Индукционные зондирования слоистых структур

Арзамасцев Е. В.¹, Астафьев П. Ф.¹, Байдинов С. В.¹, Коноплин А. Д.¹,
Ратушняк А. Н.^{1*}

¹ Институт геофизики УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия

*e-mail: geo_info@mail.ru

Реферат

Цель работы. Конечным результатом исследований является разработка технологии проведения непрерывного многочастотного индукционного профилирования с измерением составляющих магнитного поля на протяженных трассах исследований и детализация участков с помощью дистанционных индукционных зондирований.

Методика проведения исследований. Теоретические и экспериментальные исследования закономерностей изменения составляющих магнитного поля гармонического вертикального магнитного диполя над неоднородным слоистым разрезом. Математическое моделирование магнитного поля гармонического вертикального магнитного диполя в слоистой неоднородной среде.

Анализ результатов. Показана информативность характеристик составляющих магнитного поля гармонического вертикального магнитного диполя в низкочастотной зоне индукции при исследовании неоднородных геоэлектрических разрезов и соответствие получаемых результатов типу неоднородного разреза при дистанционных индукционных зондированиях.

Область применения результатов. Для протяженных участков исследований трасс (автомобильные и железные дороги, нефте- и газопроводы, линии электропередач и т. д.) определена технологическая последовательность измерений характеристик магнитного поля вертикального магнитного диполя для определения геоэлектрических свойств слоистого разреза путем проведения непрерывного многочастотного профилирования, определения однородных участков строения среды и их детализация путем дискретных исследований методом индукционных дистанционных зондирований.

Ключевые слова: гармоническое электромагнитное поле; индукционные зондирования; вертикальный магнитный диполь; кажущееся электрическое сопротивление.

Введение. Индукционные зондирования, несмотря на более сложную техническую реализацию по сравнению с электрическими зондированиями, имеют ряд преимуществ благодаря бесконтактным способам возбуждения и измерения магнитного поля. Вопросам применения индуктивных методов зондирования с вертикальным магнитным диполем (ВМД) над слоистой средой посвящено значительное количество работ. Анализ закономерностей поведения магнитного поля позволяет определить их информативные характеристики при наиболее технически простых модульных измерениях составляющих поля, отражающих строение слоистой среды по удельному электрическому сопротивлению [1–3]. Практическое применение индукционных зондирований при исследованиях слоистых сред показывает, что в вопросах теории, методики проведения и интерпретации получаемых результатов еще остается ряд вопросов, исследованию которых посвящена настоящая работа.

Если магнитный диполь с гармоническим режимом тока и моментом $M_z^* = JSn$ (J – сила тока; Sn – площадь диполя), направленным по нормали к границе

земля–воздух, приподнят на высоту d над поверхностью проводящего немагнитного полупространства, то для точек в верхнем непроводящем полупространстве $z \geq 0$ составляющие напряженности магнитного поля на высоте точки измерений z имеют вид [1–3]:

$$H_z = -\frac{M_z^*}{4\pi} \left(\frac{1}{R^3} - \int_0^\infty \lambda^2 \alpha \exp(-\lambda(z+d)) J_0(\lambda r) d\lambda \right); \quad (1)$$

$$H_r = \frac{M_z^*}{4\pi} \int_0^\infty \lambda^2 \alpha \exp(-\lambda(z+d)) J_1(\lambda r) d\lambda, \quad (2)$$

где λ – параметр разделения переменных в функции Бесселя; r – расстояние от диполя до точки измерений.

Для нижнего полупространства, характеризуемого набором слоев с различными удельными электропроводностями, различия в формулах для расчета магнитного поля (1) и (2) будут отличаться от полупространства только коэффициентом α , определяемым частотой тока в диполе, проводящими свойствами слоев и глубиной их положения.

Полупространство. Для нижнего полупространства с удельной электропроводностью σ коэффициент α равен [1, 2]

$$\alpha = (\lambda - m) / (\lambda + m),$$

где $m = \sqrt{\lambda^2 + k^2}$; $k^2 = j\omega\mu_0\sigma$.

