

МАЛОГЛУБИННОЕ ЧАСТОТНОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ: ПРОСТРАНСТВЕННАЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ, ЭФФЕКТИВНАЯ ГЛУБИНА, ТРАНСФОРМАЦИЯ И ОДНОМЕРНАЯ ИНВЕРСИЯ

Балков Е.В.

Аннотация

Статья посвящена теоретическому и практическому изучению малоглубинного частотного зондирования с помощью компактных многочастотных приборов. В работе использовалась модель двухслойной среды. Исследование включает в себя оценку параметра установки, а также численное моделирование сигналов с последующей их трансформацией в широком диапазоне рабочих частот и удельных электрических сопротивлений среды (частоты от 1 кГц до 1 МГц; сопротивление от 0.001 Ом-м до 1000 Ом-м; мощность первого слоя 1,2,3,5 м). Оценка параметра установки показывает, что компактная многочастотная аппаратура работает в основном вне ближней зоны. Результаты трансформации синтетических сигналов, оценка пространственной чувствительности и эффективной глубины свидетельствуют о выраженной зависимости этих параметров от частоты и удельного электрического сопротивления среды. Кроме этого в статье описаны результаты сравнения обработки полевых данных, полученных методами малоглубинного частотного зондирования и электротомографии на одних и тех же профилях. Результаты трансформации и одномерной инверсии данных малоглубинного частотного зондирования достаточно хорошо соответствуют результатам двумерной инверсии данных электротомографии. Проведенные численные и полевые эксперименты подтверждают состоятельность компактных многочастотных приборов в осуществлении частотного зондирования малых глубин.

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.). Несмотря на определенный прогресс в этой области, возможность и эффективность электромагнитных частотных зондирований, выполняемых компактными портативными приборами, являются предметом споров. Основным недостатком таких приборов принято считать их работу в ближней зоне (при малом значении параметра установки) [1], что обусловлено частотным диапазоном и малым разносом 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 $B = s/d$, где d - 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 [2,3], 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 [4] 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. [5] публикуют принцип работы, алгоритмы обработки и инверсии данных [6], 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 [7], 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. Авторы сформулировали вопрос об эффективности зондирования не в терминах величины индукционного числа, а в терминах чувствительности аппаратуры к малым изменениям сигнала, которые возникают даже в случае малых индукционных чисел, однако просто не могут быть достоверно измерены. Было также наглядно продемонстрировано, что основным ограничением при зондировании сред, обладающим высоким УЭС, являются собственные шумы аппаратуры и внешние помехи.

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 таких приборов на простой слоистой модели. Исследование включает инверсию полевых данных малоглубинного частотного зондирования и сравнение этих результатов с двухмерной инверсией данных метода электротомографии.

Аппаратура малоглубинного частотного зондирования. Диапазон значений индукционного числа.

Одной из недавних реализаций метода малоглубинного частотного зондирования (МЧЗ) в компактном исполнении является аппаратура ЭМС [8, 9]. 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.

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.

Теоретические основы

Разностная э.д.с., измеряемая аппаратурой ЭМС выражается:

$$e = e_1 - e_2 = i\omega m_0 (M_1 H_z(r_1) - M_2 H_z(r_2)),$$

где w – круговая частота, m_0 – магнитная проницаемость вакуума. Измеряемые сигналы обрабатываются с помощью трансформации в кажущиеся сопротивления, либо с помощью одномерной инверсии.

Трансформация разностной э.д.с. производится в модели однородного полупространства [8]. Решение следующего трансцендентного уравнения дает значение кажущегося УЭС (r_a):

$$e = e_1 - e_2 = -iwm \frac{M_T}{2pk^2} \left\{ \frac{M_1}{r_1^5} \left[9 - (9 + 9kr_1 + 4k^2r_1^2 + k^3r_1^3)e^{-kr_1} \right] - \frac{M_2}{r_2^5} \left[9 - (9 + 9kr_2 + 4k^2r_2^2 + k^3r_2^3)e^{-kr_2} \right] \right\}, k^2 = iwm_0 / r_a.$$

