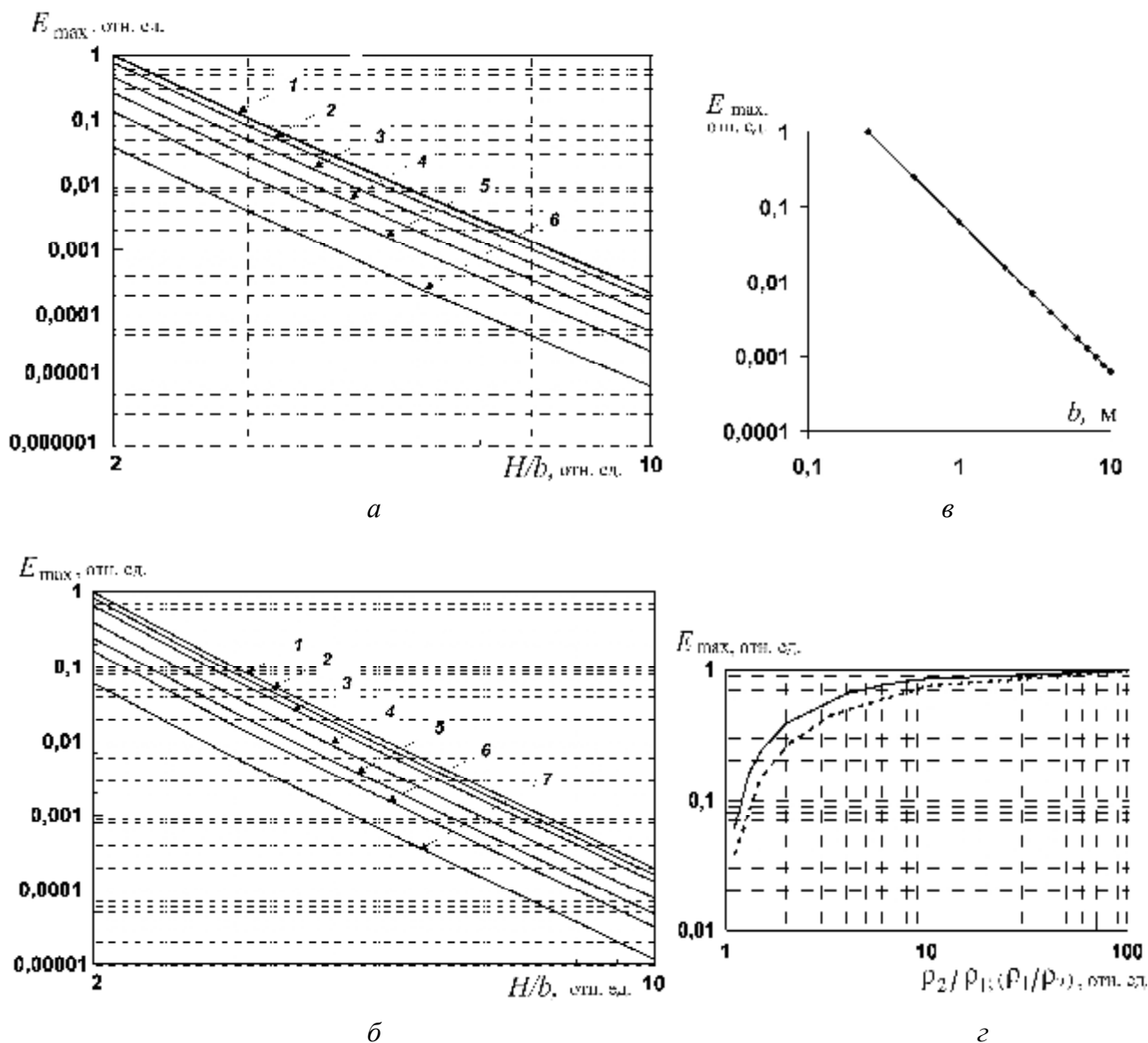


Рис. 3. Зависимость максимального значения напряженности поля (E_{\max}) от соотношения глубины до центра шара к его радиусу для разных отношений удельного сопротивления шара и вмещающей среды (ρ_2/ρ_1): а – 0,001 (1); 0,1 (2); 0,3 (3); 0,5 (4); 0,7 (5); 0,9 (6); б – 1000 (1); 8 (2); 4 (3); 2 (4); 1,5 (5); 1,3 (6); 1,1 (7). Зависимость максимального значения напряженности поля (E_{\max}) от радиуса шара при соотношении $H/b = 2$ (в) и от соотношения сопротивлений вмещающей среды и шара (г): ρ_2/ρ_1 – сплошная линия; ρ_1/ρ_2 – пунктирная линия

мальное значение напряженности поля, находим:

1. $|E_{\max}| = 0,0153$ (по ф-ле 7).

2. $E_{\text{i0i}} = \frac{0,00158}{0,0153 \cdot I \cdot \rho_1} = 0,00051$.

3. По номограмме (рис. 3а), зная $H/b = 8$ и $E_{\text{отн}}$, находим $\rho_2/\rho_1 = 0,1$, отсюда $\rho_2 = 20$ Ом·м. Найти удельное сопротивление ρ_2 можно, используя зависимость E_{\max} от ρ_1/ρ_2 . Для этого определим:

1. $|E_{\max}| = 0,0153$ (по ф-ле 7).

2. $E_{\text{отн}} = 0,000686$ (по табл. 1 или ф-ле 4).

3. $E_{\text{i0i}} = \frac{0,00158}{0,0153 \cdot I \cdot \rho_1 \cdot 0,000686} = 0,752$.

4. Для значения $E_{\text{отн}} = 0,752$ по графику (рис. 3г, пунктирная линия) находим $\rho_1/\rho_2 = 10$, отсюда $\rho_2 = 20$ Ом·м.

Расчеты показали, что при $[MN] \leq b$ приемную линию можно считать малой величиной, тогда напряженность поля будет приблизительно равна отношению разности потенциалов в приемной линии к ее

размеру $E \approx \Delta U / [MN]$. Если $[MN] = 1$ м и $b \geq 1$ м, то в численном выражении величина ΔU близка к E , в этом случае интенсивность максимального значения разности потенциалов ΔU_{\max} оценивается по закономерностям, полученным для E_{\max} .

