

УДК 550.837.6
DOI 10.25205/1818-7900-2018-16-4-68-78

**Ю. Г. Карин¹, Е. В. Балков¹, Д. И. Фадеев^{1,2}, А. К. Манштейн¹
Г. Л. Панин¹, А. О. Алымов², Д. Б. Романов³**

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

² *Новосибирский государственный университет
ул. Пирогова, 1, Новосибирск, 630090, Россия*

³ *ООО «Конструкторское бюро электрометрии»
Москва, Россия*

karinyg@ipgg.sbras.ru, balkovev@ipgg.sbras.ru, fadeevdi@ipgg.sbras.ru

ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ПРОФИЛИРОВАНИЕ КОМПАКТНОЙ АППАРАТУРОЙ: НОВЫЙ ПОДХОД И РЕЗУЛЬТАТЫ ПРИМЕНЕНИЯ *

Современные портативные приборы для электромагнитного профилирования и малоглубинного зондирования позволяют изучать распределение удельного электрического сопротивления грунта. К типичным сферам применения подобных комплексов можно отнести: исследование археологических объектов – курганы, древние поселения; решение экологических задач – изучение отвалов и хвостохранилищ горнодобывающих предприятий, зон распространения вредных веществ; локализация инженерных объектов – труб и коммуникаций, исследование состояния дамб и плотин. Перспективной сферой являются объекты агропромышленного комплекса – оценка плодородности почв (распределение минерализации), контроль эффективности мелиорации.

Целью проводимых исследований является разработка и создание переносного программно-аппаратурного комплекса электромагнитного профилирования, позволяющего с высокой достоверностью и точностью обнаруживать и дифференцировать по удельному электрическому сопротивлению объекты различного рода. На основании оригинального принципа компенсации первичного поля генераторной катушки была разработана компактная многочастотная аппаратура для электромагнитного профилирования. В результате прототипирования создана оптимальная конструкция корпуса, позволяющая реализовать данный принцип компенсации. Для эффективного использования аппаратного комплекса было создано программное обеспечение QZond, позволяющее управлять процессом сбора информации и в режиме реального времени визуализировать полученные данные. Проведенные полевые испытания на известных объектах электрометрического полигона ИНГГ СО РАН, при поиске локальных и протяженных проводников, а также археолого-геофизические исследования показывают эффективность реализации компактной аппаратуры электромагнитного профилирования.

Ключевые слова: геофизические методы поиска, электромагнитное профилирование, аппаратура, археологические исследования, инженерная геофизика, программное обеспечение.

В настоящее время широко известны приборы EM-31 и EM-38 для электромагнитного профилирования канадской фирмы «Geonics Ltd», аппаратура EMP-400 американской фирмы «GSSI» [1]. Малоглубинное частотное зондирование и профилирование позволяют выпол-

* Исследовательская работа выполнена при частичной финансовой поддержке проекта РФФИ «Комплексные исследования археологических памятников Западной Сибири геофизическими методами: новые полевые технологии и способы интерпретации данных» (№ 17-29-04314).

Карин Ю. Г., Балков Е. В., Фадеев Д. И., Манштейн А. К., Панин Г. Л., Алымов А. О., Романов Д. Б. Электромагнитное профилирование компактной аппаратурой: новый подход и результаты применения // Вестн. НГУ. Серия: Информационные технологии. 2018. Т. 16, № 4. С. 68–78.

нять прибор GEM2 американской фирмы «Georhex Ltd» [2] и аппаратура ЭМС, разработанная в Институте нефтегазовой геологии и геофизики (ИНГГ) СО РАН [3; 4]. В работе [5] представлена классификация и подробное описание характеристик компактной аппаратуры индукционных исследований.

Перечисленные приборы, как правило, используются для решения малоглубинных задач в таких областях, как археология, поиск сходов и кладов, экология, инженерные изыскания, изучение объектов агропромышленного комплекса. Характерными отличиями искомым объектов в указанных сферах являются контраст по удельному электрическому сопротивлению (УЭС) в сравнении с вмещающей средой и небольшая глубина расположения (до 10 м). В случае археологических объектов их размеры в плане варьируются от нескольких сантиметров, например предметы быта древних людей, до нескольких десятков метров, как в случае с курганами. Чаще грунтовые могильники или остатки древних жилищ имеют заполнение материалом, схожим по УЭС с вмещающей средой, но из-за измененной структуры все равно удается выделять их на фоне нетронутой вмещающей среды [6]. Локальные объекты, такие как трубы, кабели и прочие инженерные конструкции, даже в случае малых размеров дают значительно больший вторичный сигнал при воздействии на них переменным магнитным полем [7]. Отходы горнообогатительных комбинатов чаще всего имеют низкое удельное сопротивление (1–20 Ом·м) из-за большого количества солей и высокоминерализованных растворов [8], а также большое распространение в плане.