В настоящей работе для инверсии используется двухслойная модель (r_0 – УЭС воздуха, r_1, r_2 – УЭС слоев, h – мощность верхнего слоя). Источник, аппроксимируемый вертикальным магнитным диполем с моментом (M_i), размещен на поверхности проводящего слоистого полупространства. Выражение для вертикальной компоненты напряженности магнитного поля (H_z) в таком случае записывается следующим образом [10]:

$$H_z = \frac{M_i}{2p} \int_0^\infty I^3 J_0(Ir) X dl.$$

Здесь X – слоистая функция среды, которая при двух слоях имеет вид:

$$X = \frac{p_1 \cdot ch(p_1 \cdot h) + p_2 \cdot sh(p_1 \cdot h)}{(p_0 \cdot p_1 + p_1 \cdot p_2) \cdot ch(p_1 \cdot h) + (p_1^2 + p_0 \cdot p_2) \cdot sh(p_1 \cdot h)},$$

где $p_j^2 = I^2 + k_j^2$, $k_j^2 = iwm_0 / r_j$, $j = 0..2$.

Инверсия осуществляется с помощью стандартных процедур решения нелинейных обратных задач. Применяется модифицированный метод Ньютона с конечно разностным градиентом (библиотека MS IMSL, входящая в состав пакета Compaq Fortran v6.0). Среднеквадратичная целевая функция минимизируется до тех пор, пока модельные сигналы не приблизятся к экспериментальным с требуемой точностью.

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. Используются 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 (r_1); [1/128, ..., 1/2, 1, 2, ..., 128] – отношения (r_2/r_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 достаточно широкий круг слоистых сред.

Оценка интегральной чувствительности и эффективной глубины исследования

Для оценки зондирующей способности можно использовать анализ пространственной чувствительности. Интегральная чувствительность (“cumulative sensitivity” [4] или “cumulative response” [2]) это величина, которая позволяет определять чувствительность многочастотной электромагнитной аппаратуры к определенным объемам среды. Для модели двухслойной среды интегральная чувствительность может быть найдена по следующей формуле [4]:

$$CS = \frac{S_a - S_1}{S_2 - S_1},$$

где S_a является кажущейся электропроводностью, S_i - электропроводности соответствующих слоев.

Данные на рис. 4 имеют структуру аналогичную данным на рис. 3, при этом вместо значений кажущегося УЭС отображает диаграммы интегральной чувствительности. Последние наглядно демонстрируют выраженную зависимость величины интегральной чувствительности от частоты. Различные комбинации параметров среды обеспечивают большую либо меньшую зависимость, делая некоторые ситуации сложными для разрешения (восстановления истинных параметров). Однако, в целом параметр интегральной чувствительности положительно характеризует зондирующую способность портативной многочастотной аппаратуры, на примере ЭМС.

Значения интегральной чувствительности могут быть также использованы для определения эффективной глубины зондирования (d_e). McNeil и Callegary в своих исследованиях [2, 4] определяли в качестве эффективной такую глубину, при которой значение интегральной чувствительности было равно 0,3. Это означает, что та часть среды, которая находится выше эффективной глубины, обеспечивает 70 % полезного сигнала. На рис. 5а показана относительная эффективная глубина, нормированная на разнос между источником и приемником, для нескольких моделей среды. Значения УЭС варьируются следующим образом: $r_1 / r_2 = 1/10; 10/100; 100/1000$ Ом·м. Нижний график на рис. 5б отображает относительную среднюю эффективную глубину рассчитанную на основании значений, приведенных на рис 5а. Верхний график представляет зависимость абсолютной эффективной глубины, рассчитанной для разноса 2.5 м, соответствующего аппаратуре ЭМС. Представленные диаграммы указывают на существенное влияние используемой частоты на эффективную глубину исследования, что обеспечивает благоприятные условия для зондирований в целом.

