

УДК 550.837.21

СПОСОБ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ АУДИОМАГНИТОТЕЛЛУРИЧЕСКИХ ДАННЫХ С УЧЕТОМ АПРИОРНОЙ ИНФОРМАЦИИ

© 2016 г. В.А. Давыдов

Институт геофизики им. Ю.П. Булашевича УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия

Аудиомагнитотеллурические зондирования представляют собой модификацию частотных зондирований, изучающих зависимость импеданса среды от частоты естественных электромагнитных полей. Главная задача при трансформациях импеданса – улучшение выделения на получаемых разрезах областей высоких и низких сопротивлений, отвечающих локальным неоднородностям.

Представлена технология преобразования аудиомагнитотеллурических данных в разрезы эффективных электромагнитных параметров среды с учетом априорной информации о строении верхней части разреза. Подробно описана последовательность процедур при трансформации исходного частотного аудиомагнитотеллурического разреза в глубинные разрезы кажущегося удельного электрического сопротивления и продольной проводимости. Методика обработки позволяет согласовывать разные методы дистанционных и частотных электромагнитных зондирований по глубине для проведения их качественной и полуколичественной интерпретации.

Алгоритм трансформации проверен с помощью математического моделирования на типичных геоэлектрических разрезах. Корректность вычислений изучалась на моделях депрессии рыхлых отложений, тектонического нарушения и водоносного горизонта. Способ преобразования и визуализации АМТ данных опробован на полевых материалах, полученных с помощью аудиомагнитотеллурической станции ОМАР-2м. Исследования проводились на трех геологических объектах, расположенных на Урале – ультраосновном массиве, мраморном карьере и месторождении золота. Разрезы, полученные с помощью представляемого метода, были сопоставлены с двухмерными геоэлектрическими разрезами, построенными по результатам количественной интерпретации.

Технология трансформации позволяет визуально (без решения обратной задачи) выделять в геологическом разрезе форму аномальных проводящих объектов и глубину их залегания, что может значительно повысить общую производительность поисково-оценочных работ на подземные воды, полиметаллические и сульфидные руды.

Ключевые слова: аудиомагнитотеллурическое зондирование, трансформация, математическое моделирование, удельное электрическое сопротивление, эффективная продольная проводимость.

Введение

Как известно, электромагнитные зондирования подразделяются на дистанционные (геометрические), частотные и зондирования методом становления поля. Для качественной интерпретации обычно строят псевдоразрезы кажущихся (ρ_k) или эффективных ($\rho_{эф}$) сопротивлений в зависимости от разноса, частоты или времени становления. При этом однозначно с глубиной связана только величина разносов дистанционных зондирований на постоянном токе; в остальных случаях для построения глубинных разрезов требуются определенные преобразования (трансформации) данных.

Цель настоящей работы – разработка удобного способа преобразования частотных аудиомагнитотеллурических (АМТ) псевдоразрезов в глубинные разрезы эффективных электромагнитных параметров для визуального выделения аномалий электропроводности.

К задачам исследований относятся проверка предлагаемого алгоритма на математических моделях геоэлектрических разрезов и опробование технологии на реальных геологических объектах.

Трансформация частотных зондирований

Аудиомагнитотеллурические зондирования (АМТЗ) представляют собой модификацию частотных зондирований, основанных на использовании скин-эффекта. Глубина исследований зависит от частоты вариаций естественных электромагнитных полей – чем ниже частота, тем глубже проникновение поля. Основными изучаемыми АМТ параметрами являются компоненты тензора импеданса среды Z , представляющие собой отношение ортогональных компонент двух горизонтальных полей – электрического (E_x, E_y) и магнитного (H_y, H_x). Удельное электрическое сопротивление среды (ρ) вычисляется на основе импеданса для модели плоской электромагнитной волны, падающей на земную поверхность. Для решения разведочных задач порой достаточно грубой стратификации разреза путем трансформации частотной зависимости полученных данных в функцию глубины. Главная задача при трансформациях импеданса состоит в улучшении выделения на получаемых разрезах областей высоких и низких сопротивлений, отвечающих локальным неоднородностям [Анищенко, 1994]. Для качественной интерпретации результатов зондирования используется понятие эффективной глубины проникновения электрического поля ($h_{эф}$), которая определяется величиной действующего расстояния – разном r или длиной волны λ . В однородном изотропном пространстве для АМТ зондирований $h_{эф}$ вычисляется как

$$h_{эф} \approx \frac{\lambda}{2\pi\sqrt{2}} = \frac{\delta}{\sqrt{2}} = 356 \sqrt{\frac{\rho}{f}}, \quad (1)$$

