

Малоглубинные наземные параметрические зондирования с помощью компактной аппаратуры

Е.В. Балков, Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН

Введение

Электромагнитные индукционные методы весьма популярны при малоглубинных геофизических изысканиях. В частности, за рубежом они активно используются в экологических, инженерных, археологических и агрокультурных исследованиях. В последние десятилетия был разработан и успешно применяется ряд одночастотных и многочастотных электромагнитных приборов (среди них EM-31, EM-34, EM-38, GEM-2, GEM-3 и т.д.). Не смотря на определенный прогресс в этой области, возможность и эффективность электромагнитных частотных зондирований, выполняемых компактными портативными приборами, являются предметом споров. Основным недостатком таковых приборов принято считать их работу в ближней зоне (при малом значении параметра установки), что обусловлено частотным диапазоном и малым разном между источником и приемником (s). Условие ближней зоны записывается в виде $|k|s \ll 1$, где $|k|$ - модуль волнового числа. В иностранной литературе принято оперировать аналогичной величиной «induction number» (индукционное число, B), представляемой в виде $B = s/\delta$, где δ – величина скин-слоя.

В течение довольно длительного времени считалось, что компактные многочастотные приборы оперируют в ближней зоне и для большинства практических ситуаций они не обеспечивают условий для осуществления зондирования. Так [McNeil, 1980], основываясь на асимптотических выражениях для измеряемых величин, утверждает, что при малых индукционных числах глубина исследования практически не зависит ни от частоты, ни от удельного электрического сопротивления (УЭС) среды. Поэтому использование нескольких частот не дает никакой дополнительной информации об изменении УЭС среды с глубиной. Для одночастотных приборов электромагнитного профилирования McNeil без достаточных на то оснований определяет следующую верхнюю границу диапазона малых индукционных чисел: $B < 0.23$.

Однако при определении возможности зондирования компактными многочастотными приборами ключевыми моментами являются точная оценка границы диапазона малых индукционных чисел и погрешность измерения конкретной аппаратуры.

Недавние результаты других исследователей демонстрируют обоснованные возможности зондирования компактных многочастотных приборов и более жесткие условия малости индукционных чисел. Callegary в своей статье [Callegary, 2007] показывает, что результаты расчетов с помощью точных формул и в приближении, основанном на использовании аппроксимаций при малых индукционных числах, достаточно близки между собой при выполнении условия $B < 0.01$. Авторы также доказывают, что в практическом диапазоне УЭС грунта и используемых в современной аппаратуре частот эффективная глубина исследования существенно зависит от этих параметров, и это необходимо учитывать при планировании работ и обработке данных. Won и др. [Won, 1993] публикуют принцип работы, алгоритмы обработки и инверсии данных, а также практические результаты частотных зондирований в реальном времени с помощью аппаратуры GEM-2. На основании инверсии синтетического и полевого материала авторы показывают состоятельность компактной многочастотной аппаратуры при выполнении частотного зондирования. Huang и др. опубликовали статью [Huang, 2008], в которой обозначены ограничения на применение компактных многочастотных приборов на средах с высоким УЭС. Было показано, что аппаратура GEM-2 работает в широком диапазоне индукционных чисел, выходящем за рамки малых значений.

Цель настоящего исследования – показать, что компактный многочастотный прибор может в основном функционировать вне ближней зоны, при больших величинах индукционного числа, а также теоретически оценить зондирующую способность приборов частотного и радиально частотного зондирования на простой слоистой модели.

Аппаратура малоглубинного параметрического зондирования. Диапазон значений индукционного числа

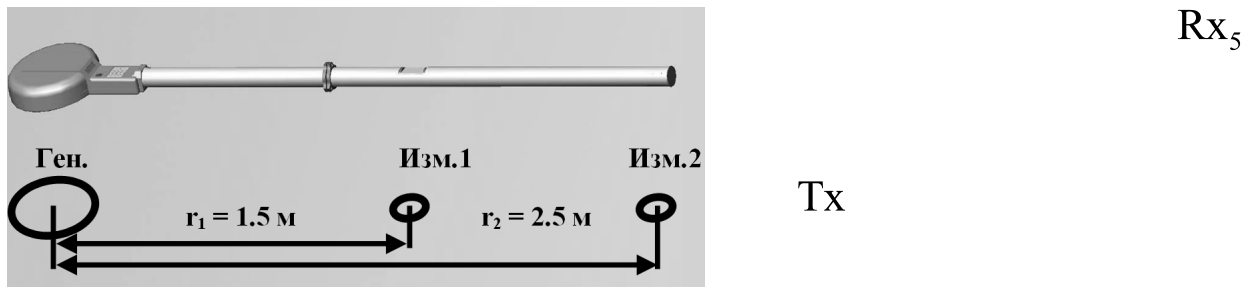


Рисунок 1 Аппаратура частотного зондирования с фиксированным разносом (слева), схема аппаратуры радиально частотного изопараметрического зондирования с пятью катушками (справа).