Примеры полевых данных и их сравнение с данными электротомографии

В статье рассмотрены два примера полевых данных, которые были получены в рамках комплексных геофизико-геохимических исследований геотермальных зон в Камчатском регионе. Целью геофизических работ было определение глубины и конфигурации гидротермальных резервуаров, газовых каналов и т.п. Изученные среды до представляющих

интерес глубин имели проводящее основание, перекрытое слоем с более высоким УЭС. По одним и тем же профилям были выполнены зондирования аппаратурой ЭМС и зондирования на постоянном токе методом электротомографии (ЭТМ) аппаратурой Скала-48 [11]. На рис. 6 и рис. 7 представлены результаты различного типа обработки данных. Можно видеть, что трансформация данных МЧЗ дает структуры, которые довольно хорошо согласуются с результатами двумерной инверсии данных ЭТМ (Рис. 6а, б; Figure 7а, б), выполненной с помощью коммерческого программного обеспечения Res2DInv (v.3.55). Геоэлектрические границы, полученные в результате одномерной инверсии данных МЧЗ достаточно точно коррелируют с результатами ЭТМ. Одномерная инверсия данных ЭТМ приводит к некорректным результатам в силу двумерной структуры грунта и большого разнеса между электродами (рис. 6г). Измерения методом МЧЗ, выполненные компактным прибором, имеющим небольшой разнос между источником и приемником, позволяют восстанавливать квази-двумерные (для методов с большим разнесом) геологические структуры с помощью одномерной инверсии. (Рис. 6в; Рис. 7в).

Заключение

В работе представлены алгоритмы для вычисления кажущегося удельного сопротивления и параметров горизонтально-слоистой среды на основании трансформации и одномерной инверсии данных метода малоглубинного частотного зондирования. Оценка значений индукционных чисел (параметра ближней зоны), демонстрирует, что компактный многочастотный зонд может работать вне области малых индукционных чисел (ближней зоны). Анализ результатов трансформации синтетических сигналов компактного многочастотного зонда в широком диапазоне параметров среды и аппаратуры указывает на то, что последняя способна корректно восстанавливать параметры простых слоистых моделей. Более предпочтительной является ситуация изучения глубины до кровли проводящего полупространства, перекрытого слоем с более высоким УЭС.

Кроме этого были изучены такие параметры, как интегральная чувствительность и эффективная глубина исследования. Результаты показывают выраженную зависимость этих величин от частоты зондирования и сопротивления среды.

Результаты сравнительных полевых работ методами МЧЗ и ЭТМ показывают, что трансформация сигналов МЧЗ может давать хорошее приближение реальному двумерному распределению УЭС грунта. Одномерная инверсия данных МЧЗ указывает на локальность использованной аппаратуры ЭМС, обеспечивая разрешения структур, являющихся двумерными для метода ЭТМ, с помощью одномерного подхода. Параметры слоистой модели, восстановленной по результатам МЧЗ достаточно точно коррелируют с результатами двумерной инверсии метода ЭТМ.

В итоге можно заключить, что проведенные численные и полевые эксперименты подтверждают состоятельность компактных многочастотных приборов в осуществлении частотного зондирования малых глубин.

Благодарности

Исследование проводилось в группе малоглубинной геофизики Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН. Автор выражает благодарность академику РАН М.И. Эпову, А.К. Манштейну, Ю.А. Манштейну, Г.Л. Панину за существенное влияние и содействие при выполнении настоящей работы.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (Грант №09-05-01138-а, №09-06-00204-а), Президиума СО РАН (Интеграционный проект №16) и Государственного контракта № П1270 в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009 – 2013 годы.

Литература

1. Молочнов Г.В, Радионов М.В., 1982, Частотные электромагнитные зондирования с вертикальным магнитным диполем: Л.: Издательство Ленинградского университета.
2. McNeill J.D., 1980, Electromagnetic terrain conductivity measurement at low induction numbers: Geonics Limited Technical Note TN 6, October.
3. McNeill J.D., 1996, Why doesn't Geonics Limited Build a Multi-Frequency EM31 or EM38?: Geonics Limited Technical Note TN 30, November.
4. 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.
5. 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.
6. Huang H. and Won I.J., 2003, Real-time resistivity sounding using a handheld broadband electromagnetic sensor: Geophysics, **68**, 1224-1231.
7. 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.
8. Балков Е.В., Манштейн А.К., 2001, Трехкатушечный индукционный зонд в частотном зондировании: Геофизический вестник, **12**, 17 – 20.
9. Манштейн А.К., Панин Г.Л., Тикунов С.Ю., 2008, Аппаратура частотного электромагнитного зондирования «ЭМС»: Геология и геофизика, **6(49)**, 571-579
10. Могилатов В. С., 2002, Импульсная электроразведка: Новосибирск, Новосибирский государственный университет.
11. Панин Г.Л., 2009, Многоэлектродная аппаратура методов сопротивлений «Скала-48»: Материалы конференции: инженерная и рудная геофизика, Геленджик.

