

НОВЫЙ ПОДХОД К МАЛОГЛУБИНЫМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ ЗОНДИРОВАНИЯМ

Е.В. Балков¹, Д.И. Фадеев^{1,2}, Ю.Г. Карин¹, А.К. Манштейн¹,
Ю.А. Манштейн^{1,2}, Г.Л. Панин¹

¹Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,
630090, Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 3, Россия

²Новосибирский государственный университет, 630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 2, Россия

Приведен широкий обзор известной в настоящее время малоглубинной портативной геофизической аппаратуры для электромагнитных индукционных зондирований и профилирования, представлены основные технические характеристики приборов. Рассмотрена новая схема многокатушечного малоглубинного наземного зонда, заключающаяся в особом расположении приемных катушек. Последние устанавливаются на линии, на которой вертикальная компонента магнитного поля от генераторной катушки равна нулю. Предлагается наряду с частотой в качестве зондирующего параметра использовать разность между источником и приемниками. Как следствие, повышается результативность изысканий по исследованию верхней части разреза. Применяя предлагаемую реализацию зондирования, возрастает контрастность получаемых кривых зондирования, что упрощает их интерпретацию. При исследованиях локальных аномальных объектов использование описываемого метода и аппаратуры способствует заметному улучшению качества получаемого геофизического материала. Увеличение эффективности по сравнению с аналогичными приборами показано как на синтетическом, так и на реальном полевом материале.

Частотное и геометрическое зондирование, электромагнитное профилирование, компенсация прямого поля.

A NEW APPROACH TO SHALLOW-DEPTH ELECTROMAGNETIC SOUNDING

E.V. Balkov, D.I. Fadeev, Yu.G. Karin, A.K. Manshtein, Yu.A. Manshtein, and G.L. Panin

This paper presents an extensive review of currently available shallow-depth portable geophysical instrumentation for electromagnetic induction sounding and profiling and the main technical characteristics of the devices. A new ground-based multicoil shallow-depth device with a special arrangement of receiver coils is considered. The latter are placed on the line where the vertical component of the magnetic field from the source coil is zero. The spacing between the source and the receivers is used as a sounding parameter, along with a frequency. This increases the efficiency of the study of the upper section and the contrast between the sounding curves, which simplifies their interpretation. In studies of local anomalous objects, the use of the proposed method and instrumentation significantly improves the quality of geophysical data. The increase in sounding efficiency provided by these devices is demonstrated on both synthetic and real field data.

Frequency and geometric sounding, electromagnetic profiling, primary-field compensation

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время по всему миру для решения задач малоглубинной геофизики широко применяется индукционное зондирование и профилирование. Скорость работы, простота эксплуатации аппаратуры, а также качество получаемой информации обуславливают их применимость для решения широкого круга вопросов: от поиска локальных объектов до выделения структурных особенностей верхней части разреза. Среди известных компактных устройств для выполнения зондирования можно выделить GEM-2, ЭМС, Dualem, CDM-Explorer [Won et al., 1996; Патент..., 2000; Taylor, 2000]. Широко распространена аппаратура, предназначенная для электромагнитного профилирования: EM-31, EM-38, EMP-400, CMD [McNeil, 1980]. Схемы расположения катушек упомянутой аппаратуры приведены на рис. 1, а основные параметры – в таблице. Эффективная глубина, приведенная в таблице, рассчитана для компланарных, ориентированных в горизонтальной плоскости катушек, так, как это сделано, например, в работах [McNeil, 1980; Callegary, 2007]. Та часть среды, которая находится выше эффективной глубины, обеспечивает 70 % полезного сигнала. Там же показано, что для случая компланарных катушек, ориентированных в вертикальной плоскости (т. е. ортогонально земной поверхности), эффективная глубина вдвое меньше. Для случая ортогонально ориентированных катушек в аппаратуре Dualem (см. рис. 1) эффективная глубина уменьшается втрое [Taylor, 2000].

© Е.В. Балков[✉], Фадеев Д.И., Ю.Г. Карин, А.К. Манштейн, Ю.А. Манштейн, Г.Л. Панин, 2017

