

НОВЫЙ ВАРИАНТ ЧАСТОТНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ЗОНДИРОВАНИЙ С КОНТРОЛИРУЕМЫМИ ИСТОЧНИКАМИ

Р.Б. Журавлева, Д.Г. Миронов

Институт геофизики УрО РАН, 620016, Екатеринбург, ул. Амундсена, 100, Россия

Предложен новый вариант зондирования с использованием нового информационного параметра, имеющего простое аналитическое выражение для однородного полупространства и представленного комбинацией электромагнитных чисел в поле вертикального магнитного диполя, пространственно совмещенных вертикального магнитного и горизонтального электрического диполей либо вертикального магнитного и горизонтального магнитного диполей. Дано сравнение информативности нового варианта зондирования с традиционными методами. Показана лучшая разрешимость кривых зондирования, возможность получения достоверной информации о структуре при работе на более высоких частотах и меньших разносах. Рассмотрены варианты интерпретации при амплитудных и амплитудно-фазовых измерениях.

Структура, информационный параметр, зондирование, частота поля, разнос, удельное электро-сопротивление, разрешающая способность.

A NEW METHOD OF CONTROLLED-SOURCE FREQUENCY INDUCTION SOUNDINGS

R.B. Zhuravleva and D.G. Mironov

We suggest a new inversion method for frequency induction data implying the use of a new parameter, which has a simple analytical form in the case of a uniform subsurface. The new parameter is found from induction numbers measured in the field of a vertical magnetic dipole or a vertical magnetic dipole combined either with a horizontal electrical dipole or with a horizontal magnetic dipole. Compared with the classical methods, the new technique provides better resolved resistivity curves and faithful images of the subsurface at higher frequencies and smaller transmitter-receiver separations. The inversion algorithm is applied to amplitude and amplitude-phase data and provides reliable depth assignment of the detected resistivity layers in the latter case.

Subsurface structure, information parameter, frequency induction sounding, field frequency, separation, resistivity, resolution

Теоретический анализ [Журавлева, 2000, 2006; Журавлева, Миронов, 2005] показал, что наиболее информативным при исследовании субгоризонтальных структур является параметр G , определяемый соотношениями [Электроразведка..., 1989]

$$G = (1 + \kappa r)e^{-\kappa r} = \text{Re } G + i\text{Im } G = \begin{cases} (3e_{\varphi z} - h_{zz})/2 & \text{ВМД} \\ (3h_{ze} - h_{zz})/2 & \text{ВМД} + \text{ГЭД} \\ 3 - (3h_{xx} + h_{zz})/2 & \text{ВМД} + \text{ГМД} \end{cases}, \quad (1)$$

где $e_{\varphi z}$, h_{zz} — электромагнитные числа в поле вертикального магнитного диполя (ВМД), h_{ze} — в поле горизонтального электрического диполя (ГЭД), h_{xx} — в поле горизонтального магнитного диполя (ГМД) с моментом вдоль оси x . Здесь $\kappa = \sqrt{i\omega\mu_0/\rho}$ — волновое число, ρ — удельное сопротивление однородного полупространства, $\omega = 2\pi f$ — круговая частота, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ — магнитная проницаемость немагнитной среды, r — разнос (расстояние между генераторным и приемным датчиками). Зондирование может выполняться в частотном, дистанционном и в изопараметрическом вариантах при фиксированном $\sqrt{f}r$.

На рис. 1 приведены графики зависимости $|G|$, $\text{Re } G$, $\text{Im } G$ от волнового параметра однородного полупространства $p = |\kappa|r = \sqrt{\omega\mu_0/\rho}r$.