Если магнитный диполь и точка наблюдений расположены на границе земля–воздух ($d = 0$ и $z = 0$), составляющие напряженности поля (1), (2) с помощью интегралов Зоммерфельда и Фостера выражаются через элементарные и специальные функции в виде [3]

$$H_z = -\frac{M_z^*}{4\pi r^3} \frac{2}{jp} \left\{ 9 - \left[9 + 9\sqrt{jp} + 4jp + jp\sqrt{jp} \right] \exp(-\sqrt{jp}) \right\}; \quad (3)$$

$$H_r = \frac{M_z^*}{4\pi r^3} \left\{ 8 - 8\sqrt{jp} I_1 K_0 + jp I_0 K_0 - [16 + jp] I_1 K_1 \right\}, \quad (4)$$

где I_0, I_1 – модифицированные функции Бесселя; K_0, K_1 – функции Макдональда нулевого и первого порядков от аргумента $\sqrt{jp} / 2$, безразмерный волновой параметр p определен как $jp = k^2 r^2 = j\omega\mu_0\sigma r^2$.

Для индукционной (ближней) зоны составляющая поля H_z от волнового параметра среды p практически не зависит, оставаясь близкой к значению постоянного тока $H_z = -M_z^* / (4\pi r^3)$ вплоть до значений $p < 1$. При этом составляющая поля H_r изменяется прямо пропорционально волновому параметру среды до значений, близких $p = 1$. Это позволяет по величине отношения составляющих поля определить волновой параметр среды из соотношения $|H_z| / |H_r| = 4 / p$ и кажущееся удельное электрическое сопротивление проводящего полупространства из

соотношения $p = \omega \mu_0 r^2 / \rho$ [4]. Аналогичную зависимость ρ_k от волнового параметра среды имеет отношение большой H_a и малой H_b осей эллипса поляризации магнитного поля $|H_a|/|H_b|$, поскольку оно является эквивалентной характеристикой [5]. Для расширения диапазона исследований при использовании высоких частот для низкоомных сред при значениях волнового параметра $p > 1$ в работе [6] предложено при определении ρ_k использовать дополнительный нормирующий параметр D к низкочастотной асимптотике

$$\rho_k = 2 \cdot 10^{-6} D f r^2 |H_z| / |H_r|. \quad (5)$$

Величина параметра D наилучшим образом аппроксимируется формулой $D = \exp(-1,28|H_r|/|H_z|)$, что позволяет существенно расширить диапазон дистанционных индукционных исследований с вертикальным магнитным диполем [7].

Рис. 1. Разрез типа проводник–диэлектрик:
 $\rho_1 = 20 \text{ Ом} \cdot \text{м}$; $\rho_2 = 200 \text{ Ом} \cdot \text{м}$; $f = 100 \text{ Гц}$; $S_{\text{пл}}$ – S-плоскость;
 $1 - h = 0,5 \text{ м}$; $2 - h = 1 \text{ м}$; $3 - h = 2 \text{ м}$; $4 - h = 5 \text{ м}$
 Fig. 1. Conductor-dielectric section:
 $\rho_1 = 20 \text{ } \Omega \cdot \text{m}$; $\rho_2 = 200 \text{ } \Omega \cdot \text{m}$; $f = 100 \text{ Hz}$; $S_{\text{пл}}$ – S-plane; $1 - h = 0.5 \text{ m}$;
 $2 - h = 1 \text{ m}$; $3 - h = 2 \text{ m}$; $4 - h = 5 \text{ m}$

Для каждой точки измерений составляющих магнитного поля на заданной дискретной частоте f при различных разнесах r_i от вертикального магнитного диполя можно построить зависимость кажущегося удельного сопротивления проводящего полупространства ρ_k , подобную типам кривых вертикальных электрических зондирований (ВЭЗ) над слоистой средой.

Поскольку алгоритм решения задач для слоистых сред описан во множестве научных работ, например [2, 3, 8, 9], остановимся на результатах решений, описываемых коэффициентом α в формулах (1) и (2).

Двухслойная среда. Для случая, когда под границей земля–воздух есть слой мощностью h с удельной электропроводностью σ_1 , а подстилающая среда имеет удельную электропроводность σ_2 , коэффициент α имеет вид [1–3]:

$$\alpha = \frac{(\lambda - m_1)(m_1 + m_2) + (\lambda + m_1)(m_1 - m_2)\exp(2m_1h)}{(\lambda + m_1)(m_1 + m_2) + (\lambda - m_1)(m_1 - m_2)\exp(2m_1h)}, \quad m_i = \sqrt{\lambda^2 + j\omega\mu_0\sigma_i}. \quad (6)$$

Проводящая S -плоскость на границе земля–воздух. Если слой 1 обладает высокой электропроводностью $\sigma_1 \gg \sigma_2$ и его толщина $h \ll r$, то при $\sigma_1 \rightarrow \infty$ и $h \rightarrow 0$ их произведение $\sigma_1 \cdot h = S$ имеет размерность продольной проводимости (См) и коэффициент α принимает вид

$$\alpha = \frac{\lambda - m_2 - j\omega\mu_0 S}{\lambda + m_2 + j\omega\mu_0 S}. \quad (7)$$

Это решение получено при использовании разрывных граничных условий для магнитного поля на S -плоскости [10].