Чувствительность однополярной установки с увеличением параметра H/b существенно снижается, так для $H/b = 4$ значение E_{\max} (отн. ед.) над проводящим шаром в 43 раза меньше, чем для $H/b = 2$ (табл. 1). Повышение измеряемого сигнала ΔU достигается за счет увеличения размера приемной линии.

На рис. 4а приведены графики изменения максимального значения разности потенциалов от размеров $[MN]$, приведенные к минимальным значениям ΔU_{\max} . Для параметра $H/b = 2$ увеличение приемной линии в шесть раз приводит к увеличению ΔU_{\max} менее чем в два раза, а для $H/b = 5$ – в четыре раза, что очень важно учитывать при измерениях, поскольку величина ΔU_{\max} в рассматриваемых случаях отличается в 57 раз (рис. 4б).

Как показали расчеты, если увеличивать приемную линию так, что $H/[MN] \geq 1,5$, то все структурные особенности на графиках и разрезах ΔU , рассмотренные для малой приемной линии, а также зависимость l/b от H/b , сохраняются.

Заключение

Результаты математического и физического моделирования показали, что чувствительность метода наложения полей в первую очередь зависит от глубины залегания объекта, с увеличением глубины интенсивность аномального поля значительно падает. Отношение удельных сопротивлений вмещающей среды и объекта более чем в 20 раз практически не влияет на величину ΔU_{\max} . Изменение чувствительности однополярной установки регулируется размером приемной линии. Оптимальный размер $[MN]$ не должен превышать половины горизонтальной мощности объекта или быть не больше величины $H/1,5$, при этом сохраняются структурные особенности поля, которые рассмотрены для малых размеров $[MN]$.