Одной из недавних реализаций метода малоглубинного частотного зондирования (МЧЗ) в компактном исполнении является аппаратура ЭМС [Балков, 2011]. Она представляет собой трехкатушечный зонд с фиксированной базой между генератором и приемниками (см. рис. 1). Генераторный контур излучает электромагнитное поле на 14 частотах в диапазоне от 2.5 кГц до 250 кГц. Приемники расположены в одной плоскости с генератором и имеют такую конструкцию, чтобы компенсировать прямое поле в воздухе. Условие компенсации записывается следующим образом: $M_1/r_1^3 = M_2/r_2^3$, где M_i и r_i – соответственно моменты приемных катушек и их удаление от генератора. Аппаратурой измеряются квадратурная и синфазная составляющие разностной э.д.с., индуцированной вихревыми токами, текущими в среде.

Во второй половине 20го столетия были предложены и изучались возможности различных конфигураций зондирующих установок. Так в работе Гасаненко был предложен способ радиально-частотных зондирований в изопараметрическом варианте. В настоящее время в ИНГГ ведется разработка портативной аппаратуры для малоглубинного изопараметрического зондирования (ДЭМС). Схема установки показана на рис. 1 (справа). В этой установке применяется запатентованный способ компенсации первичного поля, за счет расположения приемников на прямой, проходящей под определенным углом к горизонтальной плоскости. И используются несколько приемных катушек, при выборе разноса до которых и рабочей частоты соблюдаются условия изопараметричности.

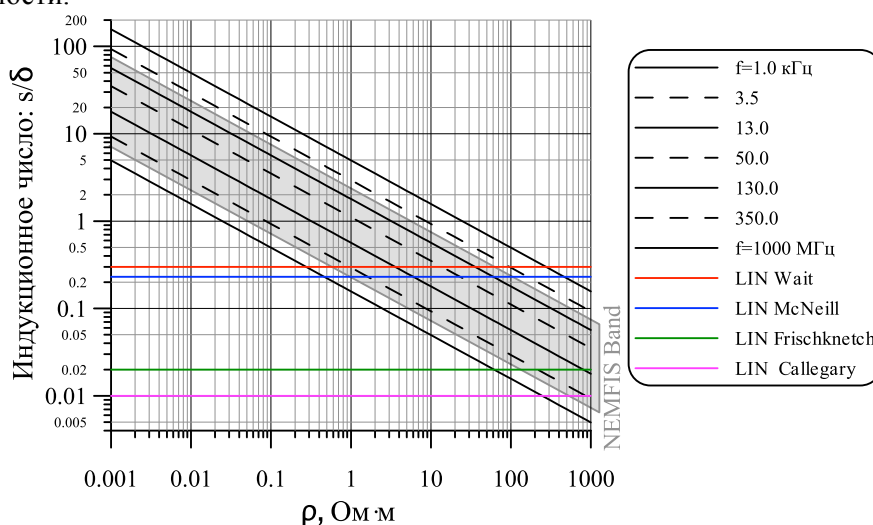


Рисунок 2 Значения индукционного числа (параметра установки). Цветные линии обозначают пределы, ограничивающие область малых значений индукционных чисел (ближнюю зону), принятые различными исследователями (LIN – low induction numbers – малые значения индукционного числа). Область, заштрихованная серой итривкой, обозначает частотный диапазон аппаратуры ЭМС.

На рис. 2 показаны диаграммы значений индукционного числа в зависимости от УЭС в диапазоне от 0.001 Ом·м до 1000 Ом·м для частот варьируемых от 1 кГц до 1 МГц. Расчеты здесь выполнены для расстояния s равного 2.5 м, что соответствует аппаратуре ЭМС, однако, результаты могут быть легко масштабированы для других разносов. На рисунке указаны границы аппроксимации для малых значений индукционного числа, полученных различными исследователями. Видно, что если принять за верхние границы пределы, полученные Callegary или Frischknecht, то аппаратура ЭМС будет оперировать в основном за пределами ближней зоны.