При использовании амплитудных измерений интерпретация производится в рамках модели эффективного однородного полупространства, при этом вычисляется

$$\rho_{ef} = \omega\mu_0 r^2 / p_{ef}^2 \quad (2)$$

где величина $p_{ef} = |\kappa r|_{ef}$ определяется по схеме Лагранжа из соответствующей однозначной для однородного полупространства табулированной зависимости величины $|h_z/h_r|$ от волнового параметра p при

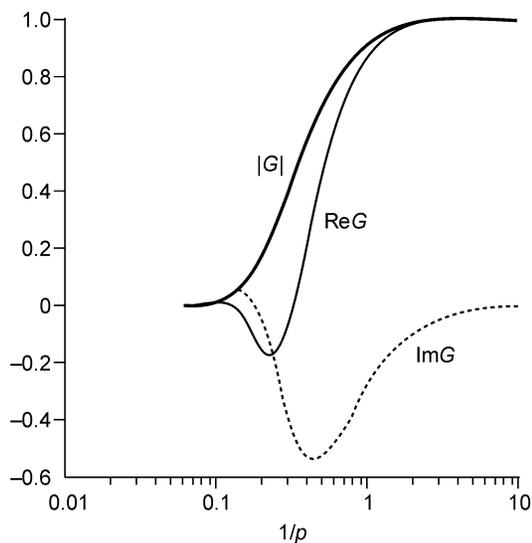


Рис. 1. Графики зависимости величины G от $1/\rho$.

стандартном варианте зондирования или $|G|$ в новом варианте. Заметим, что при использовании любой из указанных в (1) комбинаций источник—приемник получаем единый эффективный параметр kr и единое удельное сопротивление структуры.

Преимущества предлагаемого варианта зондирования и его возможности особенно хорошо видны на типичном для Урала четырехслойном разрезе с верхним слоем наносов и с погруженным электропроводным горизонтом, моделирующим рудную зону с различной глубиной залегания либо с различной контрастностью по электросопротивлению. На рис. 2 для сравнения приведены результаты частотного ($a1$, $a2$) и изопараметрического ($b1$, $b2$) зондирования такого разреза с использованием стандартной методики с определением ρ_{ef} по изме-

рениям $|h_z/h_r|$ в поле ВМД (тонкие линии) и предлагаемой методики с определением $\rho_{ef}(|G|)$. Видно (см. рис. 2, $a1$; $a2$), что частотные кривые $\rho_{ef}(|G|)$ лучше разрешимы по сравнению с $\rho_{ef}(|h_z/h_r|)$, прекрасно