[✉]e-mail: BalkovEV@ipgg.sbras.ru

DOI: 10.15372/GiG20170508

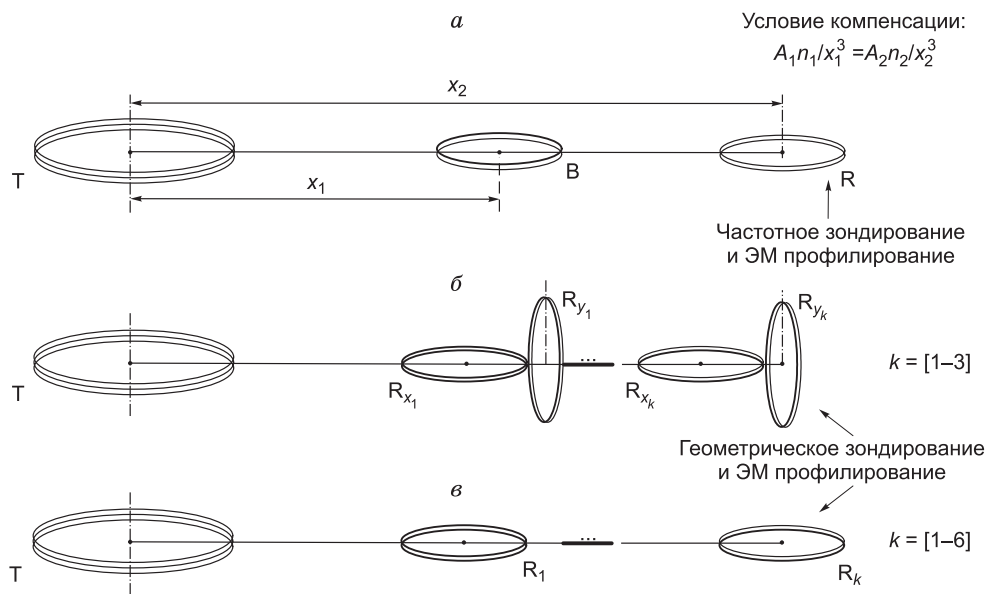


Рис. 1. Различные типы компоновки компактной малоглубинной аппаратуры индукционного зондирования и профилирования:

a — ЭМС, GEM-2; *б* — Dualem-1, Dualem-2, Dualem-21, Dualem-4; *в* — К-1 EM31-MK2, EM38-MK2-1, EMP-400, CMD; К-2 EM38-MK2; К-3 CMD-Explorer; К-6 CMD-Mini-Explorer 6L. Т — генераторная катушка, В — компенсаторная катушка, R — приемная катушка.

Перечисленные устройства для индукционного зондирования подповерхностного пространства имеют ряд недостатков. Если не выполняется компенсация первичного поля, то уменьшается информативность полезного сигнала, который измеряется на фоне сигнала прямого поля, при значительном превосходстве амплитуды последнего. Схемы с компенсацией первичного поля работают лучше, но их настройка и калибровка требуют применения сложных электротехнических схем и конструктивных решений [Патент..., 2000, 2012]. Кроме того, в случае устройств, все катушки которых расположены в одной плоскости, одному приповерхностному объекту могут соответствовать несколько образов на полученных картах, графиках и разрезах, что затрудняет интерпретацию. Так, для аппаратуры ЭМС объекты, находящиеся на глубине менее 1 м, создают несколько экстремумов в сигнале [Балков, 2011б; Балков и др., 2013].

В ИНГТ СО РАН накоплен существенный опыт в разработке [Патент..., 2000, 2013] и применении [Эпов и др., 2012, 2016] малоглубинной портативной электромагнитной аппаратуры, реализующей зондирование и профилирование. В настоящее время ведется разработка нового подхода к выполнению малоглубинных индукционных зондирований, при котором генераторная и приемные катушки разнесены не только по горизонтали, но и по вертикали. Зондирование выполняется изменением одновременно двух параметров — частоты и разноса.

НОВЫЙ ПОДХОД К РАДИАЛЬНО-ЧАСТОТНОМУ ЗОНДИРОВАНИЮ

Компенсация первичного поля в таких устройствах, как GEM-2 (разработка американской фирмы Georhex) и ЭМС (разработка ИНГТ СО РАН) [Манштейн и др., 2008], выполняется за счет использования компенсационной катушки [Won et al., 1996]. Схема и условие компенсации продемонстрированы на рис. 1, *a*.

Из-за сложного процесса настройки [Патент..., 2012], проблем с ложными аномалиями, характерных для трехкатушечных зондов, актуальным остался вопрос о нахождении альтернативного метода компенсации прямого поля. Поле магнитного диполя в изотропном пространстве имеет поверхность, на которой вертикальная компонента напряженности магнитного поля равна нулю (рис. 2, *a*). Уравнение этой поверхности легко получить из выражения для расчета напряженности поля магнитного диполя в однородном пространстве [Балков и др., 2006]:

$$H_z^t = -\frac{M_t}{4\pi R^3} \left(\frac{3r^2}{R^2} + \frac{3kr^2}{R} + k^2 r^2 - 2 - 2kR \right) e^{-kR}, \quad (1)$$

Таблица 1. Существующие реализации малоглубинных приборов индукционных исследований и их основные характеристики

Тип	Наименование аппаратуры	Частотный диапазон, кГц	Разнос между генераторной и приемной катушками, м	Эффективная глубина, м**
<i>a</i>	GEM-2	0.03—90	1.68	—
<i>a</i>	ЭМС	2.5—250	1.5*; 2.5	1—5
<i>b</i>	Dualem-1	9	1	1.5
<i>b</i>	Dualem-2	9	2	4
<i>b</i>	Dualem-21	9	1; 2	—
<i>b</i>	Dualem-4	9	4	6
<i>b</i>	Dualem-42	9	2; 4	6
<i>c</i>	EM31-MK2	9.8	3.66	6
<i>c</i>	EM31-SH	9.8	2	4
<i>c</i>	EM38-MK2-1	14.5	1	0.75
<i>c</i>	EM38-MK2	14.5	0.5; 1	0.3; 0.75
<i>c</i>	EMP-400	1.0—16	1.21	—
<i>c</i>	CMD-Explorer	—	1.48; 2.82; 4.49	2.3; 4.2; 6.7
<i>c</i>	CMD-Mini-Explorer	—	0.32; 0.71; 1.18	0.5; 1; 1.8
<i>c</i>	CMD-Mini-Explorer 6L	—	0.2; 0.33; 0.5; 0.72; 1.03; 1.5	0.3; 0.5; 0.8; 1.1; 1.6; 2.3
<i>c</i>	CMD Tiny	—	0.45	0.7
<i>c</i>	CMD 1	10	0.98	1.5
<i>c</i>	CMD 2	10	1.89	3
<i>c</i>	CMD 4	10	3.77	6
<i>c</i>	CMD 4/6	—	3.77; 5.79	9

Примечание. Прочерк — не указано производителем.