Способ реализации ЭМ профилирования

Компенсация первичного поля в таких устройствах как GEM-2 (разработка американской фирмы Georhex) и Nemfis (разработка ИНГГ СО РАН) [3] выполняется за счет использования компенсационной катушки [2]. Схема и условие компенсации продемонстрированы на рис. 1.

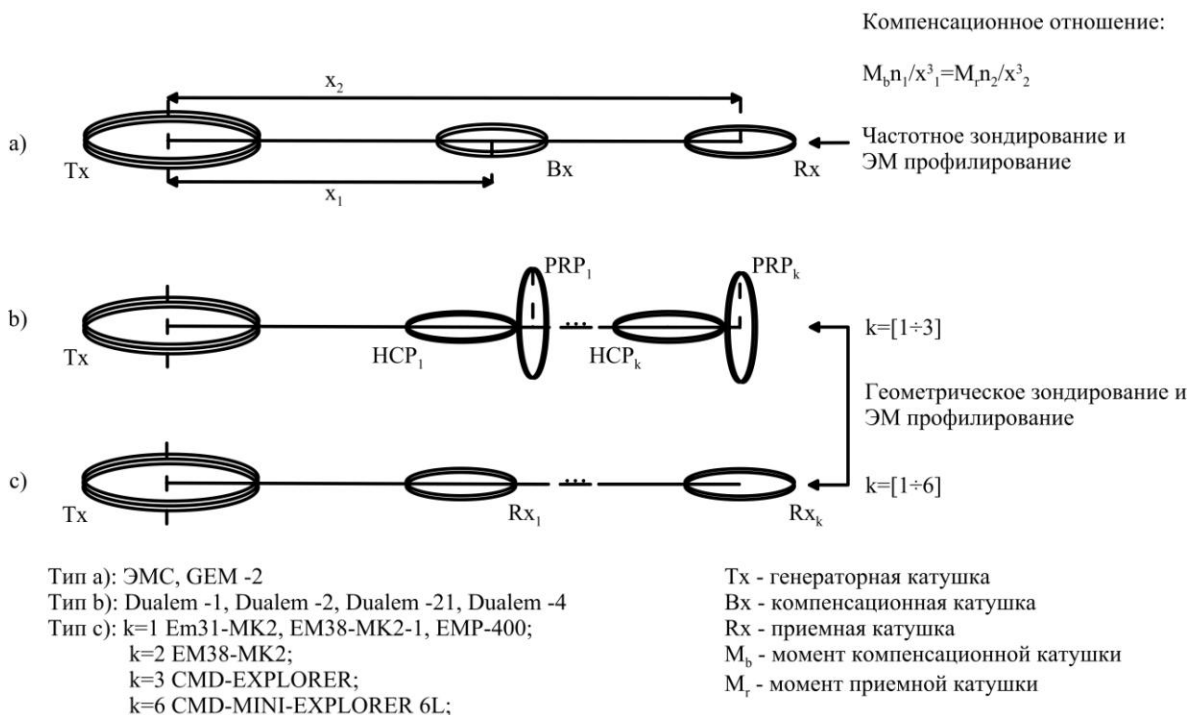


Рис. 1. Различные типы компоновки компактной малоглубинной аппаратуры индукционного зондирования и профилирования

Из-за сложного процесса настройки (патент RU 2 461 850), проблем с ложными аномалиями, характерных для трехкатушечных зондов, потери полезного сигнала при вычитании прямого поля актуальным остался вопрос о нахождении альтернативного метода компенсации поля генератора.

В ИНГГ СО РАН запатентован способ компенсации первичного поля генераторной катушки, особым расположением приемных катушек [9]. Структура поля магнитного диполя в изотропном пространстве имеет характерную линию, на которой вертикальная компонента напряженности магнитного поля меняет знак (рис. 2).