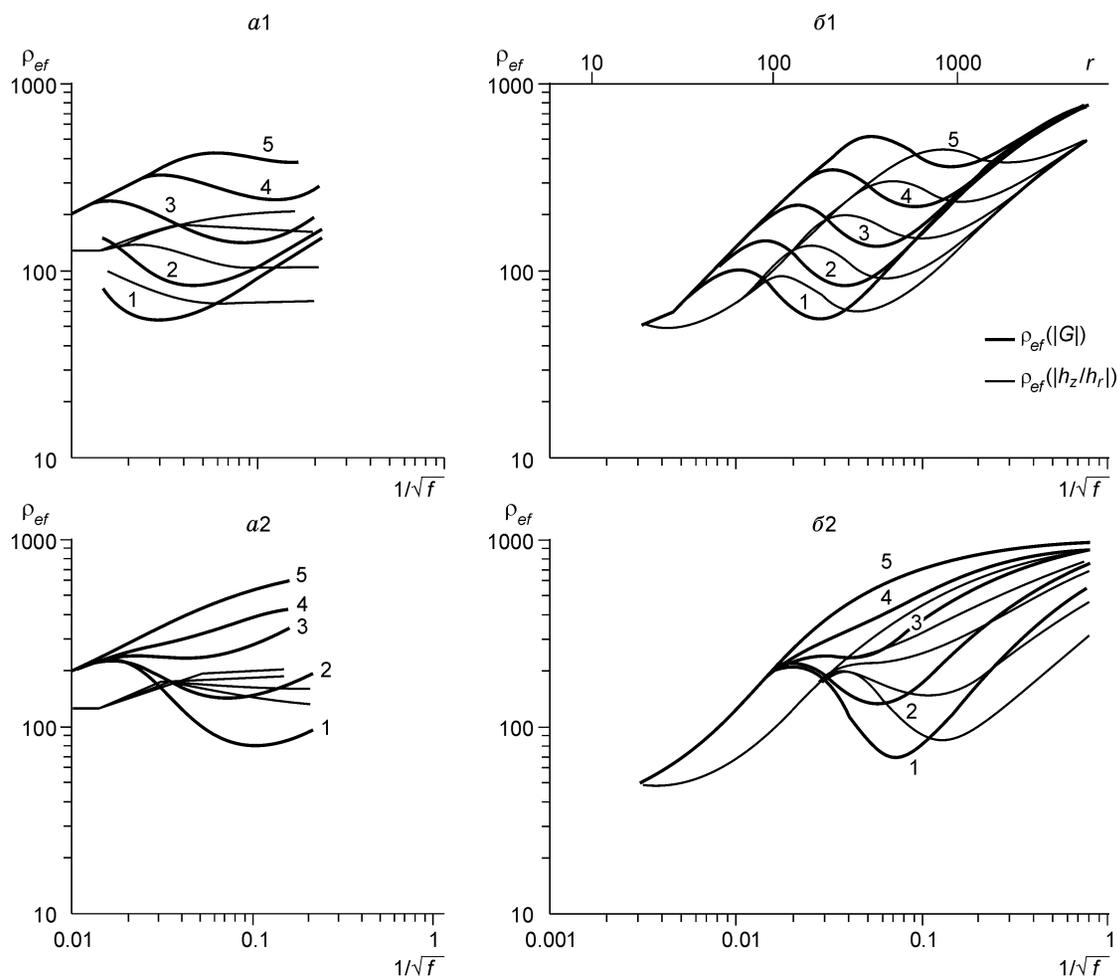
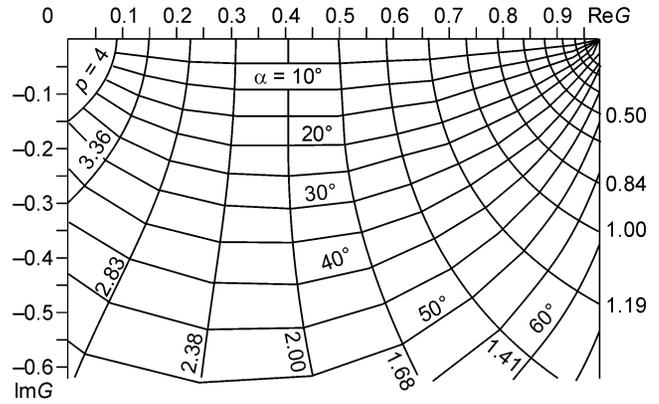


Рис. 2. Четырехслойная структура.

$a1$, $a2$ — частотное зондирование, $r = 200$ м. $b1$, $b2$ — изопараметрическое зондирование, $\sqrt{fr} = 8000$. $\rho_1 = 50$ Ом·м, $h_1 = 20$ м; $\rho_2 = 1000$ Ом·м; $h_3 = 50$ м; $\rho_4 = 1000$ Ом·м, $h_4 = \infty$.

$a1$, $b1$ — Var 1—5: h_2 (м) = 50, 100, 200, 400, 800 соответственно; $\rho_3 = 20$ Ом·м. $a2$, $b2$ — $h_2 = 200$ м; Var 1—5: ρ_3 (Ом·м) = 10, 20, 50, 100, 1000 соответственно.

Рис. 3. Номограмма для определения ρ , α по $\text{Re}G$, $\text{Im}G$.



фиксируют наличие контрастного проводника в структуре и хорошо виден тип разреза, тогда как по $\rho_{ef}(h_z/h_r)$ определить его трудно. В изопараметрическом варианте разрешающая способность зондирований примерно одинакова, но четко видно, что использование параметра $|G|$ позволяет выявить глубинный проводник при частотах примерно в четыре раза более высоких, чем при измерении $|h_z/h_r|$, либо разносах, соответственно, вдвое меньших. Это является принципиальным преимуществом предлагаемого типа зондирований, так как измерения при очень низких частотах обычно осложнены помехами и трудноосуществимы, а с увеличением разноса значительно уменьшаются величины компонент поля, так что они могут стать сравнимы с порогом чувствительности аппаратуры.