Рис. 2. Тип H:

$\rho_1 = \rho_3 = 200 \text{ Ом} \cdot \text{м}$; $h_1 = 10 \text{ м}$; $d_2 = 0,5 \text{ м}$; $f = 1 \text{ кГц}$;
 $S_{\text{пл}} - S\text{-плоскость}$; $1 - \rho_2 = 2,5 \text{ Ом} \cdot \text{м}$; $2 - \rho_2 = 5 \text{ Ом} \cdot \text{м}$;
 $3 - \rho_2 = 10 \text{ Ом} \cdot \text{м}$; $4 - \rho_2 = 20 \text{ Ом} \cdot \text{м}$

Fig. 2. N-type:

$\rho_1 = \rho_3 = 200 \text{ } \Omega \cdot \text{m}$; $h_1 = 10 \text{ m}$; $d_2 = 0.5 \text{ m}$; $f = 1 \text{ kHz}$;
 $S_{\text{pl}} - S\text{-plane}$; $1 - \rho_2 = 2.5 \text{ } \Omega \cdot \text{m}$; $2 - \rho_2 = 5 \text{ } \Omega \cdot \text{m}$;
 $3 - \rho_2 = 10 \text{ } \Omega \cdot \text{m}$; $4 - \rho_2 = 20 \text{ } \Omega \cdot \text{m}$

Трехслойная среда. Для случая, когда нижняя среда характеризуется набором из трех слоев с глубинами нижних кромок и удельными электропроводностями h_1, h_2 и σ_i ; $k_i^2 = j\omega\mu_0\sigma_i$, где i – номер слоя ($i = 1, 2, 3$), коэффициент α имеет вид, подобный приведенному в работе [1]:

$$\alpha = [(R_{01}M_{12} + M_{01}R_{12}\exp(2m_1h_1))M_{23}\exp(2m_2h_1) + (R_{01}R_{12} + M_{01}M_{12}\exp(2m_1h_1)) \times \\ \times R_{23}\exp(2m_2h_2)] / [(M_{01}M_{12} + R_{01}R_{12}\exp(2m_1h_1))M_{23}\exp(2m_2h_1) + \\ + (M_{01}R_{12} + R_{01}M_{12}\exp(2m_1h_1))R_{23}\exp(2m_2h_2)], \quad (8)$$

где $R_{01} = \lambda - m_1$; $R_{12} = m_1 - m_2$; $R_{23} = m_2 - m_3$; $M_{01} = \lambda + m_1$; $M_{12} = m_1 + m_2$; $M_{23} = m_2 + m_3$. В частном случае $h_1 = h_2$, $\sigma_2 = \sigma_3$ ($R_{23} = 0$) и $h_1 = 0$, $\sigma_1 = 0$ ($R_{01} = 0$) коэффициент α соответствует выражению (6) для двухслойной среды.

Отметим особо, что выражение (8) не сводится к рекуррентному виду, выражаемому через гиперболические функции, как это выполнено методом аналогии для слоистой среды с источником в виде горизонтального электрического диполя [11].

Погруженная проводящая S -плоскость. Если слой 2 обладает высокой электропроводностью $\sigma_1 \ll \sigma_2 \gg \sigma_3$ и малой толщиной $d_2 = h_2 - h_1$, т. е. $r \gg d_2 \ll h_1$, то при $\sigma_2 \rightarrow \infty$ и $d_2 \rightarrow 0$ их произведение $\sigma_2 \cdot d_2 = S$. Коэффициент α может быть получен из разрывных граничных условий для магнитного поля, пересекающего границу с поверхностным током [10]:

$$\alpha = \frac{R_{01}(M_{13} + j\omega\mu_0 S) + M_{01}(R_{13} - j\omega\mu_0 S)\exp(2m_1 h)}{M_{01}(M_{13} + j\omega\mu_0 S) + R_{01}(R_{13} - j\omega\mu_0 S)\exp(2m_1 h)}. \quad (9)$$

Аппроксимация тонкого проводящего слоя S -плоскостью позволяет уменьшить число расчетных параметров для моделей, соответствующих проводящему погруженному слою и разрезу типа H . Кроме того, решение задачи с погруженной S -плоскостью позволяет сопоставить получаемые расчеты с результатами, полученными с использованием коэффициента α для тонкого проводящего слоя, определяемого формулой (8), или для трехслойной среды, полученными по рекуррентной формуле, предложенной в работе [11].