Моделирование сигналов над слоистой средой и их трансформация

Для исследования зондирующей способности компактных многочастотных приборов, на примере аппаратуры ЭМС, были проведены моделирование синтетических сигналов и их трансформация для широкого диапазона параметров среды и аппаратуры [Балков, 2011]. Использованы следующие диапазоны и значения: [1 кГц - 1 МГц] – частотный диапазон; [1, 3, 5 м] – мощность первого слоя (h); [1, 10, 100 Ом·м] – сопротивления первого слоя (ρ_1); [1/128, ..., 1/2, 1, 2, ..., 128] – отношения (ρ_2 / ρ_1) величин УЭС слоев. Результаты трансформации синтетических сигналов представлены на графиках (рис. 2). На представленных диаграммах закрашенные штриховкой области ограничивают частотный диапазон аппаратуры ЭМС.

Более выраженными и информативными являются кривые зондирования, представленные в зависимости кажущегося сопротивления от частоты, полученные для модели проводящего основания. Информативность кривых падает с уменьшением сопротивления верхнего слоя при фиксированной его мощности. Информативность также падает с увеличением мощности верхнего слоя в случае, когда он имеет высокую проводимость. В целом форма кривых зондирования позволяет сделать вывод о том, что частотный диапазон аппаратуры ЭМС позволяет разрешать по глубине определенный круг слоистых сред.

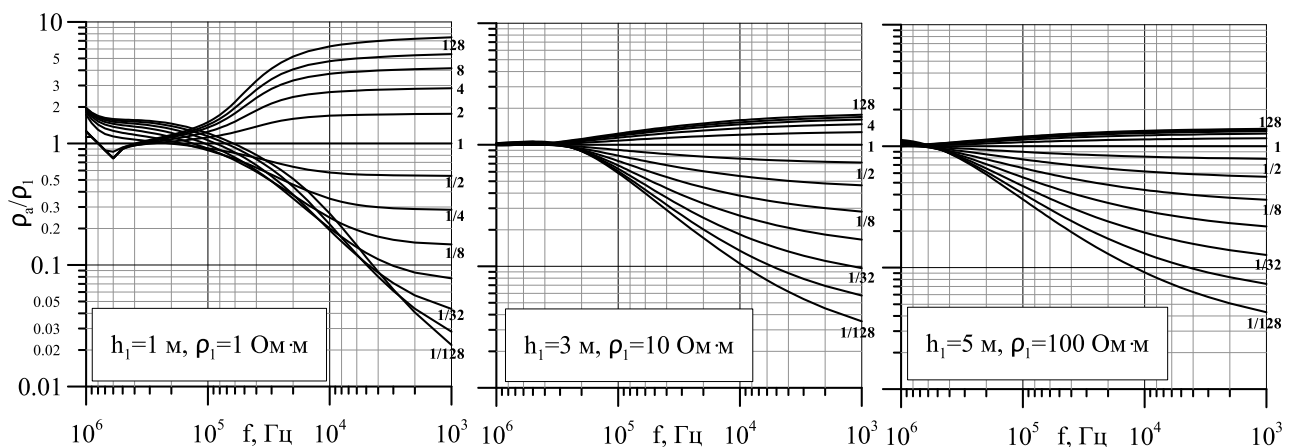


Рисунок 3 Результаты трансформации синтетических сигналов над двухслойной моделью среды. Каждый график демонстрирует зависимость кажущегося относительного УЭС от частоты зондирования при различных соотношениях между УЭС слоев ($\rho_2 / \rho_1 = 1/128, \dots, 1/2, 1, 2, \dots, 128$) для фиксированных значений мощности и УЭС первого слоя.

Аналогичное моделирование и трансформация была проведена для описанной конфигурации изопараметрического зонда (ДЭМС) для аналогичного ЭМС частотного диапазона. Результаты для двух геоэлектрических моделей приведены на рис. 4. Для сравнения приведены результаты трансформации сигналов частотного зондирования. Диаграммы наглядно отражают преимущество кривых изопараметрического зондирования, т.к. они в несколько раз более выражены и значения кажущихся величин УЭС значительно ближе к исходным значениям геоэлектрических моделей. Это создает благоприятные условия для инверсии данных в рамках слоистой модели.