При выполнении амплитудно-фазовых измерений можно выполнить интерпретацию по модели эффективной двухслойной среды с определением ее параметров ρ_1 ; h_1 ; ρ_2 . Для подбора волнового параметра

$$(\kappa r)_k = \text{Re}(\kappa r)_k + i \text{Im}(\kappa r)_k = |\kappa r|_k e^{i\alpha}, \quad (4)$$

такого, чтобы выполнялось соотношение (1), можно использовать номограмму (рис. 3) либо специально разработанную нами программу на основе метода итераций. Использование ее показало, как и следовало ожидать, что для однородного полупространства имеем $\alpha = \pi/4$, для структуры с проводником в основании $\alpha < \pi/4$, а для структуры с высокоомным основанием $\alpha > \pi/4$.

Казалось бы, для определения трех базовых параметров ρ_1 , h_1 , ρ_2 необходимо иметь три независимых измерения, а не два (амплитуда и фаза). В предположении, что мы не имеем сведений о параметрах структуры, мы приняли за удельное сопротивление ρ_1 величину ρ_{ef} , определяемую по (2). Кроме того,

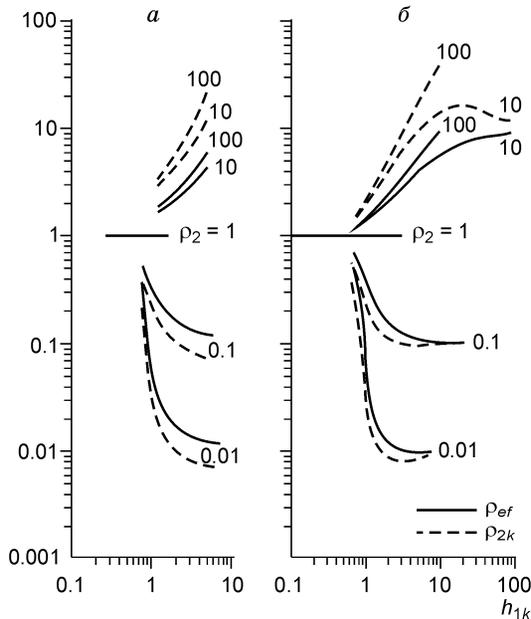


Рис. 4. Двухслойная структура.

a — частотное зондирование, $r/h_1 = 2$; *б* — изопараметрическое зондирование, $k_1 r = 0.5$.

$\rho_1 = 1$; $h_1 = 1$; $\rho_2 = \text{Var}$; $h_2 = \infty$. Величина ρ_2 указана на рисунке.

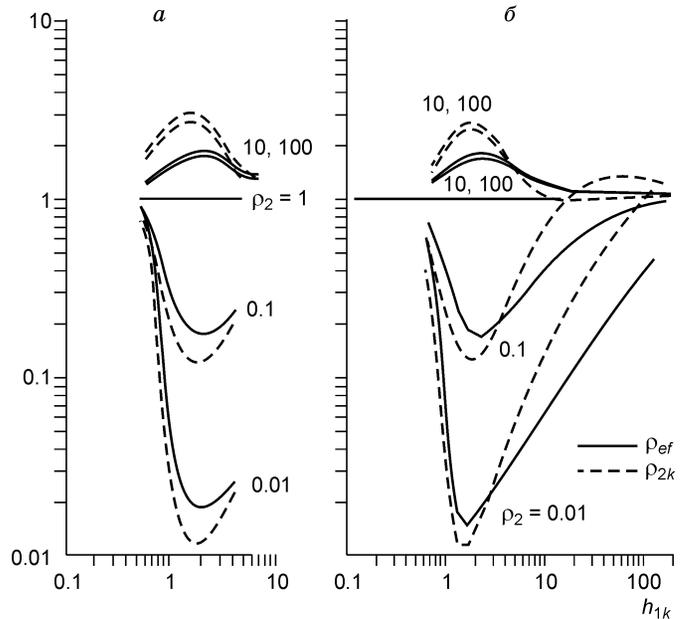


Рис. 5. Трехслойная структура.

a — частотное зондирование, $r/h_1 = 2$; *б* — изопараметрическое зондирование, $k_1 r = 0.5$. $\rho_1 = 1$, $h_1 = 1$; $\rho_2 = \text{Var}$, $h_2 = 2$; $\rho_3 = 1$, $h_3 = \infty$.