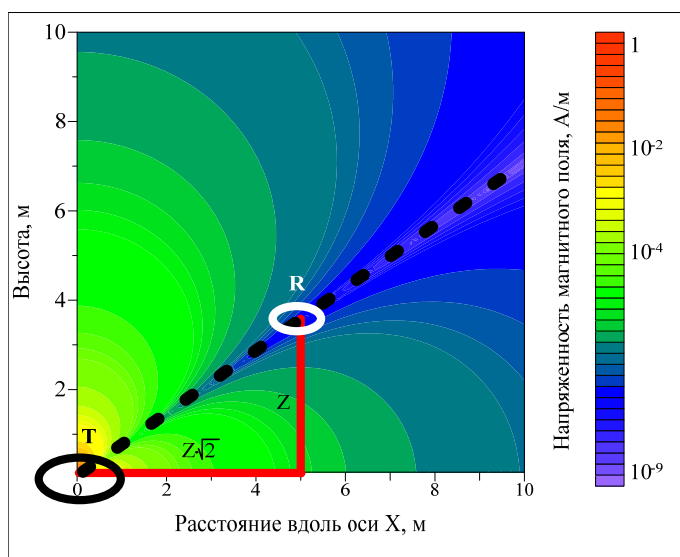


Рис. 2. Карта распределения вертикальной компоненты напряженности ЭМ поля от генератора (T , приемник – R).

Уравнение этой поверхности легко получить из выражения для расчета напряженности поля магнитного диполя в однородном пространстве:

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

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:

$$r \approx \sqrt{2z},$$

где r – разнос, z – разность высот между приемной и генераторной катушками.

Это дало предпосылки к созданию прибора, у которого набор приемных катушек расположен в зоне минимального прямого поля (см. рис. 2) и на разном удалении от генератора. В такой реализации параметрами зондирования выступают частота генерируемого поля и расстояние между источником и приемником.

Разнесение генераторной и приемной катушек по вертикали приводит к однозначному расположению точки привязки сигнала – к центру генераторной катушки – и существенно уменьшает эффект возникновения нескольких экстремумов сигнала над приповерхностными объектами [10].

Прототипирование аппаратуры

В результате макетирования и физического моделирования на электрометрическом полигоне ИНГГ СО РАН [7] были выбраны оптимальный разнос и рабочие частоты, которые по-

звоняют обнаруживать большинство мишеней полигона, имитирующих реальные объекты [11]. Авторами был разработан и изготовлен прототип компактной трехчастотной аппаратуры электромагнитного профилирования.

На рис. 3 приведены различные варианты исполнения новой аппаратуры от первого макета (а) до более современного прототипа (б). Все они выполнены из листового стеклотекстолита, имеют небольшой вес и компактные размеры. Несмотря на внешние отличия, любой из указанных прототипов в полной мере позволяет реализовать запатентованный способ компенсации прямого поля и за счет жесткого каркаса обеспечивает точное расположение генераторной и приемной катушек относительно друг друга.



Рис. 3. Макет аппаратуры электромагнитного профилирования (а).
Прототип, выполненный из листового стеклотекстолита (б)

Генераторная катушка содержит две обмотки, резонансную и накачивающую, диаметр 270 мм, высота намотки 20 мм. Расстояние между генератором и приемником 70 см. Размер приемной катушки 42 мм, высота намотки 10 мм. Управляющие элементы аппаратуры расположены вдоль поверхности с минимальной напряженностью прямого поля генератора, тем самым минимизируется влияние на измеряемые данные.

Программное обеспечение QZond

Взаимодействие с аппаратурой осуществляется через беспроводные протоколы Bluetooth и Wi-Fi смартфоном или планшетным компьютером. Для этих целей разработано и реализовано программно-алгоритмическое обеспечение, предназначенное для проектирования системы наблюдений, управления работой и предварительной обработки данных аппаратуры электромагнитных индукционных исследований. QZond (рис. 4) представляет собой приложение диалоговой структуры для ОС Android и сочетает следующие возможности: подготовка и редакция системы наблюдений; управление аппаратурой индукционных исследований; сбор данных GPS приёмника; предварительная обработка измеренных данных; визуализация в режиме реального времени; построение постобработанных карт, разрезов и псевдо трехмерное отображение данных. Программное обеспечение внедрено в пользование и является неотъемлемой частью аппаратурно-программных комплексов отечественного производства (ЭМС, Геовизер).