* Расстояние между компенсационной и генераторной катушкой.

** Рассчитана для горизонтального компланарного расположения катушек (режим M_z — H_z)

где $k^2 = i\omega\mu_0\sigma$; r и R — цилиндрический и сферический радиусы; $M_t = I \cdot S \cdot n$ — момент генераторной катушки, представляющий собой произведение тока, площади и количества витков в катушке; σ — электропроводность пространства. Из выражения (1) при малых kr можно найти условие компенсации прямого поля [Якубовский, 1980]:

$$r \approx \sqrt{2z}. \quad (2)$$

Это дало предпосылки к созданию прибора, у которого набор приемных катушек расположен в зоне минимального прямого поля (см. рис. 2, *a*) и на разном удалении от генератора. Описываемый способ компенсации прямого поля и зондирования был запатентован [Патент..., 2013]. В данном случае для увеличения зондирующей способности переменными параметрами выступают частота и расстояние между источником и приемником.

МАТЕМАТИЧЕСКИЙ АППАРАТ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Выражения для вычисления вертикальной компоненты напряженности магнитного поля вертикального магнитного диполя, расположенного на поверхности немагнитной горизонтально-слоистой среды, приведены ниже:

$$H_z = \frac{M_t}{2\pi} \int_0^\infty \lambda^3 J_0(\lambda r) X_N d\lambda, \quad (3)$$

где N — количество слоев, X_N — слоистая функция, которая вычисляется рекурсивным алгоритмом [Могилатов, 1993; Балков и др., 2006].

Ниже приведены выражения для слоистых функций однородного полупространства (X_1) и двух-слойной среды (X_2):

$$X_1 = -\frac{1}{(p_0 + p_1)} e^{-p_1 z}, \quad (4)$$

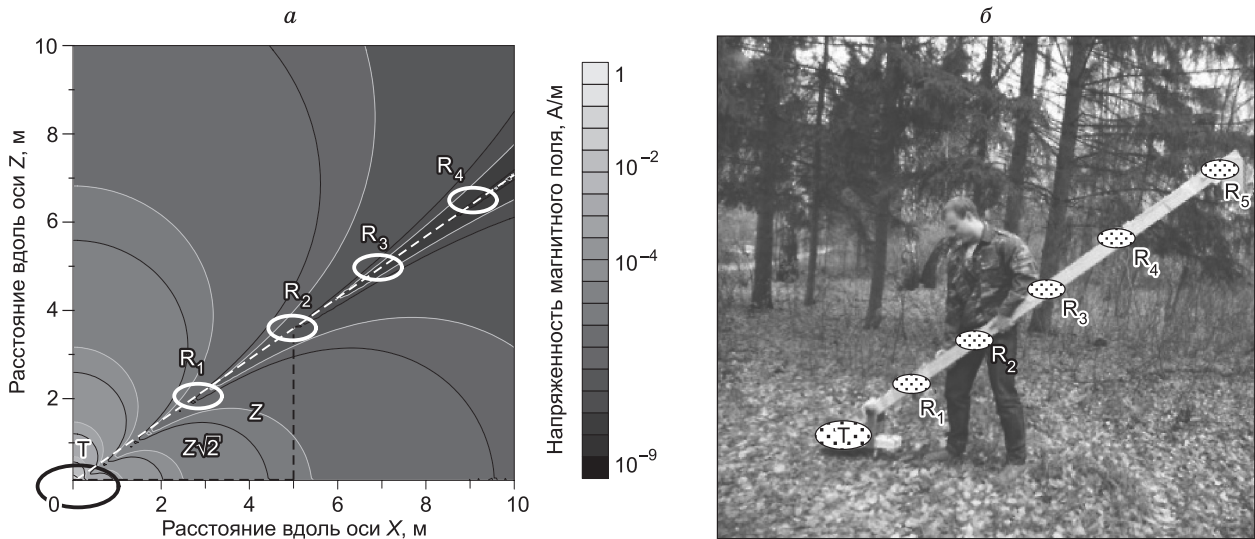


Рис. 2. Сигнал от генераторной петли, расположенной в точке (0,0) над полупространством с сопротивлением 1000 Ом·м со схемой расположения катушек для предлагаемой реализации прибора радиально-частотного зондирования (а); макет аппаратуры радиально-частотного зондирования (б).

$$X_2 = -\frac{p_1 \cdot ch(p_1 \cdot h) + p_2 \cdot sh(p_1 \cdot h)}{(p_0 \cdot p_1 + p_1 \cdot p_2) \cdot ch(p_1 \cdot h) + (p_1^2 + p_0 \cdot p_2) \cdot sh(p_1 \cdot h)} e^{-p_1 z}, \quad (5)$$

где $p_j^2 = \lambda^2 + k_j^2$, $k_j^2 = i\omega\mu_0\sigma_j$, $j = 0...2$, $z \geq 0$.