где δ – глубина скин-слоя; ρ – удельное электрическое сопротивление однородной среды; f – частота электромагнитного поля [Матвеев, 1985]. Из этой формулы следует, что глубина исследования при частотном зондировании зависит не только от частоты, но и от электрического сопротивления среды.

Существуют разные способы трансформации магнитотеллурических кривых, каждый из которых основан на определенных допущениях и имеет свои достоинства и недостатки. Для простых вычислений удобен метод Ниблетта, но получаемый с его помощью результат страдает неконтролируемыми выбросами. Трансформации Шмуккера и Молочного–Ле Вьета [Электроразведка..., 1989] приводят к неверным результатам при сильных помехах. Кроме того, существующие методы преобразований не учитывают априорной информации о разрезе. В связи с отмеченным был разработан и опробован удобный способ трансформации частотных кривых АМТЗ с учетом имеющихся данных о верхней части разреза. Технология трансформации заключается в нахождении эффективной мощности активного слоя h_i для заданной частоты f_i . Для этого среда представляется в виде серии отдельных пластов с проводимостью ΔS_i ; мощность каждого пласта равна разности $h_i - h_{i-1}$, определяемой для двух ближайших частот (рис. 1).

Алгоритм трансформации реализуется следующим образом.

1. Проводится сглаживание частотной кривой эффективного сопротивления $\rho_{эф}(f) \rightarrow \rho'(f)$. В простых случаях можно воспользоваться оператором Гаусса; при наличии сильных помех неплохие результаты дают полиномиальные сглаживающие фильтры Савицкого–Голея.

2. Принимая в первом приближении среду однородной, находятся эффективные глубины h_i' для используемого набора частот f_i :

$$h_1' = 356(\rho_1'/(f_1))^{0.5}, h_2' = 356(\rho_2'/(f_2))^{0.5}, \dots, h_n' = 356(\rho_n'/(f_n))^{0.5}.$$

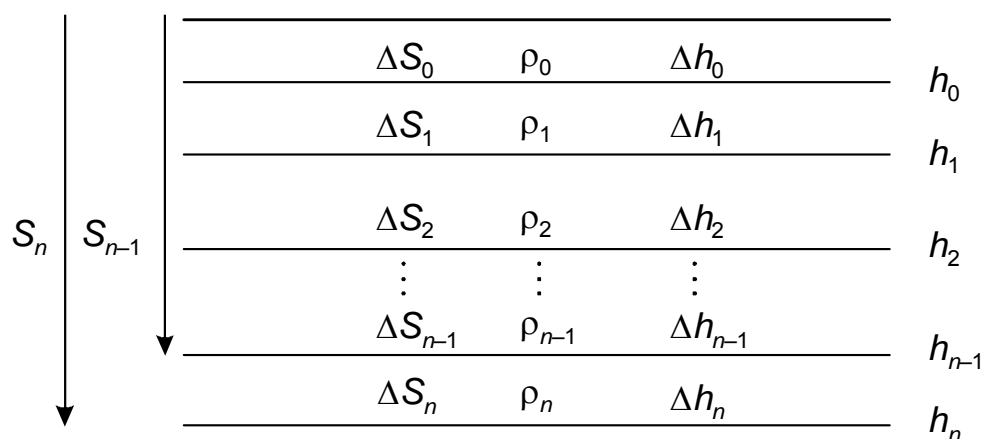


Рис. 1. Электрофизическая модель среды

3. Вычисляются мощности отдельных слоев; отметка подошвы верхнего слоя задается вручную в диапазоне $h_1' > h_0 \geq 2$ с использованием информации о мощности рыхлых отложений в районе работ, полученной по данным бурения или геофизических методов:

$$\Delta h_i = h_i' - h_{i-1}', \quad i=1, 2, \dots, n.$$

4. Проверяется критерий монотонного возрастания глубины при снижении частоты ($h_{i+1}' > h_i' > h_{i-1}'$) и условие заданной минимальной мощности отдельного слоя ($\Delta h_i \geq \Delta h_{\min}$). При невыполнении хотя бы одного из требований проводится сглаживание $\rho'(f)$ более высокого порядка и повторяются процедуры 2, 3.