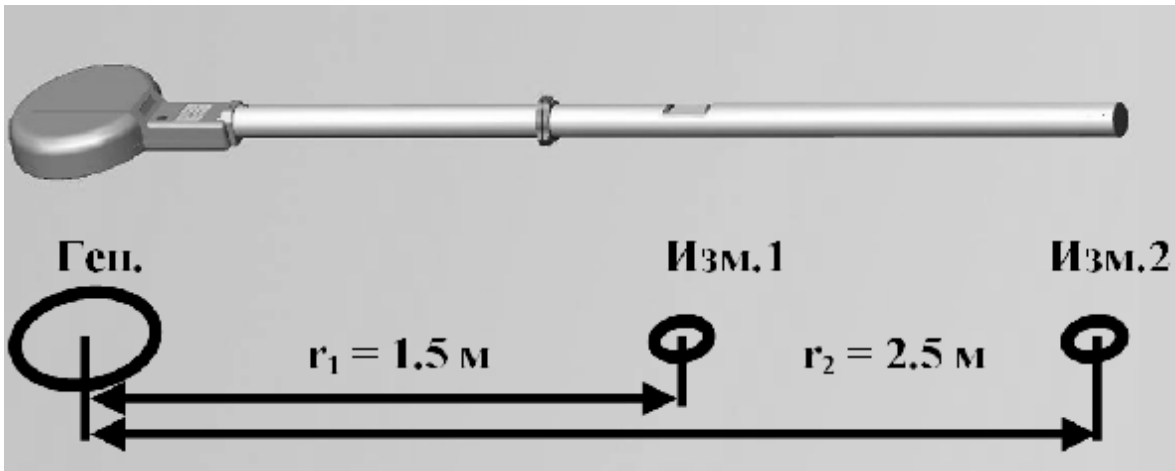


Рис. 1. Аппаратура малоглубинного частотного зондирования ЭМС.

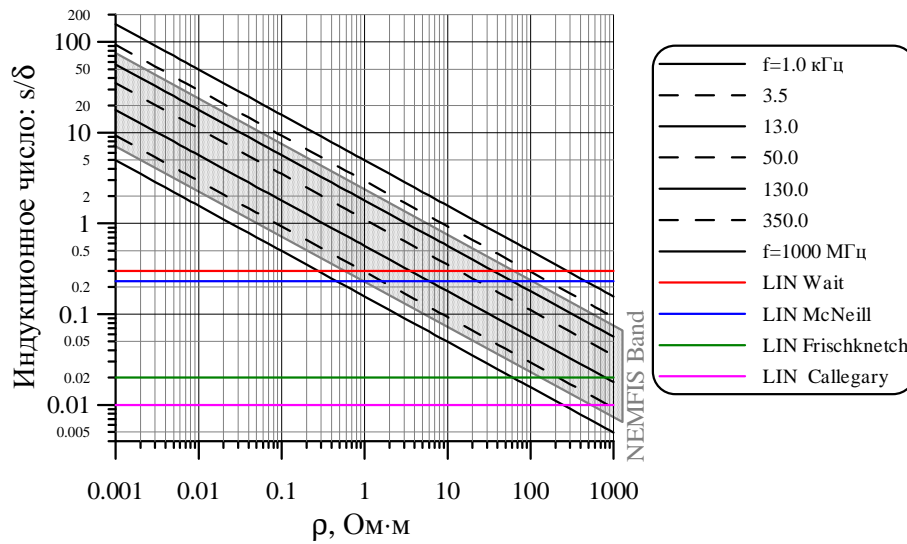


Рис. 2. Значения индукционного числа (параметра установки). Цветные линии обозначают пределы, ограничивающие область малых значений индукционных чисел (ближнюю зону), принятые различными исследователями (LIN – low induction numbers – малые значения индукционного числа). Область, заштрихованная серой,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