ЭДС (ε_d) и ток (I_d) в приемной катушке, аппроксимированной диполем, могут быть найдены по формулам:

$$\varepsilon_d = i\omega\mu_0 M_d H_z(r_d, z_d), \quad I_d = \varepsilon_d / Z_d, \quad (6)$$

где M_d , r_d , z_d , Z_d — момент, горизонтальная и вертикальная позиции, комплексное сопротивление приемной катушки.

ТРАНСФОРМАЦИЯ ДАННЫХ

На рис. 3 показаны диаграммы зависимости различных компонент комплексной ЭДС (квадратурная, синфазная и модуль), вычисленной по формулам (3), (4), (6), от удельной электропроводности однородного полупространства для частоты 250 кГц и горизонтального разнеса (r) 0.5 м. Процесс нахождения электропроводности в описанной модели по измеренным величинам ЭДС называется трансформацией сигналов, которая дает кажущиеся значения электропроводности. Это происходит путем решения соответствующего трансцендентного уравнения. Данные зависимости не являются однозначными функциями во всем диапазоне изменения электропроводности полупространства. Поэтому для корректного нахождения кажущихся значений при решении выбираются области монотонности функций зависимости измеряемой ЭДС от сопротивления среды [Fadeev, Balkov, 2014]. Ниже будут

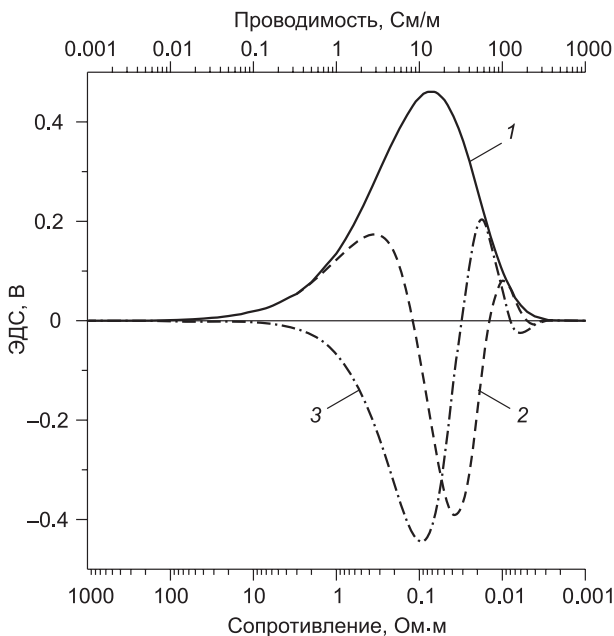


Рис. 3. Зависимость измеряемой ЭДС (для различных компонент) в приемной катушке от УЭС среды:

1 — модуль, 2 — квадратурная, 3 — синфазная.

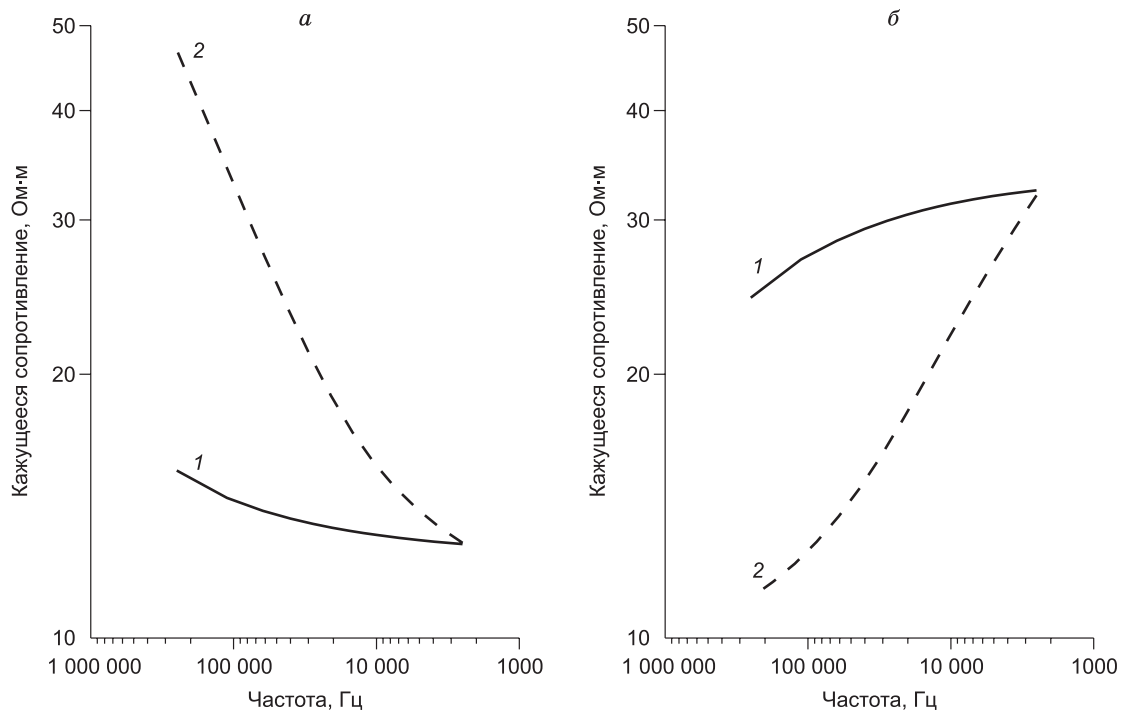


Рис. 4. Сравнение кривых зондирования для аппаратуры ЭМС (1) и радиально-частотного зондирования (РЧЗ) (2).

a — двухслойная модель с сопротивлением верхнего слоя 100 Ом·м и мощностью 1 м, подстилающий слой имеет УЭС 10 Ом·м; *б* — двухслойная модель с сопротивлением верхнего слоя 10 Ом·м и мощностью 1 м, подстилающий слой имеет УЭС 100 Ом·м.