5. Последовательно сверху вниз рассчитывается продольная проводимость каждого слоя; параметры самого верхнего слоя задаются по данным вертикальных электрических зондирований (ВЭЗ) или с использованием другой априорной информации:

$$\Delta S_0 = \Delta h_0 / \rho_0, \quad \Delta S_1 = 2\Delta h_1 / (\rho_1 + \rho_0), \quad \Delta S_2 = 2\Delta h_2 / (\rho_2 + \rho_1), \quad \dots, \quad \Delta S_n = 2\Delta h_n / (\rho_n + \rho_{n-1}).$$

6. Рассчитывается суммарная продольная проводимость для каждого значения частоты из набора f_1, f_2, \dots, f_n :

$$S_0 = \Delta S_0, \quad S_1 = S_0 + \Delta S_1, \quad S_2 = S_1 + \Delta S_2, \quad \dots, \quad S_n = S_{n-1} + \Delta S_n.$$

7. Теперь можно последовательно определить значения эффективной глубины h_i суммарного эквивалентного слоя для каждой частоты f_i с учетом слоистости разреза:

$$h_1 = 356(h_0 / (S_1 \cdot f_1))^{0.5}, \quad h_2 = 356(h_1 / (S_2 \cdot f_2))^{0.5}, \quad \dots, \quad h_n = 356(h_{n-1} / (S_n \cdot f_n))^{0.5}.$$

8. Зависимость $\rho_{\text{эф}}$ от $h_{\text{эф}}$ получаем путем замены частот f_1, f_2, \dots, f_n исходной кривой $\rho_{\text{эф}}(f)$ на соответствующие им значения эффективных глубин h_1, h_2, \dots, h_n .

9. Для лучшей визуализации аномалий электропроводности дополнительно строятся разрезы эффективной продольной проводимости $S_{\text{эф}} = h_{\text{эф}} / \rho_{\text{эф}}$, на которых искомые локальные геоэлектрические неоднородности выделяются достаточно контрастно.

Следует еще раз отметить принципиальные отличия предлагаемого преобразования от других существующих методов трансформации; они состоят, во-первых, в использовании априорной информации о верхней части разреза и, во-вторых, в том, что трансформация производится только путем преобразования $f_i \rightarrow h_i$, оставляя первичные значения удельного электрического сопротивления без изменений.

Получаемые глубинные АМТ разрезы $\rho_{\text{эф}}$ по виду близки к разрезам кажущихся сопротивлений ρ_k дистанционных электромагнитных зондирований, таких, например, как ВЭЗ, но не являются их полным эквивалентом. В то же время рассмотренный

механизм может быть применен для согласования любых частотных и дистанционных зондирований, включая зондирования индукционного типа.

Одно из применений технологии согласования – стыковка разноглубинных методов зондирований для построения качественных геоэлектрических разрезов во всем диапазоне глубин. При построении совмещенных разрезов ρ_k по вертикальной оси следует откладывать эффективную глубину исследования $h_{эф}$, которая для ВЭЗ определяется как $AB/4$, для дипольных электрических установок – как $r/2$. Использование при пересчете АМТЗ информации о верхнем слое разреза, полученной при помощи дистанционного зондирования, обеспечивает взаимную увязку величин ρ обоих методов.

Математическое моделирование

Математическое моделирование для проверки возможностей рассматриваемого алгоритма проводилось на простых математических моделях, адекватных распространенным на Урале типам геологических разрезов (рис. 2, а).