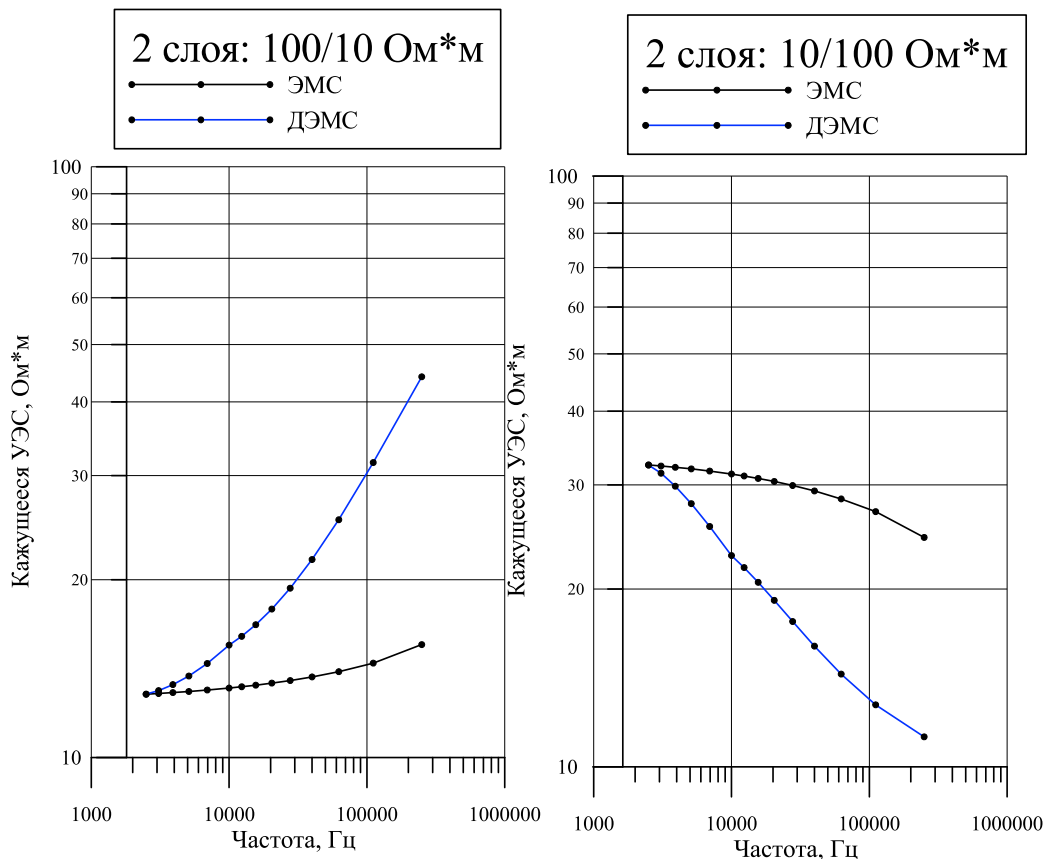


Рисунок 4 Результаты трансформации синтетических сигналов изопараметрического (ДЭМС) и частотного (ЭМС) зондирования над двухслойными моделями сред.

Моделирование сигналов над локальными проводниками

Далее было проведено моделирование сигналов для двух зондов, имеющих аналогично ДЭМС пять катушек для пяти соответствующих частот (рис. 5). В первом случае все катушки, аналогично ЭМС были расположены в плоскости генератора, во втором, на прямой, проходящей под углом к ней (ДЭМС). Результаты в виде профильных диаграмм сигнала вдоль профиля пересекающего аномальный объект, заложенный на глубине 0.5 м приведены на рис. 5. Видно, что диаграммы в первом случае (слева) имеют в основном два экстремума над одним объектом, во время прохождения генераторной и приемной катушек над ним [Балков, 2011]. Это значительно осложняет интерпретацию полевого материала и определение истинного положения объекта. Диаграмма сигнала для зонда с разнесенными по вертикали катушками имеет один выраженный максимум, расположенный всегда под генераторной катушкой. Это делает геометрию зонда ДЭМС более выгодной для обнаружения и определения положения локальных аномалий сопротивления.

Выводы

В работе показано, что компактная аппаратура для электромагнитных зондирования в диапазоне от 2.5 до 250 кГц, оперирует в основном за пределами ближней зоны источника, что создает условия для выполнения зондирования при использовании в обработке точных выражений без низкочастотных асимптотик.

Аппаратура ЭМС реализующая принцип частотного зондирования и компенсации прямого поля двумя встречно включенными приемниками имеет слабо выраженные кривые зондирования, что накладывает ограничения на диапазоны сред, где может быть применена инверсия и кроме того имеет достаточно сложную форму сигнала над локальными приповерхностными аномалиями электропроводности.