продемонстрированы результаты трансформаций синтетических сигналов, рассчитанных для двух и трехслойных моделей.

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ТРАНСФОРМАЦИЯ ДАННЫХ НА СЛОИСТЫХ СРЕДАХ

Применимость предлагаемой реализации аппаратуры возможно показать, основываясь на трансформации модельных данных. Был изучен широкий ряд горизонтально-слоистых моделей. Наиболее простым является двухслойный геоэлектрический разрез.

На рис. 4 представлено сравнение кривых кажущегося сопротивления, частотного (аппаратура ЭМС) и радиально-частотного зондирования (РЧЗ). Расчеты выполнены для 14 фиксированных частот аппаратуры ЭМС. На рис. 4, *a* вышележащий слой имеет удельное электрическое сопротивление 100 Ом·м, нижележащий 10 Ом·м, на рис. 4, *б* обратная ситуация.

Как можно видеть, кривые кажущегося сопротивления для аппаратуры радиально-частотного зондирования более выраженные, чем для устройства ЭМС, что говорит о перспективности применения такой реализации зондирования.

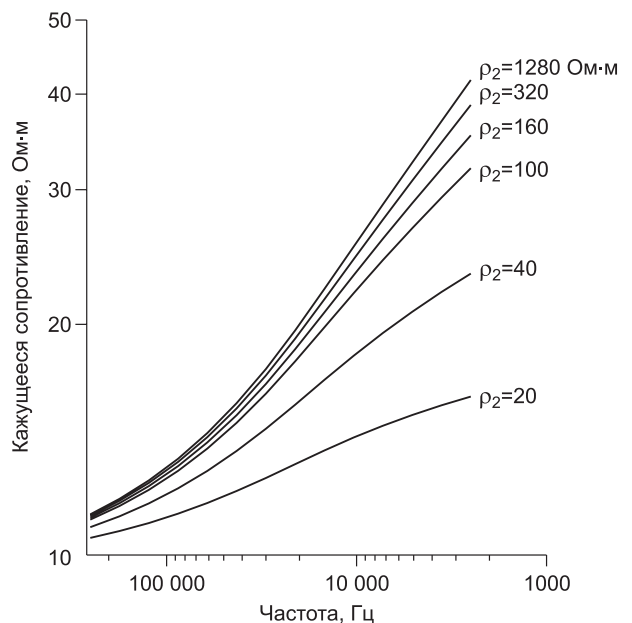


Рис. 5. Расчетные кривые зондирования РЧЗ для двухслойной модели среды с сопротивлением первого слоя 10 Ом·м и мощностью 1 м, сопротивление второго бесконечного слоя изменяется от 20 до 1280 Ом·м.

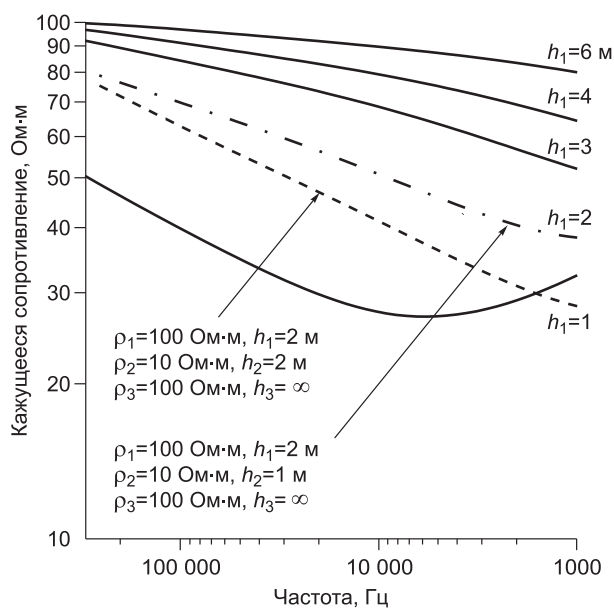


Рис. 6. Теоретические кривые зондирования для трехслойных моделей, в которой более проводящий слой ($\rho_1 = 10 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, $h_1 = 1 \text{ м}$) погружен на различную глубину (подписи графиков) в менее проводящий (УЭС $100 \text{ Ом}\cdot\text{м}$).

Штриховая линия — кривая, рассчитанная для модели с увеличенной до 2 м мощностью проводящего слоя.

Далее были выполнены расчеты для двухслойной среды, в которой удельное электрическое сопротивление первого слоя $10 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, мощность 1 м, при этом УЭС (удельное электрическое сопротивление) подстилающего пространства варьируется от 20 до $1280 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ (рис. 5). В данном случае кривые кажущегося сопротивления достаточно выражены и просты в интерпретации.левой асимптотой для всех графиков является значение сопротивления верхнего проводящего слоя. Далее в зависимости от контраста сопротивлений между слоями изменяется

уровень правой асимптоты. Видно, что вплоть до отношения сопротивлений, равного 32 (сопротивление первого слоя $10 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, второго $320 \text{ Ом}\cdot\text{м}$), кривые значительно отличаются друг от друга и могут быть разделены даже на качественном уровне. Далее графики для модели с сопротивлением второго слоя 320 и $1280 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ отличаются на частоте 2.5 кГц всего на 7.5% (максимальное отличие), что близко к уровню погрешности измерений прибора 5% . Тем самым появляется ограничение на исследование разрезов с УЭС пород более $300 \text{ Ом}\cdot\text{м}$.