Рис. 3. Тип K :

$\rho_1 = \rho_3 = 20 \text{ Ом} \cdot \text{м}$; $\rho_2 = 200 \text{ Ом} \cdot \text{м}$; $d_1 = 5 \text{ м}$; $f = 100 \text{ Гц}$;
 1 – $d_2 = 5 \text{ м}$; 2 – $d_2 = 10 \text{ м}$; 3 – $d_2 = 20 \text{ м}$; 4 – $d_2 = 50 \text{ м}$

Fig. 3. K-type:

$\rho_1 = \rho_3 = 20 \text{ } \Omega \cdot \text{m}$; $\rho_2 = 200 \text{ } \Omega \cdot \text{m}$; $d_1 = 5 \text{ m}$; $f = 100 \text{ Hz}$;
 1 – $d_2 = 5 \text{ m}$; 2 – $d_2 = 10 \text{ m}$; 3 – $d_2 = 20 \text{ m}$; 4 – $d_2 = 50 \text{ m}$

Выражение для коэффициента α для среды из четырех слоев с различными глубинами нижних кромок и удельными электропроводностями приведено в работе [1].

Расчеты магнитного поля ВМД над слоистой средой. Для расчета составляющих напряженностей магнитного поля, создаваемого переменным вертикальным магнитным диполем над слоистой средой, создано программное обеспечение для расчета поля на дискретном спектре частот от 10^1 до 10^5 Гц при различных разносах диполя и точек наблюдений. Программирование выполнено на языке FORTRAN стандарта Fortran-90 с использованием пакета Fortran Power Station 4.0 и программного комплекса Wolfram Mathematica 7. Сопоставление получаемых результатов показывает, что необходимая точность проводимых вычислений преобразований Ханкеля с функциями Бесселя по формулам (1), (2) с помощью цифрового фильтра Андерсона достигается при малых, но ненулевых значениях

показателя степени ($z + d$) [12]. По выходным данным комплексных составляющих поля H_z и H_r вычисляются отношение модулей составляющих $|H_z|/|H_r|$, фазовые углы и характеристики эллиптически поляризованного магнитного поля по формулам, приведенным в работе [5].

Тестирование созданного программного обеспечения выполнено при расчете магнитного поля ВМД в частном случае однородного полупространства, выражаемом через аналитические и специальные функции (3) и (4), представленное в работе [8] в виде таблиц значений компонент поля и их отношений в зависимости от волнового параметра среды p .

Двухслойная среда. Для типичного разреза типа *проводник–диэлектрик* результаты расчета кажущегося электрического сопротивления по формуле (5) приведены на рис. 1 для различных мощностей слоя, включая случай пласта малой мощности (S -плоскость).

Рис. 4. Составляющие B_z и B_r/f при частотном зондировании $r = 20$ м с вертикальным магнитным диполем с моментом $M_z = 0,52 \text{ A} \cdot \text{м}^2$

Fig. 4. B_z and B_r/f components under frequency sounding $r = 20$ m with vertical magnetic dipole with the magnetic moment $M_z = 0,52 \text{ A} \cdot \text{м}^2$

Как видно из приведенных кривых, ρ_k с увеличением расстояния от источника изменяется от сопротивления, близкого к истинному значению верхнего слоя при $r \rightarrow 0$, к сопротивлению основания среды. Типы кривых ρ_k при дистанционных индукционных зондированиях (ДИЗ) на фиксированной частоте соответствуют типам двухслойного разреза. Полученные результаты соответствуют расчетам, приведенным в работах [6, 13, 14]. Расчеты магнитного поля по формулам (1), (2) с коэффициентом α для тонкого проводящего пласта (формула (6)) соответствуют расчетам поля с S -плоскостью на границе *земля–воздух* (7), на рис. 1 представлено для тонкого пласта мощностью 0,5 м при $\rho_1 = 20 \text{ Ом} \cdot \text{м}$, что дает величину продольной проводимости $S = 0,025 \text{ См}$.

Типы трехслойных кривых ДИЗ. Расчеты составляющих магнитного поля по формулам (1)–(2) разреза типа H для погруженного проводящего пласта малой мощности $d_2 = 0,5$ м (штриховые линии) для случая α , описываемого формулой (8), соответствуют расчетам поля с погруженной проводящей S -плоскостью (сплошные линии) для случая α , описываемого формулой (9) для набора значений удельного электрического сопротивления пласта ρ_2 (рис. 2).