Аппаратура ДЭМС, реализующая принцип изопараметрического радиально-частотного зондирования имеет существенно более характерные кривые зондирования ввиду использования двух зондирующих параметров. Это делает разрабатываемую а настоящий момент аппаратуру весьма перспективной для

расчленения верхней части разреза. Конструктивно эта аппаратура упрощена за счет применения нового принципа геометрической компенсации прямого поля генератора. Кроме того модельные и натурные эксперименты показывают, что вторичный сигнал имеет один выраженный экстремум над локальными приповерхностными аномалиями электропроводности.

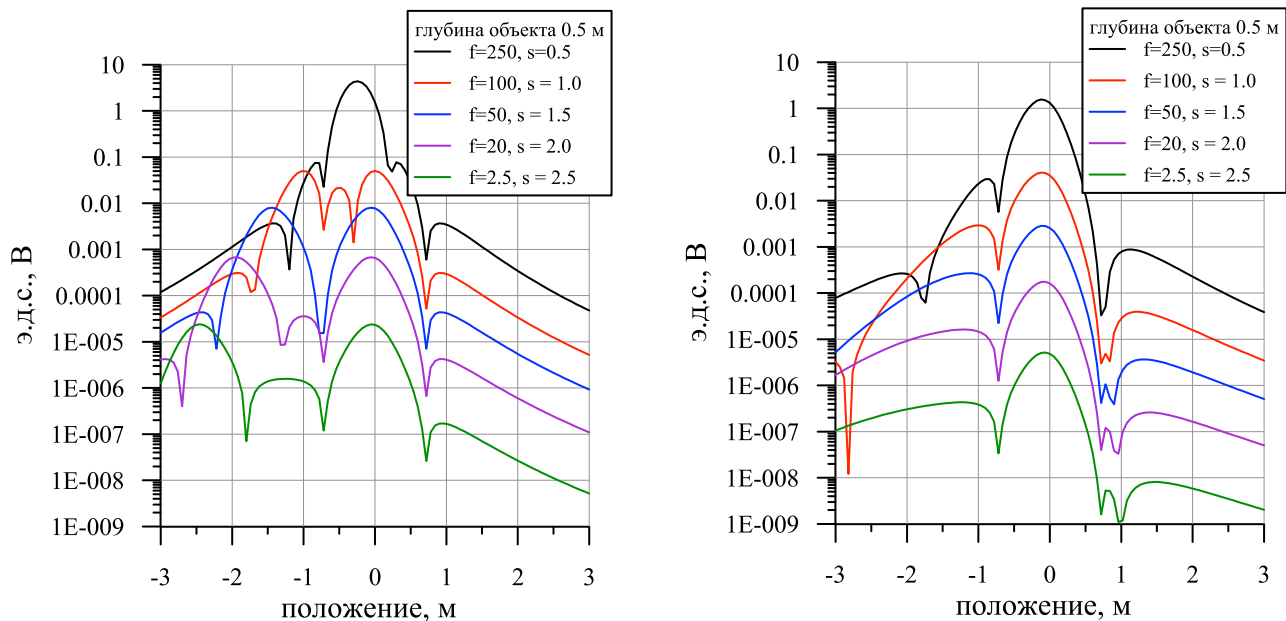


Рисунок 5 Синтетический сигнал зондов, в которых используются пять частот (2.5-250 кГц) и пять разносов (0.5 м – 2.5 м), над локальным проводящим объектом, расположенном на глубине 0.5 м. Слева все катушки располагаются в плоскости генератора, справа – разнесены по вертикали, с удовлетворением условия изопараметричности зонда.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 12-05-33019 мол_а_вед), Президиума СО РАН (Интеграционный проект 2012-2014 гг. № 118) и Гранта президента Российской Федерации (грант МК-7132.2013.5).

Библиография

- McNeill J.D., 1980, Electromagnetic terrain conductivity measurement at low induction numbers: Geonics Limited Technical Note TN 6, October.
- Callegary J.B., Ferré Ty P.A., Groom R.W., 2007, Vertical Spatial Sensitivity and Exploration Depth of Low-Induction-Number Electromagnetic-Induction Instruments: Vadose Zone Journal, 6,158-167.
- Won I.J., Keiswetter D.A., Fields G.R.A., Sutton L.C., 1996, GEM-2: A new multifrequency electromagnetic sensor: Journal of Environmental and Engineering Geophysics, 2(1), 129-138.
- Huang H., Deszcz-Pan M. and Smith B., 2008, Limitations of Small EM Sensors in Resistive Terrain: Presented at The International Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems.
- Балков Е.В. Технология малоглубинного частотного зондирования // Геофизика, 2011, №6, 42-47.
- 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. 16-21 мая 2011. Санкт-Петербург. 4 с.