Поиск хорошо проводящих тонких горизонтов, перекрытых толщей пород с высоким сопротивлением (трехслойные разрезы типа Н), является важной задачей. В первую очередь, целесообразно исследовать поведение чувствительности аппаратуры радиально-частотного зондирования на поверхности трехслойной среды, где сопротивления первого и последнего слоев большие, а проводящий слой с сопротивлением ρ_2 и толщиной h_2 залегает на глубине h_1 .

На рис. 6 изображены расчетные кривые кажущегося сопротивления для среды с описанным выше геоэлектрическим разрезом. Рассчитаны случаи погружения электропроводящего слоя на различную глубину, от 1 до 6 м до его кровли. Как можно отметить, чувствительность к проводящему слою сохраняется вплоть до глубины 6 м. Однако возможность определения параметров проводящего слоя значительно снижается, когда мощность первого слоя превышает 2 м. Стоит отметить, что влияние подстилающего менее проводящего слоя чувствуется до глубины 2 м.

Вызывает интерес возможность оценки мощности проводящего слоя. Увеличив ее до уровня 2 м (см. рис. 6), мы видим значительное понижение кажущегося сопротивления в области низких частот. Изменился как угол наклона графика, так и его поведение в области 1.5 кГц . При меньшей мощности проводящего горизонта все еще чувствуется отклик подстилающего слоя, что может быть характерным критерием оценки параметров проводника.

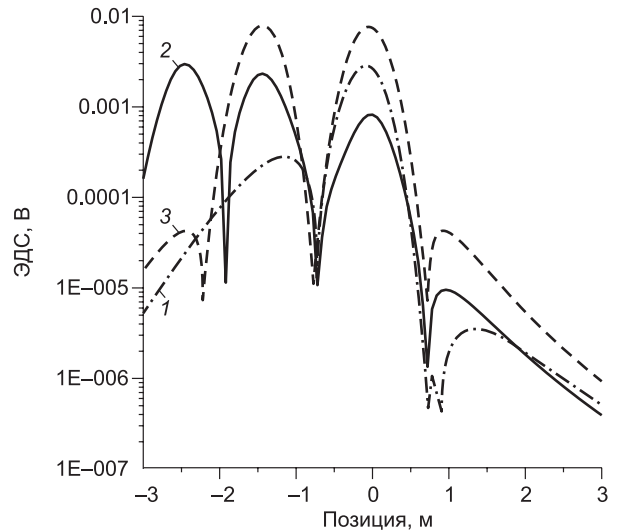
МОДЕЛИРОВАНИЕ ЛОКАЛЬНОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ

Не менее важным аспектом применения индукционной аппаратуры являются задачи поиска локальных объектов, имеющих аномальные значения удельного электрического сопротивления. Примером таких объектов могут служить археологические объекты, захоронения отходов, неразорвавшиеся боеприпасы и т. п. Здесь приведены результаты моделирования такой задачи при аппроксимации катушек аппаратуры и локального проводника вертикальными магнитными диполями в однородной слабопроводящей среде.

Переменное магнитное поле генератора аппаратуры индуцирует ЭДС в локальном проводящем объекте, которая может быть вычислена по формулам (1) и (6). Затем с применением тех же формул вычисляется ток, индуцированный в этом объекте, и далее, используя его уже в качестве источника, рассчитывается полезная ЭДС в приемной катушке.

Результаты расчетов на рис. 7 приведены для трех разных типов аппаратуры — а, с и радиально-частотного зонда (см. таблицу). Здесь представлен модуль комплексной величины сигнала в зависимости от положения аппаратуры вдоль профиля, который проходит над локальным проводником, погру-

Рис. 7. Синтетический сигнал над локальным проводящим объектом, расположенным на глубине 0.5 м (позиция 0 м), полученный на частоте 50 кГц для приборов РЧЗ (1), ЭМС (2) и аппаратуры типа С (3).



женным на глубину 0.5 м (имитируется магнитным диполем с моментом, эквивалентным одновитковой медной петле с радиусом 0.2 м).

Профильные диаграммы для трехкатушечной аппаратуры (тип *a*, см. таблицу) имеют три экстремума, для двухкатушечного (типы *b*, *c*) – два ярко выраженных, а для аппаратуры РЧЗ преобладает один, расположенный по центру генераторной катушки. В работе [Балков, 2011б] приведены результаты аналогичных расчетов для различных глубин заложения проводящего объекта, для набора разносов и частот. К аналогичным по своему смыслу результатам добавляется тот факт, что при увеличении глубины точечного проводника начинает преобладать один экстремум в сигнале. Это происходит, когда глубина заложения объекта соизмерима либо превышает разнос между катушками. Для аппаратуры РЧЗ для любых разносов и глубин объекта преобладает один экстремум.

Результаты моделирования демонстрируют преимущество новой аппаратной разработки РЧЗ и сложности, с которой придется столкнуться интерпретатору при наличии нескольких приповерхностных объектов при применении серийной аппаратуры (см. таблицу, типы *a*, *b*, *c*).