используя идею из работы [Козулин, 1960], что в довольно широком диапазоне частот удовлетворительно работает соотношение $\kappa_k = \kappa_1 / \text{th cth} \left(\kappa_1 h_1 + ar \text{ th cth} \sqrt{\rho_2 / \rho_1} \right)$, можем записать:

$$ZZ = \text{th cth} \left[\kappa_1 h_1 + ar \text{ th cth} \sqrt{\rho_2 / \rho_1} \right] = |\kappa r|_{ef} / |\kappa r|_k \cdot e^{i(\pi/4 - \alpha)},$$

$$T = \kappa_1 h_1 + ar \text{ th cth} \sqrt{\rho_2 / \rho_1} = \begin{cases} 1/2 \log ((1 + ZZ)/(1 - ZZ)) & \text{при } |ZZ| < 1 \\ 1/2 \log ((1 + ZZ)/(ZZ - 1)) & \text{при } |ZZ| > 1. \end{cases}$$

Тогда получим [Журавлева, 2006] величину удельного сопротивления

$$\rho_{2k} = \rho_{1k} \cdot \begin{cases} \text{th}^2(\text{Re } T - \text{Im } T) & \text{при } \alpha \leq \pi/4 \\ \text{cth}^2(\text{Re } T + \text{Im } T) & \text{при } \alpha > \pi/4 \end{cases} \quad (5)$$

Величина h_1 должна определяться из $\text{Im } T$ как

$$h_1 = |\text{Im } T| \delta, \quad \delta = \sqrt{2} r / |\kappa r|_{ef}. \quad (6)$$

Расчеты изменения удельного сопротивления с глубиной для различного типа структур с использованием (2) и (5) показали удовлетворительное согласие с моделью, а определение глубины по (6) плохо соответствовало истинной глубине. В результате численных экспериментов мы выбрали в качестве глубины, к которой следует отнести найденную величину ρ_{2k} , параметр

$$h_{1k} = \sqrt{2h_1 \delta} = \delta \sqrt{2|\text{Im } T|}. \quad (7)$$

На рис. 4, 5 представлены результаты расчетов (5), (7) для двух- и трехслойных структур при частотном и при изопараметрическом зондированиях. Видно, что величина ρ_{2k} более контрастно по сравнению с ρ_{ef} выделяет наличие высокоомного или низкоомного горизонта, но при низких частотах (большие h_{1k})