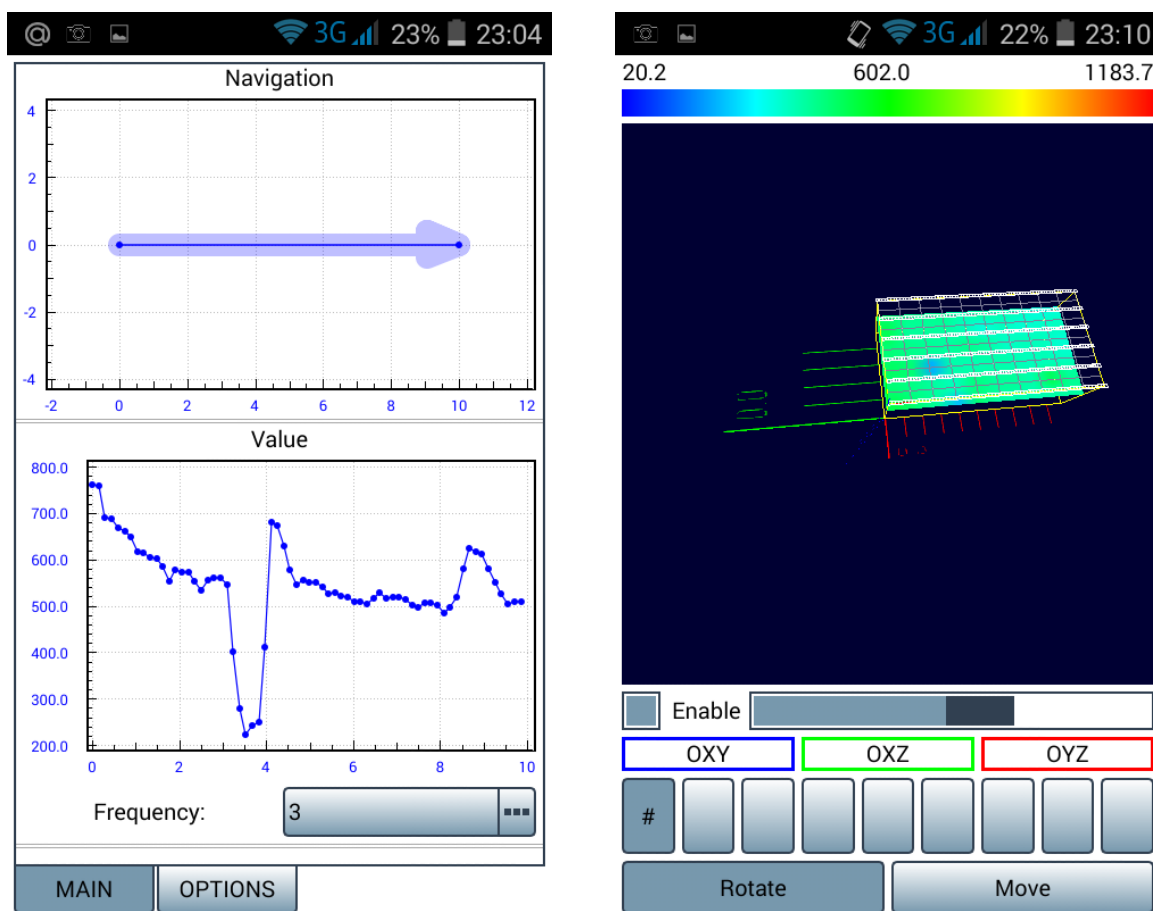


Рис. 4. Пример визуального интерфейса программы управления и первичной обработки данных QZond

Результаты применения аппаратуры

Прототип аппаратно-программного комплекса был испытан на электрометрическом полигоне ИНГГ СО РАН [7]. Рисунок 5 демонстрирует результаты площадного профилирования на частоте 28 кГц. На исследованном участке на различной глубине заложены три металлические мишени с различной пространственной ориентацией. Все мишени находятся на глубине не более 1 м, поэтому обуславливают несколько экстремумов в сигнале. Горизонтально ориентированные объекты при исследовании прототипом аппаратуры проявляются в единственной (для объекта на глубине 0,8 м) либо одной преобладающей аномалии (объект на глубине 0,2 м). Вертикально ориентированный объект проявляется в виде нескольких аномалий различного «знака».

Результаты профилирования над алюминиевыми флягами и металлическими ёмкостями показаны на рис. 6. Две алюминиевые фляги зарыты на глубине 0,5 и 1 м, расположены на 3-м и 7-м метре соответственно на оси наблюдений. Железные бочки заложены на 12-м и 18-м метре по профилю, на глубинах 1 и 2,5 м соответственно.

Несмотря на общий высокий уровень сигнала (5 000 единиц АЦП – это шестая часть всего рабочего диапазона), все четыре бочки выделяются на профильной кривой. Однако уровень сигнала от бочек на глубине более 2 м приближается к уровню собственных шумов. Вероятнее всего, необходимо увеличивать отношение сигнал / шум в измерительной части аппаратуры.