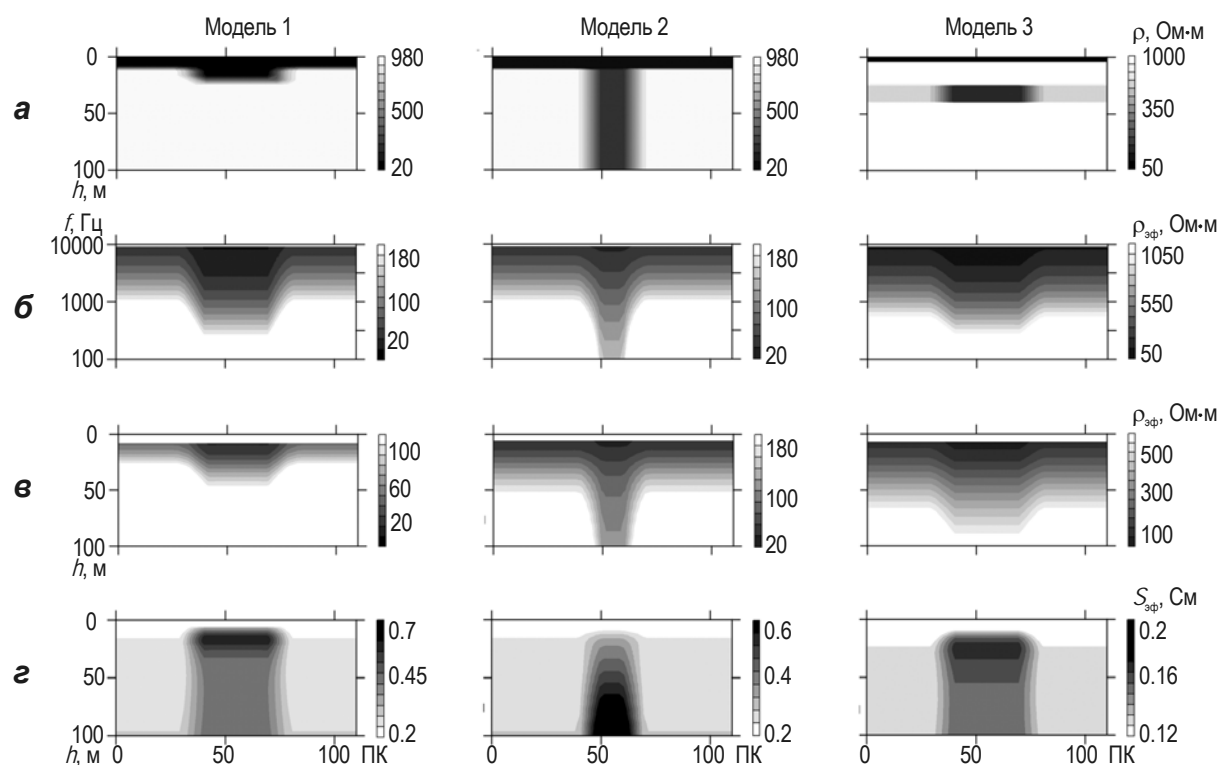


Рис. 2. Используемые при моделировании модели разрезов (а), их расчетные частотные образы – псевдоразрезы $\rho_{эф}$ (б), трансформированные глубинные разрезы $\rho_{эф}$ (в) и разрезы эффективной продольной проводимости $S_{эф}$ (з)

Модель 1 представляет разрез, типичный для погребенных русел ручьев, с которыми могут быть связаны россыпные месторождения благородных металлов. Мощность слоя рыхлых отложений суглинистого состава ($\rho_1=20$ Ом·м) меняется от 10 до 20 м; удельное электрическое сопротивление коренных пород – $\rho_2=1000$ Ом·м.

Модель 2 соответствует тектоническому нарушению в коренных породах при неизменной мощности поверхностных отложений. Тектонические разломы – важные структурные элементы, контролирующие всю геологическую обстановку складчатых областей. Места их сгущения и пересечения могут указывать на месторождения жильного типа. Удельное электрическое сопротивление зоны нарушения (ρ_3) принято равным 200 Ом·м.