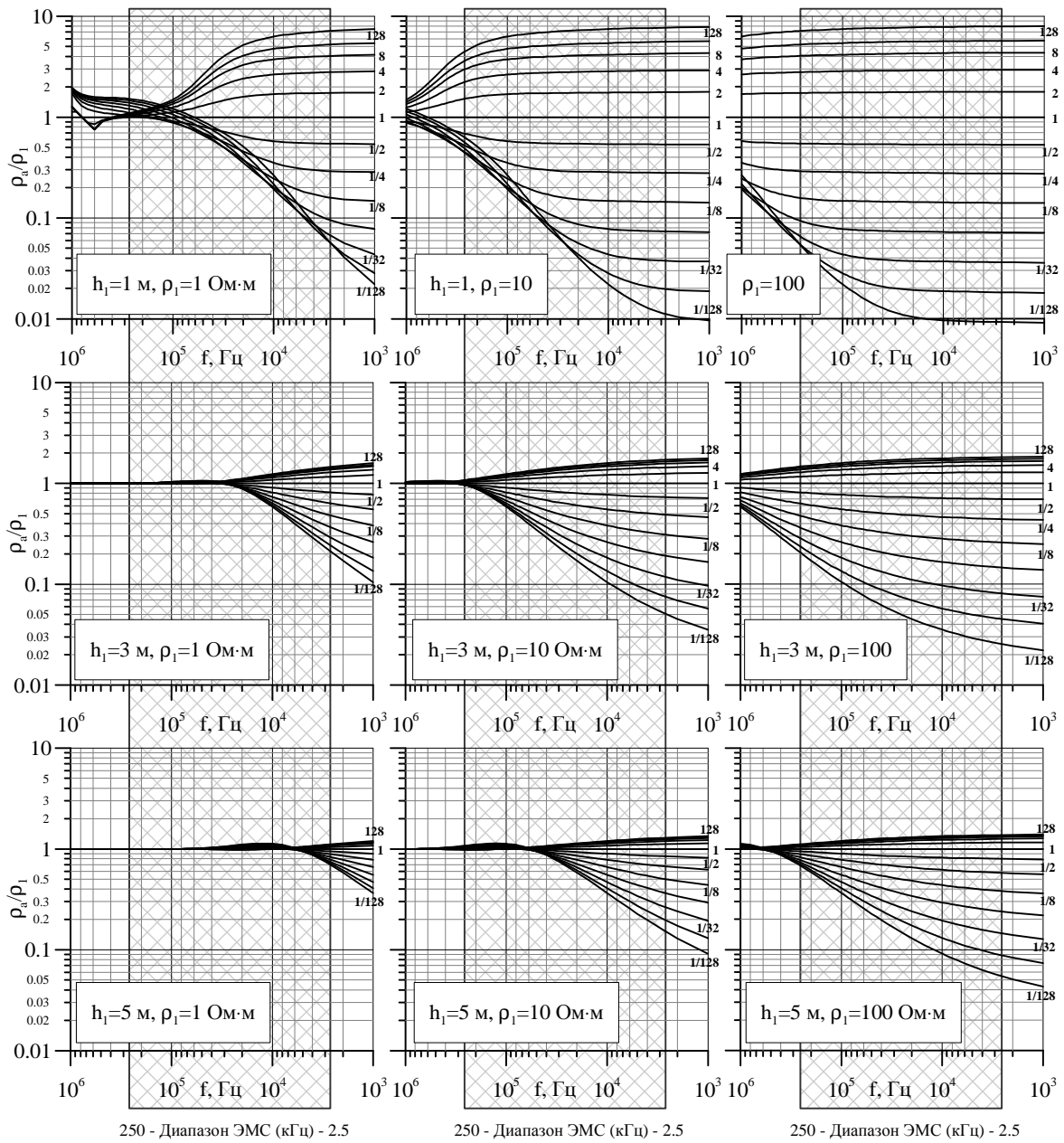


Рис. 3. Результаты трансформации синтетических сигналов над двухслойной моделью среды. Каждый график демонстрирует зависимость кажущегося относительного УЭС от частоты зондирования при различных соотношениях между УЭС слоев ($r_2 / r_1 = 1/128, \dots, 1/2, 1, 2, \dots, 128$) для фиксированных значений мощности и УЭС первого слоя.