Полученные закономерности поведения кривых ρ_k при дистанционных индукционных зондированиях на фиксированной частоте соответствуют расчетам поля, приведенным в работах [15, 16].

Типы кривых ρ_k при дистанционных индукционных зондированиях на фиксированной частоте соответствуют типам трехслойных разрезов H и K (рис. 2, 3).

Закономерности изменения магнитного поля ВМД для трехслойной среды, выполняемые с использованием коэффициента α по точной формуле (8), не соответствуют расчетам поля с помощью рекуррентной формулы [17, 18].

Рис. 5. Кривые ρ_k при частотном зондировании двухслойной среды: $\rho_1 = 20 \text{ Ом} \cdot \text{м}$; $\rho_2 = 200 \text{ Ом} \cdot \text{м}$; на разnose $r = 20 \text{ м}$; 1 – $h = 0,5 \text{ м}$; 2 – $h = 1 \text{ м}$; 3 – $h = 2 \text{ м}$; 4 – $h = 5 \text{ м}$; 5 – $h = 10 \text{ м}$

Fig. 5. Curves ρ_k under frequency sounding of the two-layered earth: $\rho_1 = 20 \text{ } \Omega \cdot \text{m}$; $\rho_2 = 200 \text{ } \Omega \cdot \text{m}$; at a span $r = 20 \text{ m}$; 1 – $h = 0.5 \text{ m}$; 2 – $h = 1 \text{ m}$; 3 – $h = 2 \text{ m}$; 4 – $h = 5 \text{ m}$; 5 – $h = 10 \text{ m}$

Использование частотных характеристик составляющих магнитного поля на фиксированном разnose r для решения задачи расчленения слоистой разреза непригодно, так как магнитное поле в ближней зоне (зоне индукции) нечувствительно к сопротивлению слоистой среды [5, 19, 20].

На рис. 4 приведены экспериментальные кривые измерений составляющих магнитного поля B_z и B_r на 27 частотах в диапазоне 0,1–7 кГц на разnose 20 м над слоистой средой (по данным ВЭЗ) [21]. Величина B_r , составляющей магнитного поля приведена к рабочей частоте f , поскольку она линейно зависит от нее.

На рис. 5 приведены теоретические кривые ρ_k , определяемые по формуле (5) при частотных индукционных зондированиях над двухслойной средой на разnose $r = 20 \text{ м}$ для модели среды *проводник–диэлектрик*, представленной на рис. 1.

Как видно из приведенных кривых, если величина H_z составляющей магнитного поля соответствует полю постоянного тока и практически не зависит от частоты и, соответственно, удельного сопротивления среды, то величина H_r составляющей поля над слоистой средой соответствует полю с некоторой «эффективной» величиной удельного сопротивления. При расчете величины ρ_k по формуле (5) эта зависимость от частоты сокращается. Однако представленные на рис. 5 зависимости показывают, что при проведении электромагнитного профилирования на одной частоте сохраняется зависимость величины H_r составляющей поля и ρ_k соответственно при изменении мощности верхнего слоя. Для указанной модели двухслойной среды *проводник–диэлектрик* увеличение мощности приводит

к уменьшению определяемой величины ρ_k , а при обратном соотношении удельных сопротивлений слоя и подстилающей среды величина ρ_k будет увеличиваться.

При проведении фазочувствительных измерений составляющих магнитного поля есть возможность использовать для расчета кажущегося удельного сопротивления среды не отношение составляющих поля $|H_z|/|H_r|$, а отношение полуосей эллипса поляризации магнитного поля $|H_a|/|H_b|$ по той же формуле (5). Поскольку оси эллипса поляризации магнитного поля являются физическими эквивалентами пространственных составляющих [5], получаемые типы кривых ρ_k дистанционных зондирований также соответствуют типам разрезов. При этом использование для интерпретации отношения величин полуосей эллипса поляризации предпочтительнее, так как позволяет исключить из результатов измерений погрешности, связанные с нарушением пространственной ориентировки датчиков z и r составляющих магнитного поля.

Выполненные исследования позволяют при изучении геоэлектрического строения исследуемой среды в рамках горизонтально-слоистой модели определить технологию проведения индуктивных электромагнитных исследований методами профилирования и зондирования при непрерывных и дискретных измерениях поля [20].