Модель 3 отвечает ситуации, когда в трещиноватых скальных породах ($\rho_3=500 \text{ Ом}\cdot\text{м}$) присутствует водоносный горизонт ($\rho_4=100 \text{ Ом}\cdot\text{м}$), водоупором для которого служат монолитные коренные породы ($\rho_5=5000 \text{ Ом}\cdot\text{м}$). Подобные разрезы наблюдаются в затопленных (или заглинизованных) подземных горных выработках.

Для проверки корректности используемого способа преобразования представлялось достаточным сопоставление с одномерным геоэлектрическим разрезом. При моделировании прямая задача АМТЗ решалась с применением программы *AMTINV*, разработанной в Университете Оулу (Финляндия) [Pirttijärvi, 2004].

Анализируя представленное на рис. 2, надо отметить, что на псевдо- и трансформированных разрезах $\rho_{\text{эф}}$ (см. рис. 2, б, в) все три модели характеризуются схожей депрессией сопротивлений и визуально мало отличаются друг от друга. Можно только констатировать, что трансформированные разрезы $\rho_{\text{эф}}$ (см. рис. 2, в) подобны разрезам ρ_k дистанционных зондирований. Разрезы же эффективной продольной проводимости $S_{\text{эф}}$ (см. рис. 2, г), несмотря на некоторое искажение и “размывание” объектов, позволяют судить о форме проводящих тел и глубине их залегания.

Примеры применения предлагаемого способа преобразования и визуализации данных АМТЗ на полевых материалах

Как уже отмечалось выше, предлагаемый способ преобразования и визуализации данных АМТЗ был опробован на полевых материалах, полученных с помощью аудиоманнитотеллурической станции ОМАР-2м [Давыдов, 2015] на трех объектах – ультраосновном массиве Рай-Из (юго-западная часть Полярного Урала), Верхне-Уфалейском мраморном карьере (Челябинская обл., Южный Урал), шахтном поле Березовского золоторудного месторождения (Средний Урал). Полевые наблюдения проводились в частотном диапазоне 100–10000 Гц по методике экспресс-съемки горизонтальных компонент электромагнитного поля E_x и H_y в движении с остановками [Давыдов, 2014а]. Магнитная компонента H_y измерялась с помощью активного датчика АМД-5 [Давыдов, 2014б], электрическая E_x – с использованием стелющейся линии, располагаемой по линии профиля.

Камеральная обработка включала следующие последовательные этапы.

1. Фильтрация промышленных помех.
2. Получение частотных спектров на основе быстрого преобразования Фурье.
3. Восстановление истинных амплитуд сигналов с учетом амплитудно-частотной характеристики измерительных каналов.
4. Расчет продольного импеданса среды – $Z=E_x/H_y$.
5. Расчет эффективного удельного электрического сопротивления – $\rho_{\text{эф}}=|Z|^2/2\pi f\mu_0$, где $\mu_0=4\pi\cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$ – магнитная проницаемость воздуха.
6. Построение частотного псевдоразреза $\rho_{\text{эф}}(f)$.
7. Трансформация частотной зависимости $\rho_{\text{эф}}(f)$ в глубинный разрез эффективных сопротивлений $\rho_{\text{эф}}(h_{\text{эф}})$.
8. Построение глубинных разрезов эффективных удельных сопротивлений $\rho_{\text{эф}}(h_{\text{эф}})$ и продольной проводимости $S_{\text{эф}}(h_{\text{эф}})$.

Далее рассматриваются результаты применения предлагаемой трансформации с использованием данных по трем вышеназванным геологическим объектам Урала. Результирующие материалы для всех объектов представлены единообразно – сверху вниз на рис. 3–5 расположены частотный псевдоразрез $\rho_{\text{эф}}$ (а), глубинный разрез $\rho_{\text{эф}}$ (б) и разрез эффективной продольной проводимости $S_{\text{эф}}$ (в); в подрисуночных подписях приводятся необходимые комментарии.

Ультраосновной массив Рай-Из (юго-западная часть Полярного Урала)

Геофизические работы на массиве Рай-Из проводились для выделения зон, перспективных на обнаружение хромового оруденения, уточнения границ литологических разностей пород и тектонической структуры участка.