ПРОТОТИП АППАРАТУРЫ, ПРИМЕР ПОЛЕВЫХ ДАННЫХ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ

Для подтверждения результатов, основанных на синтетических данных, были проведены полевые тесты макета аппаратуры РЧЗ и аппаратуры ЭМС на территории электрометрического полигона ИНГГ СО РАН [Балков и др., 2013]. Макет аппаратуры РЧЗ содержал одну генераторную катушку (от аппаратуры ЭМС) и 5 катушек (см. рис. 2, б), каждая из которых могла быть применена для измерения на 14 частотах (см. таблицу). Горизонтальный разнос находился в диапазоне от 0.5 до 2.5 м, соблюдая соотношение $r \approx \sqrt{2}z$. При работе с аппаратурой необходимо соблюдение постоянного положения систем оборудования относительно земли. Погрешность положения прибора в 10 см приводит к изменению уровня сигнала в среднем не более 10 %, что является приемлемым показателем.

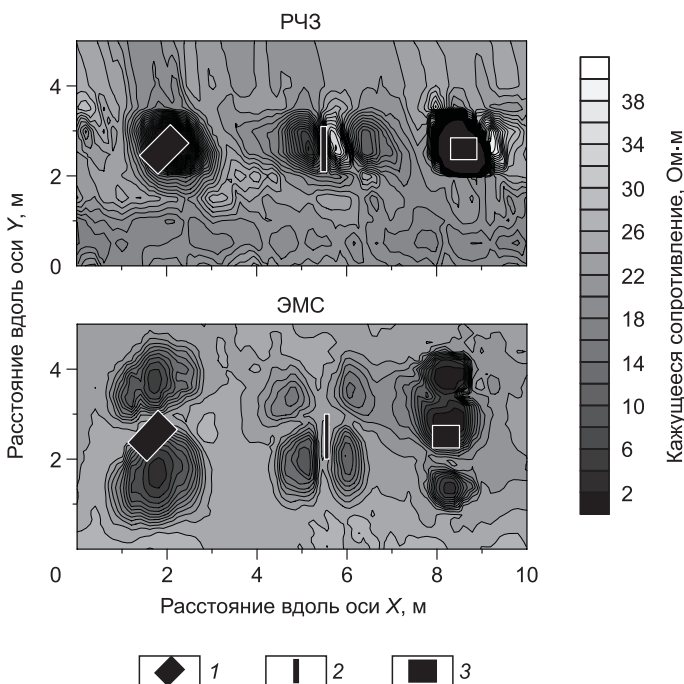


Рис. 8 демонстрирует результаты площадного профилирования на частоте 28 кГц. Исследования проводились с постоянной ориентацией прибора. На изученном участке на различной глубине заложены три металлические мишени с различной пространственной ориентацией (рис. 8). Все мишени находятся на глубине не более 1 м, поэтому обуславливают несколько экстремумов в сигнале. Для трехкатушечной аппаратуры ЭМС мишени, ориентированные горизонтально, создают два или три образа, что впол-

Рис. 8. Карты распределения кажущегося УЭС, полученные при помощи аппаратуры ЭМС и радиально-частотного зондирования, над тремя локальными проводящими объектами.

1 — горизонтальный медный лист (10×0.6 м), глубина 0.8 м; 2 — вертикальный медный лист (10×0.6 м), глубина до верхней части 0.45 м; 3 — горизонтальный медный лист (0.5×0.6 м), глубина 0.2 м.

не согласуется с результатами математического моделирования [Балков, 2011б]. Вертикально ориентированные мишени создают более сложные аномалии, напоминающие по своей форме квадруполь. Горизонтально ориентированные объекты при исследовании макетом аппаратуры РЧЗ проявляются в единственной (для объекта на глубине 0.8 м) либо одной преобладающей аномалии (объект на глубине 0.2 м). Вертикально ориентированный объект так же, как и в случае с ЭМС, проявляется в виде нескольких аномалий. Полевые испытания в целом подтверждают выводы, сделанные в результате математического моделирования.

Анализ большого количества экспериментальных данных, полученных описанным макетом над более чем десятком объектов полигона [Khalatov, Balkov, 2014], позволил выделить два перспективных направления развития описанного макета. Так как большинство локальных проводящих объектов, заложенных на глубину до 3 м, выделяются с помощью короткого зонда (горизонтальный разнос 0.5 м) на одной из двух частот, близких к 10 и 100 кГц, то перспективно для целей профилирования создать двухчастотную компактную двухкатушечную аппаратуру. Для осуществления зондирования необходимо развивать многокатушечную версию аппаратуры РЧЗ, макет которой был показан на рис. 2, б.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенная конфигурация расположения катушек, расположенных вдоль прямой, проходящей под углом к плоскости генератора, обеспечивает компенсацию прямого поля, что позволяет измерять в чистом виде квадратурную и синфазную компоненты сигнала. Это улучшает помехоустойчивость, так как исключает измерение небольших по уровню полезных сигналов на фоне высоких значений прямого поля. Кроме того, измерение синфазной компоненты дает дополнительную информацию при интерпретации сигналов [Huang, Fraser, 2001].

Теоретические и практические изыскания показывают, что аномальные локальные объекты создают достаточно сложный сигнал для компактных электромагнитных зондов, применяемых в настоящее время в мировой практике. Сигнал содержит от одного до четырех экстремумов от одного аномального объекта. Новая предложенная конфигурация приемных катушек обеспечивает единственную преобладающую аномалию сигнала над объектом.