При проведении непрерывного индукционного профилирования с источником в виде вертикального магнитного диполя измерения составляющих гармонического магнитного поля проводят на ряде (3 и более) дискретных частот. Средняя (оптимальная) частота выбирается из предварительных измерений поля на спектре частот для заданного разброса, определяемого исходя из требуемой глубины исследований. Оптимальной следует принять частоту, соответствующую волновому параметру среды вблизи $p = 0,1$, имея в виду возможное изменение удельного сопротивления среды как в большую, так и в меньшую сторону с изменением волнового параметра в зоне индукции при рабочем диапазоне $0,01 \leq p \leq 1$. Непрерывное индукционное профилирование позволяет определить участки исследуемой трассы, в пределах которых изменения магнитного поля близки к постоянным значениям (или изменяются плавно). Для исключения погрешностей измерений, обусловленных изменением ориентировки датчиков магнитного поля и момента источника, Re и Im квадратуры и пространственные компоненты комплексных составляющих магнитного поля пересчитываются в составляющие большой и малой осей эллипса поляризации, по которым определяются значения кажущегося удельного сопротивления среды ρ_k (5). В пределах исследуемых однородных участков ρ_k определение физико-геометрических параметров слоистой среды выполняют по результатам проведенных дистанционных индукционных зондирований на дискретной частоте.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гасаненко Л. Б. Поле вертикального гармонического магнитного диполя над поверхностью многослойной структуры // Ученые записки ЛГУ. Вопросы геофизики. 1959. № 278. С. 164–173.
2. Заборовский А. И. Переменные электромагнитные поля в электроразведке. М.: МГУ, 1960. 186 с.
3. Краев А. П. Основы геоэлектрики. Л.: Недра, 1965. 587 с.
4. Вешев А. В., Ивочкин В. Г. Электропрофилирование с определением эффективных параметров среды по амплитудным и амплитудно-фазовым измерениям // Геофизическое приборостроение. 1963. Вып. 14. С. 61–67.
5. Светов Б. С. Теория, методика и интерпретация материалов низкочастотной индуктивной электроразведки. М.: Недра, 1973. 256 с.
6. Вешев А. В., Любцева Е. Ф., Леончиков В. М. Временное руководство по методу электромагнитного зондирования с вертикальным магнитным диполем. Л.: ЛГУ, 1978. 55 с.
7. Давыдов В. А. Двухмерная инверсия дистанционных индукционных зондирований // Вопросы естествознания. 2018. № 1(15). С. 62–69.
8. Вешев А. В. Электропрофилирование на постоянном и переменном токе. Л.: Недра, 1980. 391 с.

9. Гасаненко Л. Б. К вопросу о вычислении нормального поля приподнятого магнитного диполя // Ученые записки ЛГУ. Вопросы геофизики. 1964. № 324. С. 70–78.
10. Шейнманн С. М. Об установлении электромагнитных полей в земле // Прикладная геофизика. 1947. Вып. 3. С. 3–55.
11. Ваньян Л. Л. Основы электромагнитных зондирований. М.: Недра, 1965. 109 с.
12. Anderson W. L. Computer Program Numerical integration of related Hankel transforms of orders 0 and 1 by adaptive digital filtering // Geophysics. 1979. Vol. 44. No. 7. P. 1287–1305.
13. Вешев А. В., Любцева Е. Ф. Электромагнитное зондирование с вертикальным магнитным диполем над двух- и трехслойными средами // Ученые записки ЛГУ. Вопросы геофизики. 1974. Вып. 24. С. 3–35.
14. Кузнецов А. Н., Морозова Г. М., Пятницкий В. И. и др. Дипольные частотные зондирования двухслойной среды: методические рекомендации. Новосибирск: Ин-т геологии и геофизики СО АН СССР, 1980. Ч. 1. 124 с.
15. Вешев А. В., Любцева Е. Ф., Леончиков В. М. Возможности электромагнитного зондирования с вертикальным магнитным диполем при изучении разрезов типа К // Ученые записки ЛГУ. Вопросы геофизики. 1975. № 396. С. 23–34.
16. Вешев А. В., Любцева Е. Ф., Леончиков В. М. Возможности электромагнитного зондирования с вертикальным магнитным диполем при изучении разрезов типа Н // Ученые записки ЛГУ. Вопросы геофизики. 1977. № 391. С. 35–48.
17. Журавлева Р. Б., Колесняк С. А. Пакет «ЕМРАСК» для решения прямых и обратных задач электроразведки с использованием стационарных и гармонических полей // Геоэлектрические исследования контрастных по электропроводности сред. Екатеринбург: Наука, Уральское отд. 1996. С. 46–55.
18. Кауфман А. А. Введение в теорию геофизических методов. Ч. 2. Электромагнитные поля. М.: Недра, 2000. 483 с.
19. Вешев А. В., Ивочкин В. Г., Игнатьев Г. Ф. Электромагнитное профилирование. Л.: Недра, 1971. 216 с.
20. Молочнов Г. В., Радионов М. В. Частотные электромагнитные зондирования с вертикальным магнитным диполем. Л.: ЛГУ, 1982. 216 с.
21. Арзамасцев Е. В., Исламгалиев Д. В., Коноплин А. Д., Ратушняк А. Н. Электромагнитная система для непрерывного индуктивного профилирования // Известия вузов. Горный журнал. 2015. № 6. С. 91–97.