Геофизические исследования сопровождали геолого-поисковые работы на хромовые руды и специализированные геологические исследования. АМТ зондирования выполнялись для изучения распределения электрофизических параметров горных пород по глубине и установления их возможной связи с оруденением. По результатам проведенных работ было выяснено, что большинство рудопроявлений хромитов на исследованном участке приурочено к зонам тектонических нарушений – рудоконтролирующим разломам, которые идентифицированы с помощью детальной магниторазведки и гравиметрии и довольно уверенно выделяются и на АМТ разрезах (рис. 3). Можно видеть, что на реальном геологическом объекте проявляются все характерные геоэлектрические особенности тектонических нарушений, выявленные при математическом моделировании (см. рис. 2, модель 2).

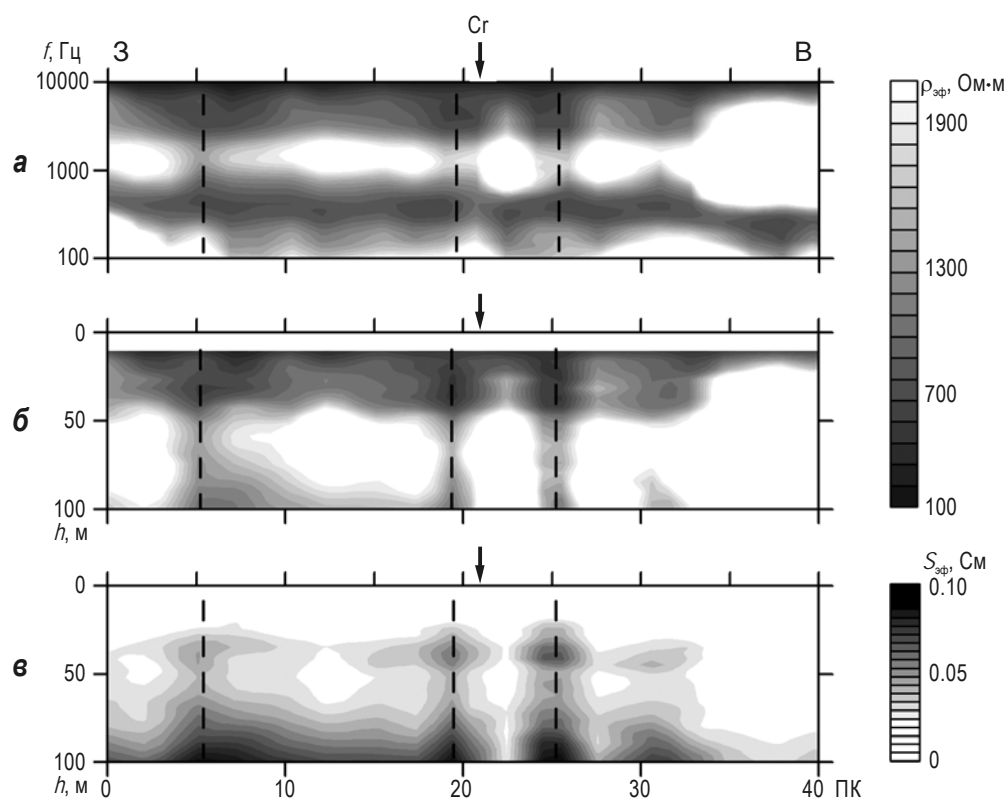


Рис. 3. Ультраосновной массив Рай-Из, Полярный Урал. Геофизические разрезы в районе хромитового оруденения. Штриховые вертикальные линии – рудоконтролирующие тектонические нарушения. Стрелкой на горизонтальной оси отмечено место выхода хромитовой руды на поверхность

Верхне-Уфалейский мраморный карьер (Челябинская обл., Южный Урал)

Работы в карьере проводились с целью обнаружения областей максимального водопритока для бурения откачных скважин. При этом задача геофизических исследований состояла в локализации тектонических нарушений, оперяющих известный региональный разлом, расположенный к северу от участка.

По результатам площадной АМТ съемки выявлены линейные проводящие структуры, в пределах которых были пробурены две скважины – скв. С-1 до глубины 150 м и скв. С-2 до глубины 100 м. В обеих скважинах встречены сильнотрещиноватые мраморы с карстовыми полостями. В скв. С-1 вода появилась на глубине 105 м, в скв. С-2 – на глубине 82 м. Зона трещиноватости проявилась на разрезах $\rho_{эф}$ (рис. 4, а, б) областями пониженных сопротивлений (ПК 16–26).