Предлагаемая схема радиально-частотного зондирования предполагает одновременное изменение частоты и разноса, что увеличивает зондирующий фактор по сравнению с зондированиями по одному параметру. Математическое моделирование показывает перспективность применения такой аппаратуры для изучения свойств верхней части (до 10 м) геоэлектрического разреза. Наибольшая эффективность, контрастность кривых кажущегося сопротивления проявляются при изучении сред с УЭС до 300 Ом·м.

Перспективными этапами данной работы будут являться воплощение описанных принципов и макетов аппаратуры в промышленные образцы и их последующая апробация при решении практических задач.

ЛИТЕРАТУРА

Балков Е.В. Технология малоглубинного частотного зондирования // Геофизика, 2011а, № 6, с. 42—47.

Балков Е.В. Множественные образы в сигнале от локальных объектов при электромагнитном профилировании компактным зондом с разнесенными катушками // Тезисы докладов. Всероссийская школа-семинар им. М.Н. Бердичевского и Л.Л. Ваньяна по электромагнитным зондированиям земли. (16—21 мая 2011). СПб., 2011б, с. 4.

Балков Е.В., Эпов М.И., Манштейн А.К. Оценка глубинности наземного электромагнитного индукционного частотного зондирования // Геофизика, 2006, № 3, с. 41—44.

Балков Е.В., Стойкин Т.А., Манштейн А.К., Карин Ю. Г. Результаты применения наземного малоглубинного частотного зондирования на электроразведочном полигоне института Нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН (г. Новосибирск) // Геофизические исследования, 2013, т. 14, № 3, с. 55—63.

Манштейн А.К., Панин Г.Л., Тикунов С.Ю. Аппаратура частотного электромагнитного зондирования «ЭМС» // Геология и геофизика, 2008, т. 49(6), с. 571—579.

Могилатов В.С. Об одном способе решения основной прямой задачи электроразведки ЗС // Геология и геофизика, 1993, т. 34(3), с. 108—117.

Патент РФ № 2152058, МПК7 G01V3/10, от 24.06.1998. Способ индукционного частотного зондирования / А.К. Манштейн, М.И. Эпов, В.В. Воевода, К.В. Сухорукова. / 2000, Бюл. № 18, 2 с.

Патент РФ № 2461850, МПК8 G01V13/00, от 28.06.2010. Способ калибровки устройства для наземного электромагнитного индукционного частотного зондирования / Е.В. Балков, А.К. Манштейн, К.В. Сухорукова, М.И. Эпов. 2012, Бюл. № 26, 5 с.

Патент РФ № 2502092, МПК8 G01V3/10, от 01.08.2011. Способ и устройство для индукционного частотного зондирования / А.К. Манштейн, Е.В. Балков. 2013, Бюл. № 25, 8 с.

Эпов М.И., Балков Е.В., Чемякина М.А., Манштейн А.К., Манштейн Ю.А., Напреев Д.В., Ковбасов К.В. Исследование замерзших курганов Горного Алтая комплексом геофизических и геохимических методов // Геология и геофизика, 2012, т. 53(6), с. 761—774.

Эпов М.И., Молодин В.И., Манштейн А.К., Балков Е.В., Дядьков П.Г., Матасова Г.Г., Казанский А.Ю., Бортникова С.Б., Позднякова О.А., Карин Ю.Г., Кулешов Д.А. Мультидисциплинарные археолого-геофизические исследования в Западной Сибири // Геология и геофизика, 2016, т. 57(3), с. 603—614.

Якубовский Ю.В. Электроразведка. М., Недра, 1980, 384 с

Callegary J.B., Ferré P.A., Groom R.W. Vertical spatial sensitivity and exploration depth of low-induction-number electromagnetic-induction instruments // Vadose Zone J. 2007, v. 6, p. 158—167.

Fadeev D.I., Balkov E.V. Algorithmic maintenance and testing sounding the possibilities of equipment radial frequency sounding // Near Surface Geoscience 2014: proceedings of the 20th European meeting of environmental and engineering geophysics. Greece, Athens, 2014, 4 p.

Huang H., Fraser D.C. Mapping of the resistivity, susceptibility, and permittivity of the earth using a helicopter-borne electromagnetic system // Geophysics, 2011, v. 66, № 1, p. 148—157.

Khalatov S.Yu., Balkov E.V. Equipment of radial-frequency sounding and electromagnetic profiling // Proceeding of the 27th annual symposium on the application of geophysics to engineering and environmental problems. Boston, USA, 2014, p. 147—147.

McNeill J.D. Electromagnetic terrain conductivity measurement at low induction numbers. Tech. Note TN-6. Geonics Ltd., Mississauga, Ontario, 1980, 15 p.

Taylor R.S. Mapping sites of environmental contamination with a dual-geometry electromagnetic (EM) system // Proceeding of the Society of Exploration Geophysicists annual meeting, Expanded Abstracts, 2000, E12.

Won I.J., Keiswetter D.A., Fields G.R.A., Sutton L.C. GEM-2: A new multifrequency electromagnetic sensor // J. Environ. Engin. Geophys., 1996, v. 2, № 1, p. 129—138.

*Рекомендована к печати 6 июля 2016 г.,
М.И. Эповым*

*Поступила в редакцию
18 февраля 2016 г*