Поступила в редакцию 12 февраля 2020 года

Сведения об авторах:

Арзамасцев Евгений Владимирович – младший научный сотрудник Института геофизики УрО РАН. E-mail: brigan88@yandex.ru

Астафьев Павел Федорович – кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник Института геофизики УрО РАН. E-mail: pashaek@mail.ru

Байдилов Сергей Владимирович – кандидат технических наук, старший научный сотрудник Института геофизики УрО РАН. E-mail: badikek@mail.ru

Коноплин Алексей Дмитриевич – кандидат технических наук, старший научный сотрудник Института геофизики УрО РАН. E-mail: pbs002@mail.ru

Ратушняк Александр Николаевич – кандидат технических наук, заведующий лабораторией Института геофизики УрО РАН. E-mail: geo_info@mail.ru

DOI: 10.21440/0536-1028-2020-4-21-31

Inductive sounding of layered earth

Evgenii V. Arzamastsev¹, Pavel F. Astafiev¹, Sergei V. Baidikov¹, Aleksei D. Konoplin¹, Aleksandr N. Ratushniak¹

¹ Institute of Geophysics UB RAS, Ekaterinburg, Russia.

Abstract

Research aim. The research results in the development of a technology of continuous multi-frequency induction profiling measuring magnetic field components on long survey routes and detailed elaboration of sections by means of remote induction soundings.

Research methodology. Theoretical and experimental studies of magnetic field components change patterns of harmonic vertical magnetic dipole over non-uniform layered earth. Mathematical simulation of harmonic vertical magnetic dipole magnetic field in non-uniform layered earth.

Analysis of results. Information value of harmonic vertical magnetic dipole magnetic field components characteristics in low-frequency induction zone has been shown when studying non-uniform geoelectric sections together with the obtained results correspondence to the type of the non-uniform section when carrying out remote inductive sounding.

Scope of results. for extended sections of route research (road and railway, oil and gas pipelines, power transmission lines, etc.) process sequence of vertical magnetic dipole magnetic field characteristics measurement has been determined to determine geoelectric properties of a layered section by means of continuous multi-frequency profiling and determination of homogeneous sections of medium structure with their detailing by discrete analysis by the method of remote inductive sounding.

Key words: harmonic electromagnetic field; inductive sounding; vertical magnetic dipole; apparent electrical resistance.