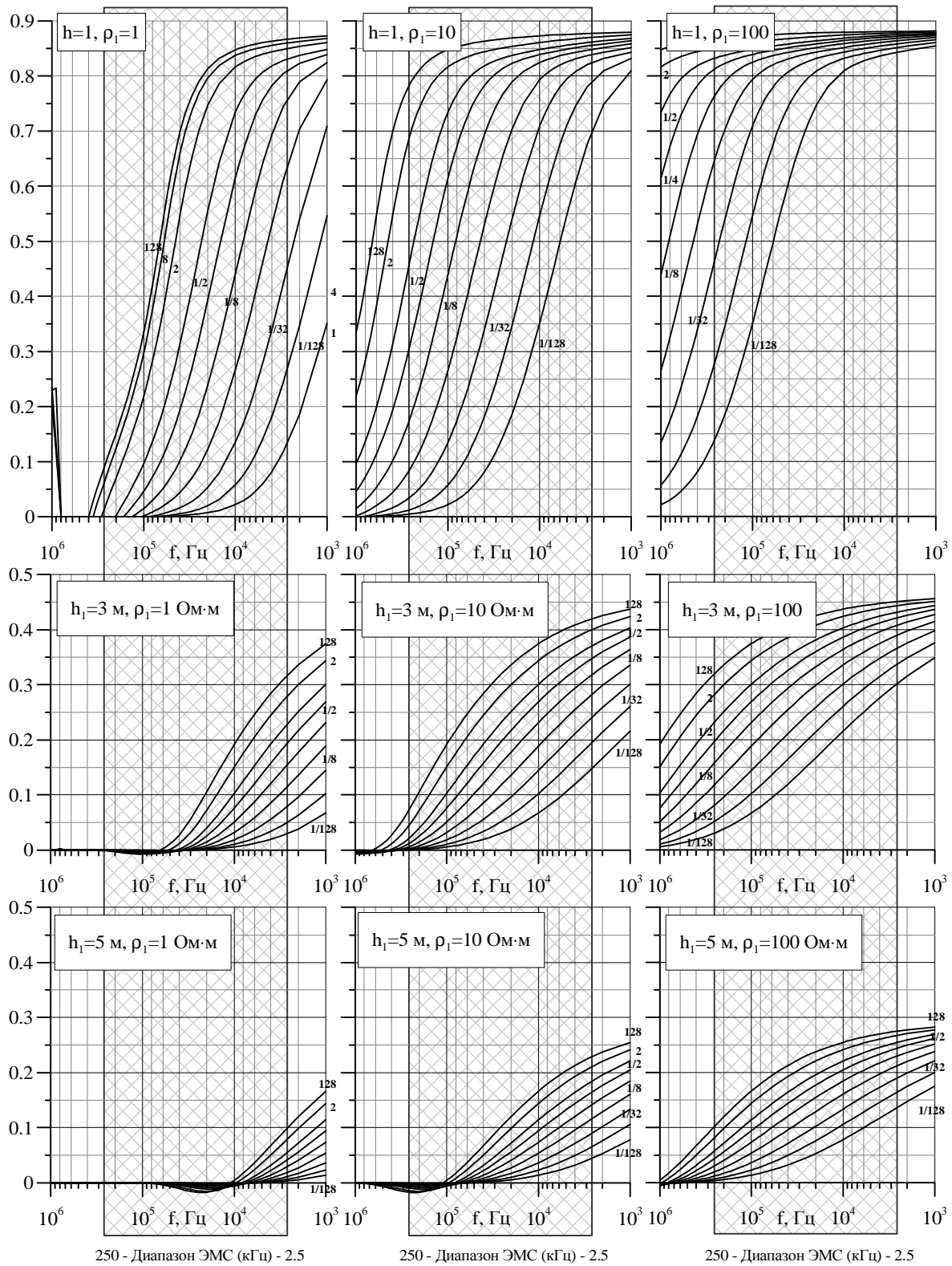


Рис. 4. Интегральная чувствительность для модели двухслойной среды. Каждый график демонстрирует зависимость кажущегося относительного УЭС от частоты зондирования при различных соотношениях между УЭС слоев ($r_2 / r_1 = 1/128, \dots, 1/2, 1, 2, \dots, 128$) для фиксированных значений мощности и УЭС первого слоя.