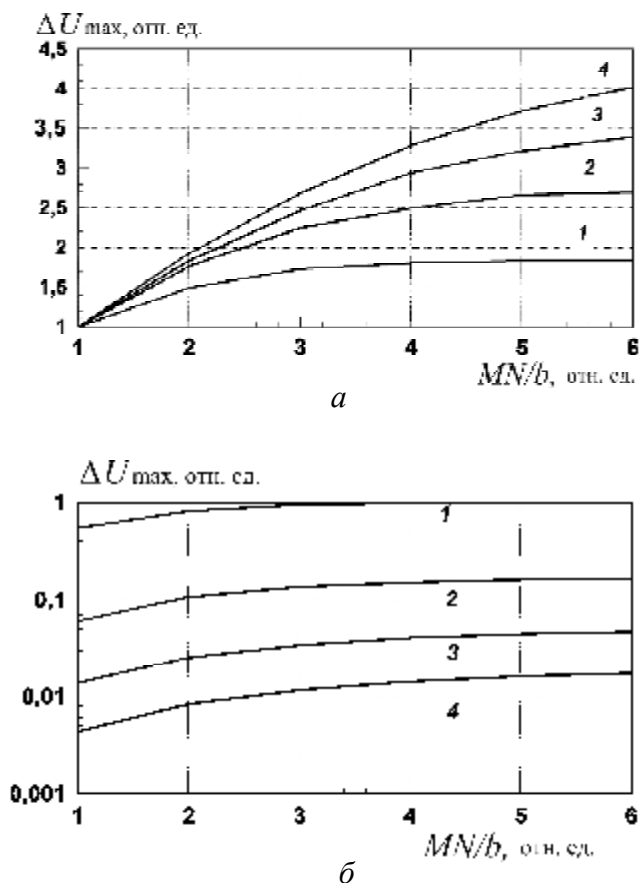


Рис. 4. Графики зависимости максимального значения разности потенциалов от разности приемной линии, приведенные к минимальному значению ΔU_{\max} при $MN/b = 1$ (а) и максимальному значению ΔU_{\max} при $H/b = 2$ (б). Цифры на графиках – параметр H/b : 1 – 2; 2 – 3; 3 – 4; 4 – 5

На разрезах ΔU по максимальным значениям приближенно выделяется верхняя кромка неоднородности, а для изометричных объектов или объектов, имеющих сечение изометричной формы, также определяется глубина до его центра. В случае, когда глубина до верхней кромки объекта меньше чем его вертикальный размер, аномальное поле затухает близко к нижней границе объекта с вмещающей средой. По полученным зависимостям возможна оценка размера и удельного сопротивления геоэлектрической неоднородности, аппроксимируемой шаром.

Литература

Григорьева Н.П. Сравнение аномалий ρ_k над проводящей сферой для различных установок метода постоянного тока // Труды ВИРГ., М.: Госгеолтехиздат, 1953. С. 83–102.

Заборовский А.И. Электроразведка. М.: Гостоптехиздат, 1943. 444 с.

Редозубов А.А. Специальный курс электроразведки. Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2010. 416 с.

Саковцев Г.П. Сравнение чувствительности разных методов профилирования к поверхностным и глубинным неоднородностям // Вопросы разведочной геофизики. М.: Госгеолтехиздат, 1959. Вып. XXXIV. С. 64–71.

Тархов А.Г. Об электроразведочных методах чистой аномалии // Изв. АН СССР. Сер. геофиз. 1957. № 8. С. 979–989.

Федорова О.И. Оценка возможностей метода наложения полей для малоглубинных геоэлектрических исследований // Известия вузов. Горный журнал. 2011. № 6. С. 118–124.