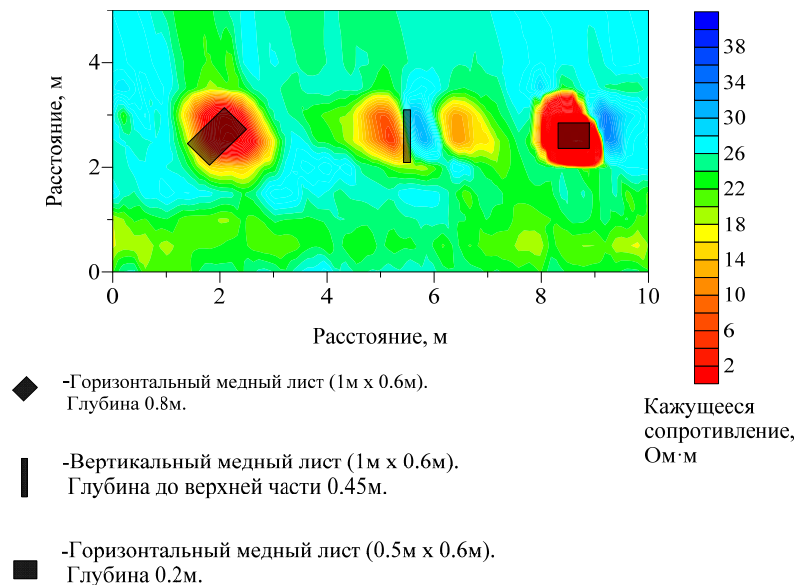


Рис. 5. Карта распределения кажущегося УЭС, полученная при помощи разработанной аппаратуры над тремя локальными проводящими объектами

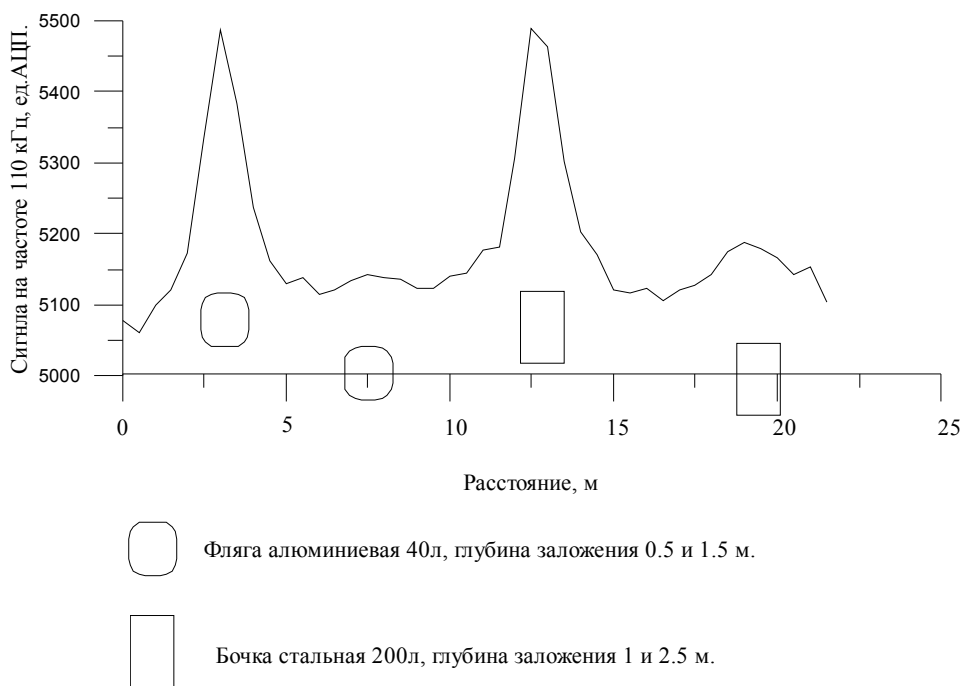


Рис. 6. Диаграмма сигнала аппаратуры, полученная в результате профилирования над металлическими флягами и ёмкостями на полигоне ИНГТ СО РАН

Практические работы по поиску металлических труб большого диаметра (до 1 м) демонстрируют эффективность применения разработки для решения такого типа задач. На рис. 7 приведены графики зависимости сигнала от расстояния вдоль исследуемых профилей.