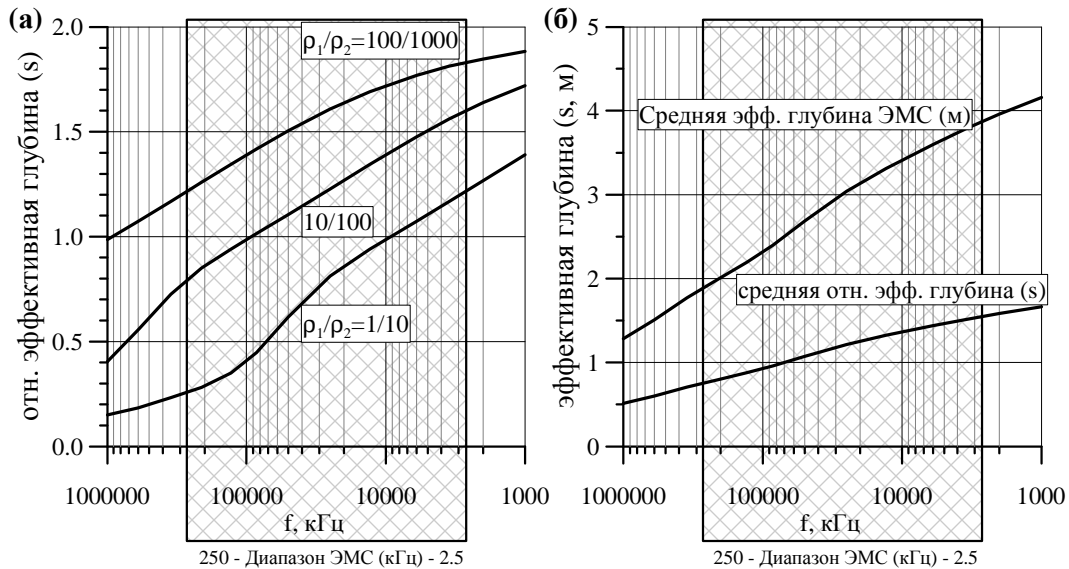


Рис. 5. Эффективная глубина исследования для двухслойной модели среды (соответствующая значению интегральной чувствительности, равному 0.3). а) Относительные значения глубины для трех типов моделей, нормированные на разнос (s) б) Средняя эффективная и абсолютная глубины. Последняя рассчитана для разноса ЭМС (2.5 м).