REFERENCES

1. Gasanenko L. B. The field of vertical harmonic magnetic dipole over the surface of multilayered structure. *Uchenye zapiski LGU. Voprosy geofiziki = Proceedings of LSU. Geophysical Issues*. 1959; 278: 164–173. (In Russ.)
2. Zaborovskii A. I. *Non-uniform electromagnetic fields in electrical prospecting*. Moscow: MSU Publishing; 1960. (In Russ.)
3. Kraev A. P. *The fundamentals of geoelectrics*. Leningrad: Nedra Publishing; 1965. (In Russ.)
4. Veshev A. V., Ivochkin V. G. Electrical profiling with the determination of effective parameters of a medium by the amplitude and amplitude-phase measurements. *Geofizicheskoe priborostroenie = Geophysical Instruments Design*. 1963; 14: 61–67. (In Russ.)
5. Svetov B. S. *Theory, methods and interpretation of low-frequency inductive sounding materials*. Moscow: Nedra Publishing; 1973. (In Russ.)
6. Veshev A. V., Liubtseva E. F., Leonchikov V. M. *Interim guidance for the method of electromagnetic sounding with vertical magnetic dipole*. Leningrad: LSU Publishing; 1978. (In Russ.)
7. Davydov V. A. Two-dimensional inversion of remote induction sounding. *Voprosy estestvoznaniia = Issue of Natural Science*. 2018; 1(15): 62–69. (In Russ.)
8. Veshev A. V. *Electrical profiling at direct and alternating current*. Leningrad: Nedra Publishing; 1980. (In Russ.)
9. Gasanenko L. B. On the problem of calculating the normal field of the elevated magnetic dipole. *Uchenye zapiski LGU. Voprosy geofiziki = Proceedings of LSU. Geophysical Issues*. 1964; 324: 70–78. (In Russ.)
10. Sheinmann S. M. On the issue of setting electromagnetic fields below ground. *Prikladnaia geofizika = Applied Geophysics*. 1947; 3: 3–55. (In Russ.)
11. Vanian L. L. *The fundamentals of electromagnetic sounding*. Moscow: Nedra Publishing; 1965. (In Russ.)
12. Anderson W. L. Computer Program Numerical integration of related Hankel transforms of orders 0 and 1 by adaptive digital filtering. *Geophysics*. 1979; 44 (7): 1287–1305.
13. Veshev A. V., Liubtseva E. F. Electromagnetic sounding with magnetic dipole over the two- or three-layered earth. *Uchenye zapiski LGU. Voprosy geofiziki = Proceedings of LSU. Geophysical Issues*. 1974; 24: 3–35. (In Russ.)
14. Kuznetsov A. N., Morozova G. M., Piatnitskii V. I., et al. *Dipole frequency sounding of the two-layered earth: methodological recommendations*. Novosibirsk: Institute of Geology and Geophysics SB AS USSR Publishing; 1980. Pt. 1. (In Russ.)
15. Veshev A. V., Liubtseva E. F., Leonchikov V. M. Opportunities of electromagnetic sounding with vertical magnetic dipole when studying the K-type sections. *Uchenye zapiski LGU. Voprosy geofiziki = Proceedings of LSU. Geophysical Issues*. 1975; 396: 23–34. (In Russ.)
16. Veshev A. V., Liubtseva E. F., Leonchikov V. M. Opportunities of electromagnetic sounding with vertical magnetic dipole when studying the N-type sections. *Uchenye zapiski LGU. Voprosy geofiziki = Proceedings of LSU. Geophysical Issues*. 1977; 391: 35–48. (In Russ.)
17. Zhuravleva R. B., Kolesniak S. A. EMPACK software for direct and inverse problems of electrical prospecting with the use of static and harmonic fields. In: *Geoelectric survey of electrically contrast media*. Ekaterinburg: Nauka (Ural branch) Publishing; 1996. p. 46–55. (In Russ.)
18. Kaufman A. A. *An introduction to the theory of geophysical methods. Pt. 2. Electromagnetic fields*. Moscow: Nedra Publishing; 2000. (In Russ.)
19. Veshev A. V., Ivochkin V. G., Ignatiev G. F. *Electromagnetic profiling*. Leningrad: Nedra Publishing; 1971. (In Russ.)
20. Molochnov G. V., Radionov M. V. *Frequency electromagnetic sounding with vertical magnetic dipole*. Leningrad: LSU Publishing; 1982. (In Russ.)
21. Arzamastsev E. V., Islamgaliev D. V., Konoplin A. D., Ratushniak A. N. Electromagnetic system for continuous inductive profiling. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 2015; 6: 91–97. (In Russ.)

Received 12 February 2020

Information about authors:

Evgenii V. Arzamastsev – senior researcher, Institute of Geophysics UB RAS. E-mail: brigan88@yandex.ru
Pavel F. Astafiev – PhD (Geology and Mineralogy), senior researcher, Institute of Geophysics UB RAS. E-mail: pashack@mail.ru

Sergei V. Baidikov – PhD (Engineering), senior researcher, Institute of Geophysics UB RAS.
E-mail: badikek@mail.ru

Aleksei D. Konoplin – PhD (Engineering), senior researcher, Institute of Geophysics UB RAS.
E-mail: pbs002@mail.ru

Aleksandr N. Ratushniak – PhD (Engineering), Head of the laboratory, Institute of Geophysics UB RAS.
E-mail: geo_info@mail.ru

Для цитирования: Арзамасцев Е. В., Астафьев П. Ф., Байдилов С. В., Коноплин А. Д., Ратушняк А. Н. Индукционные зондирования слоистых структур // Известия вузов. Горный журнал. 2020. № 4. С. 21–31. DOI: 10.21440/0536-1028-2020-4-21-31

For citation: Arzamastsev E. V., Astafiev P. F., Baidikov S. V., Konoplin A. D., Ratushniak A. N. Inductive sounding of layered earth. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 2020; 4: 21–31 (In Russ.). DOI: 10.21440/0536-1028-2020-4-21-31