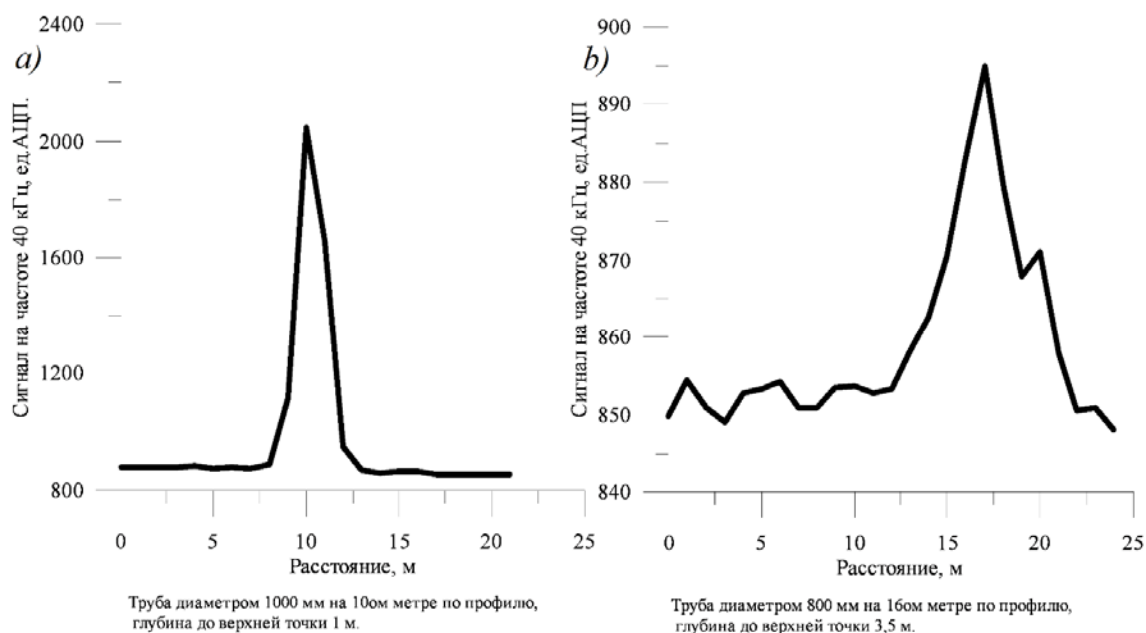


Рис. 7. Диаграммы сигнала разработанной аппаратуры, полученные в результате профилирования с целью поиска металлических труб на глубинах до 3,5 м (а) и 1 м (б). Графики для диаметров труб 1 и 0,8 м на рисунке (а) и соответственно. Рабочая частота 40 кГц