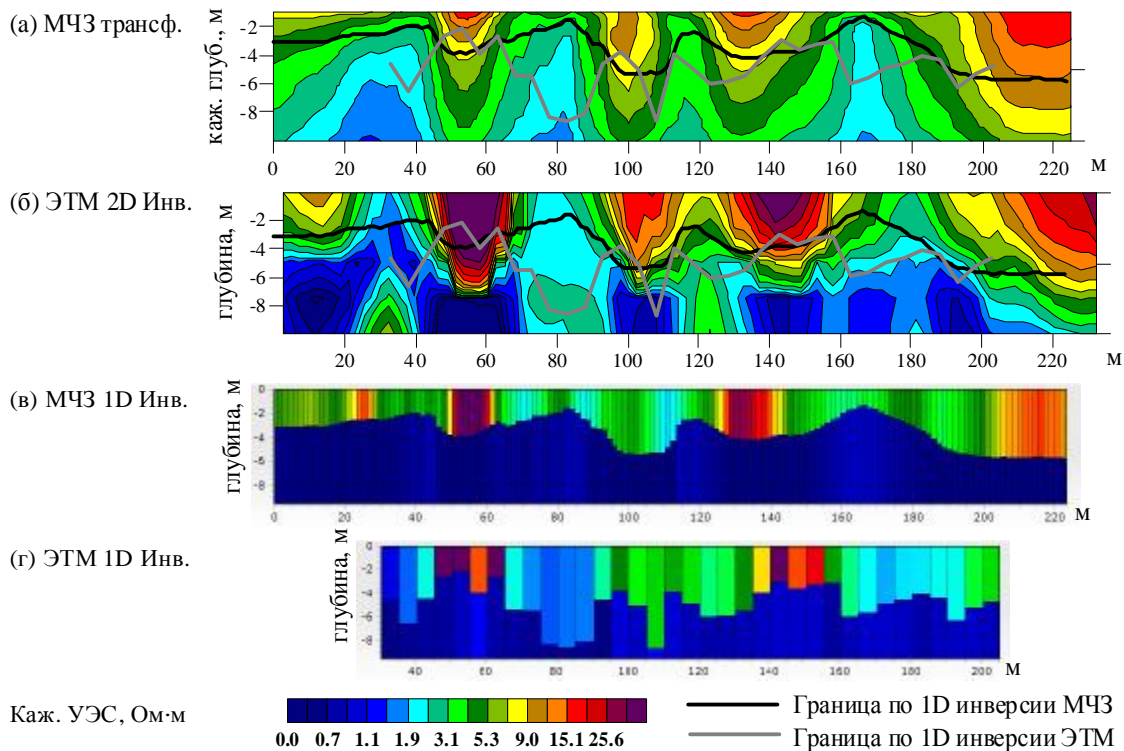


Рис. 6. Сравнение результатов зондирований ЭМС и данных электротомографии на постоянном токе, полученных на одном и том же профиле (Нефтяное поле кальдеры Узон, Камчатка). Измерения малоглубинным частотным зондированием включают данные 14 частот (от 2.5 кГц до 250 кГц) с шагом 1.5 м по профилю. Измерения методом электротомографии выполнены установкой Шлюмберже с шагом между электродами 5 м.

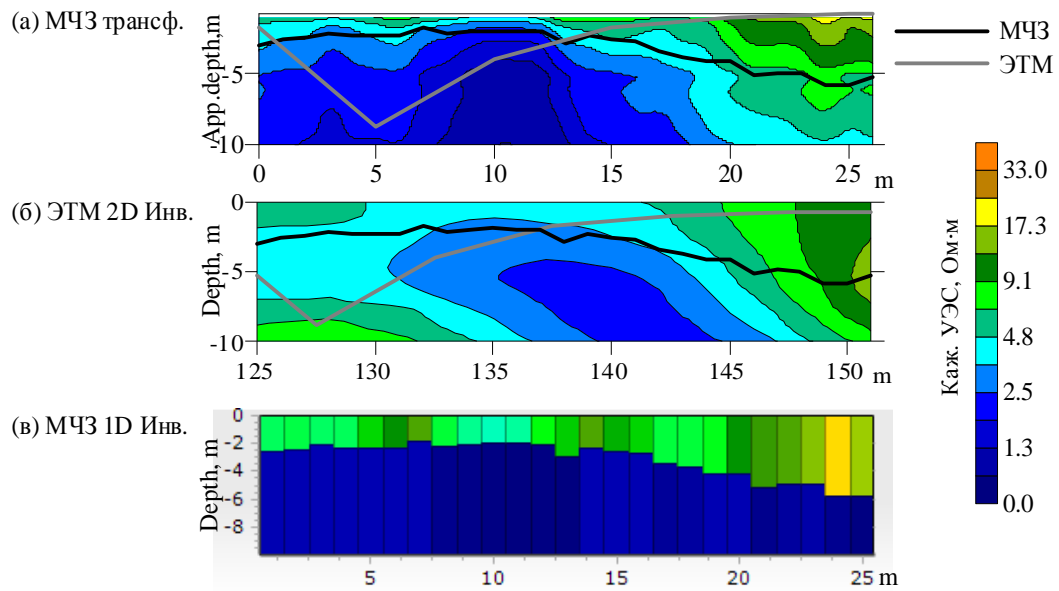


Рис. 7. Сравнение результатов зондирований ЭМС и данных электротомографии на постоянном токе, полученных на одном и том же профиле (Донное поле вулкана Мутновский, Камчатка). Измерения малоглубинным частотным зондированием включают данные 14 частот (от 2.5 кГц до 250 кГц) с шагом 1 м по профилю. Измерения методом электротомографии выполнены установкой Шлюмберже с шагом между электродами 5 м.