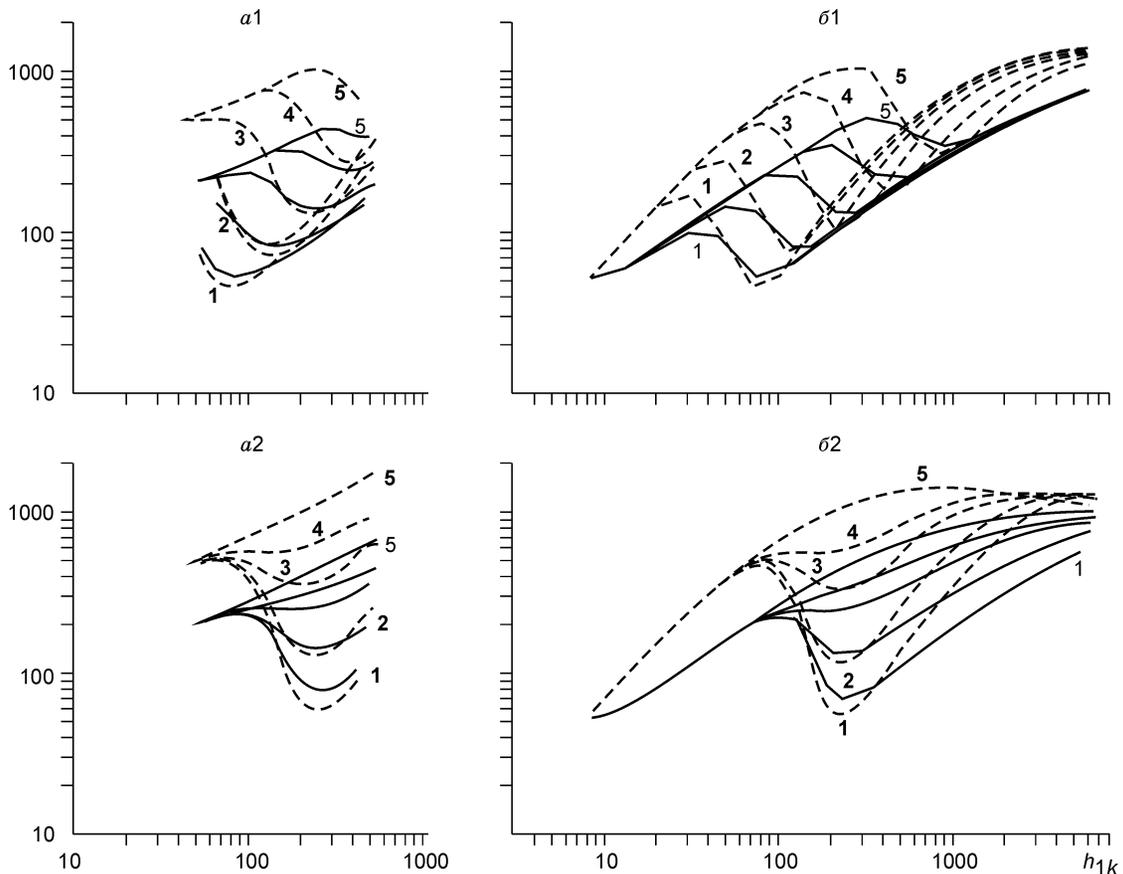


Рис. 6. Четырехслойная структура.

Усл. и пояснения см. на рис. 2.

она слабо осциллирует относительно асимптоты, соответствующей сопротивлению основания структуры, тогда как ρ_{ef} выходит на асимптоту при тех же h_{1k} . Но существенным, на наш взгляд, является достаточно хорошее совпадение положения экстремума величины ρ_{2k} с глубиной центра залегания контрастного по электросопротивлению второго слоя (см. рис. 4), а надежная привязка выделяемых при зондированиях горизонтов к глубине является обычно слабым местом различных методов.

На рис. 6 показана зависимость ρ_{ef} и ρ_{2k} от величины h_{1k} для ранее рассмотренного четырехслойного разреза. Видно, что положение максимумов и минимумов примерно соответствует глубине центров залегания соответственно высокоомного и низкоомного слоев, что подтверждает логичность предложенного нами (7) способа привязки интерпретационных значений удельного электросопротивления к глубине.

Выводы. В новом варианте электромагнитных зондирований в гармоническом режиме предлагается использовать в качестве информационного параметра величину G (1), определяемую по результатам измерений в поле ВМД, ВМД + ГЭД или ВМД + ГМД. Использование в качестве информационного параметра величины G позволяет получить единое кажущееся сопротивление при использовании различных систем генератор—приемник.

Использование информационного параметра G обеспечивает более высокую разрешающую способность и позволяет выявлять глубинные объекты при меньших разносах и более высоких частотах, когда измеряемый сигнал не слишком мал и превышает порог чувствительности аппаратуры.

Использование амплитудно-фазовых измерений позволяет достаточно надежно определить глубину контрастных по электросопротивлению горизонтов.

ЛИТЕРАТУРА

Журавлева Р.Б. О повышении информативности величины эффективного сопротивления при зондированиях с контролируемым источником // Теория и практика геоэлектрических исследований. Екатеринбург, УрО РАН, 2000, с. 182—188.

Журавлева Р.Б. Новый способ электромагнитных зондирований и его информационные возможности // Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей. Екатеринбург, 2006, с. 114—117.

Журавлева Р.Б., Миронов Д.Г. Новый вариант зондирований с комплексированием измерений при магнитном и электрическом возбуждении поля // Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей. Пермь, 2005, с. 86—88.

Козулин Ю.Н. К теории частотного электромагнитного зондирования многослойных структур // Изв. АН СССР, Сер. геофиз. М., 1960, вып. 8, с. 1204—1212.

Электроразведка, справочник геофизика, т. 1. М., Недра, 1989, с. 226—229.

*Рекомендована к печати 27 марта 2008 г.
М.И. Эповым*

*Поступила в редакцию
20 декабря 2007 г.*