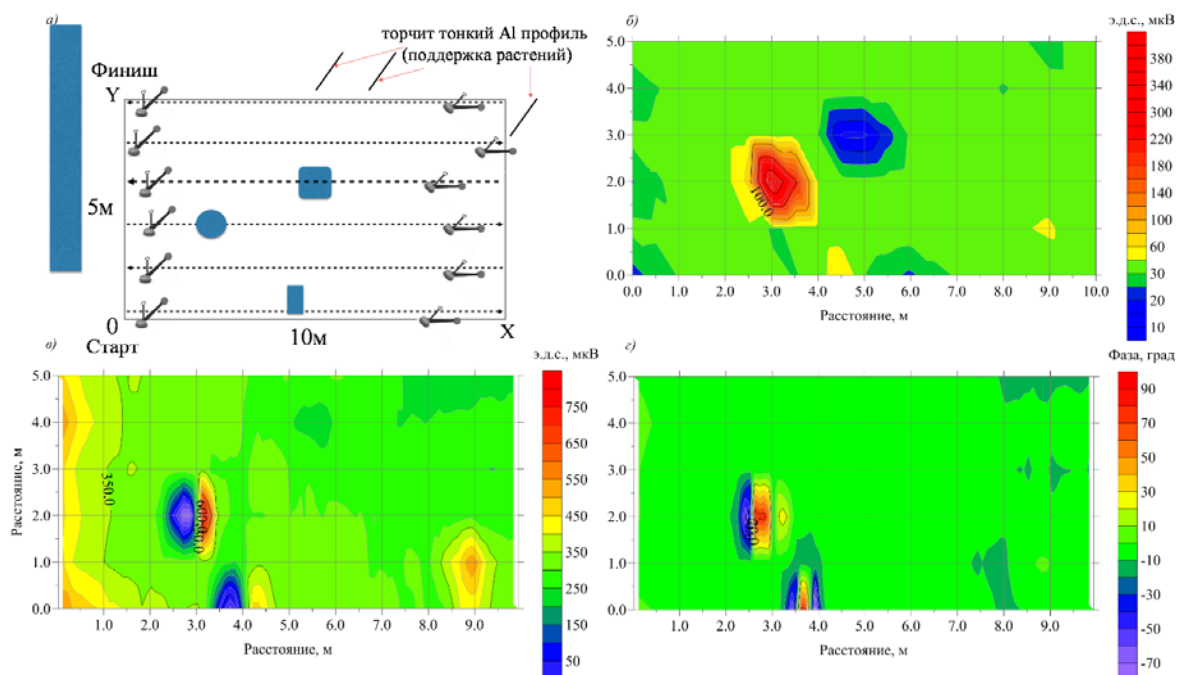


Рис. 8. Схема эксперимента (а) по поиску локальных объектов: квадрат – алюминиевый таз $d = 30$ см с медной проволокой 4 кг на глубине 1 м; круг – катушка металлоискателя на поверхности; прямоугольник – стальной лист 25×50 см толщиной 1,5 мм на поверхности, слева от площадки находится парник, каркас которого выполнен из алюминиевого профиля. Полученные карты распределения модуля э.д.с. (б) на частоте 40 кГц, реальной компоненты э.д.с. (в) и фазы сигнала (г) на частоте 111 кГц

Профильные кривые показывают наличие хорошо проводящих объектов на 10-м (рис. 7, а) и 16-м (рис. 7, б) метрах по измеряемым профилям, об этом свидетельствует резкое увеличение сигнала. В обоих случаях уровень полезного сигнала позволяет локализовать положение искомых объектов на профилях, что говорит о достаточной чувствительности прибора.

К тому же при отсутствии помех (постройки, металлический мусор) трубы являются высококонтрастной и яркой мишенью.

Был проведен ряд экспериментальных измерений над локальными проводящими объектами. На рис. 8 изображена схема эксперимента и заложенные мишени, представлены результаты измерений в виде карт распределения модуля э.д.с., реальной компоненты и фазы сигнала. Наиболее контрастно на всех картах выделяется аномалия, вызванная замкнутой многовитковой катушкой металлоискателя (локальные координаты мишени (3 м, 2 м)). Металлический лист (координаты (4 м, 0,3 м)) выделяется на картах распределения реальной компоненты и фазы сигнала (см. рис. 8, в, з). Аномалия, соответствующая алюминиевому тазу (координаты (5 м, 3 м)) отчетливо выделяется на более низкой частоте (40 кГц, рис. 8, б) в модуле э.д.с. Наибольшее негативное влияние нецелевых объектов (алюминиевый каркас парника слева от исследуемой площадки) наблюдается на карте распределения реальной компоненты э.д.с. (рис. 8, в), влияние на фазу сигнала минимально (рис. 8, з).

Что касается археологических задач, то и в этой области аппаратура показывает неплохие результаты. На рис. 9 показаны карты распределения сигнала от среды. Целью работ являлось картирование остатков древних построек. Работы проводились в Сузунском районе Новосибирской области вблизи р. Слезянка.

Исследовалась площадка размером 50 × 44 м. На рис. 9, а изображена карта распределения сигнала по данным аппаратуры индукционных исследований ЭМС, пунктирными линиями показаны контуры строений, выделяющиеся визуально в рельефе, как углубления грунта на глубину не более 20 см в самом центре. Видно, что аномалии, обозначенные голубым цветом, неплохо совпадают с этими контурами, следовательно, аномалии соответствуют остаткам древних сооружений.

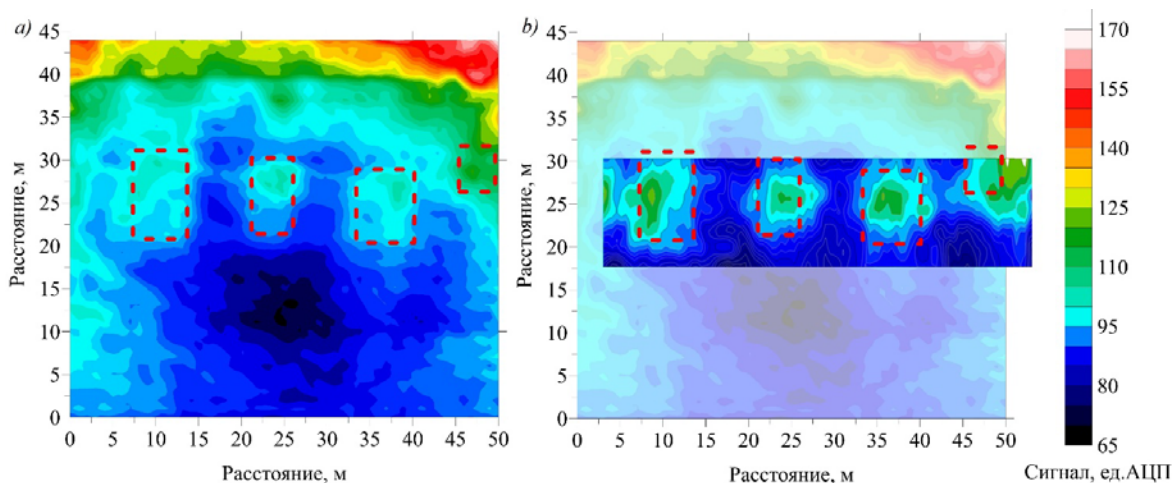


Рис. 9. Карты распределения сигнала по исследуемой площади аппаратурой ЭМС (а), фрагмент карты по данным новой аппаратуры (б)

На рис. 9, б показан фрагмент карты, полученной по данным разработанной аппаратуры. Видно, что аномалии сигнала, зеленые и голубые цвета на фоне синего, также неплохо совпадают с контурами западин. Следовательно, можно сделать вывод, что аппаратура «Геовизер» не уступает по своим характеристикам аппаратуре ЭМС, а наблюдаемые в данном случае аномалии более контрастны.

Заключение

На основании оригинального запатентованного в ИНГГ СО РАН принципа компенсации первичного поля генераторной катушки в результате цикла прототипирования разработана

компактная многочастотная аппаратура для электромагнитного профилирования. Проведенные полевые испытания на известных объектах электрометрического полигона ИНГГ СО РАН, при поиске локальных и протяженных проводников, а также археолого-геофизические исследования показывают высокую эффективность разработанной аппаратуры.

Список литературы

1. *Ortuani B., Chiaradia E. A., Priori S., L'Abate G., Canone D., Mele M., Comunian A., Giudici M., Facchi A.* Comparing EM38 and Profiler-EMP400 for the Delineation of Homogeneous Management Zones within Agricultural Fields // *Extended Abstracts, First Conference on Proximal Sensing Supporting Precision Agriculture*. Barcelona, 2015. DOI 10.3997/2214-4609.201413828
2. *Won I. J., Keiswetter D. A., Fields G. R. A., Sutton L. C.* GEM-2: A new multifrequency electromagnetic sensor // *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*. 1996. Vol. 2 (1). P. 129–138.
3. *Маништейн А. К., Панин Г. Л., Тикунов С. Ю.* Аппаратура частотного электромагнитного зондирования «ЭМС» // *Геология и геофизика*. 2008. Т. 49, № 6. С. 571–579.
4. Балков Е. В. Технология малоглубинного частотного зондирования // *Геофизика*. 2011. № 6. С. 42–47.
5. Балков Е. В., Фадеев Д. И., Карин Ю. Г., Маништейн А. К., Маништейн Ю. А., Панин Г. Л. Новый подход к малоглубинным электромагнитным зондированиям // *Геология и геофизика*. 2017. Т. 58, № 5. С. 783–791.
6. *Эпов М. И. и др.* Археогеофизические исследования в СО РАН, 2013–2015 годы // *Мультидисциплинарные методы в археологии: новейшие итоги и перспективы: Материалы международного симпозиума*. Новосибирск, 2017. С. 405–413.
7. Балков Е. В., Стойкин Т. А., Маништейн А. К., Карин Ю. Г. Результаты применения малоглубинного электромагнитного профилирования на электрометрическом полигоне Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН // *Геофизические исследования*. 2013. Т. 14, № 3. С. 55–63.
8. *Эпов М. И. и др.* Определение состава горно-рудных отходов геохимическими и геофизическими методами (на примере хвостохранилища Салаирского горно-обогатительного комбината) // *Геология и геофизика*. 2017. Т. 58, № 12. С. 1944–1954.
9. Маништейн А. К., Балков Е. В. Способ и устройство для индукционного частотного зондирования. Патент на изобретение № 2502092 от 20.12.2013.
10. Балков Е. В. Множественные образы в сигнале от локальных объектов при электромагнитном профилировании компактным зондом с разнесенными катушками // *Всероссийская школа-семинар имени М. Н. Бердичевского и Л. Л. Ваньяна по электромагнитным зондированиям Земли*. СПб., 2011. 4 с.
11. Балков Е. В., Халатов С. Ю., Маништейн А. К., Панин Г. Л. Малоглубинное электромагнитное профилирование компактной аппаратурой: теоретические оценки и результаты экспериментальных работ // *Инженерная геофизика – 2014: 10-я юбилейная конференция и выставка (Геленджик, 21–25 апреля 2014 г.)*. Геленджик, 2014.