Связанное с повышенной обводненностью тектоническое нарушение визуально прослеживается только на частотном псевдоразрезе (см. рис. 4, а). Зато подтвержденное бурением местоположение области водопритока отмечено двумя положительными аномалиями продольной проводимости (рис. 4, в) в интервале ПК 17–21 на глубине 80 и 110 м. Следует отметить, что в реальных условиях водоносный горизонт выделился более контрастно, чем при математическом моделировании (см. рис. 2, модель 3).

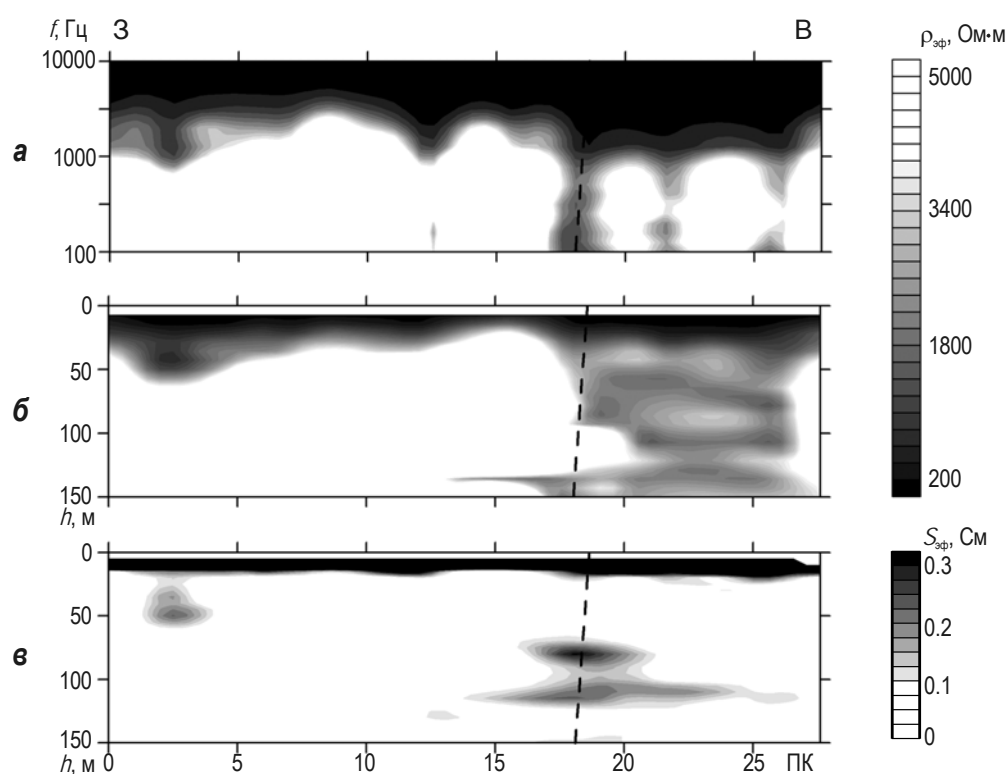


Рис. 4. Верхне-Уфалейский мраморный карьер (Челябинская обл., Южный Урал). Геофизические разрезы по профилю в карьере мраморизованного известняка. Штриховые линии – тектоническое нарушение, связанное с повышенным водопритоком

Шахтное поле Березовского золоторудного месторождения, Средний Урал

Березовское золоторудное месторождение разрабатывается с XVIII в.; горные выработки проходят по дайкам гранитоид-порфиров мощностью 10–20 м, секущим вмещающую вулканогенно-осадочную толщу. Известно более 350 даек, которые пронизаны “лестничными” кварцевыми жилами с золотосульфидным оруденением. Кроме “лестничных”, на месторождении развиты мощные “красичные” жилы, которые могут выходить за пределы даек во вмещающие породы [Сазонов и др., 1999].

Шахтное поле рудника частично расположено под территорией г. Березовский. Точное местоположение старых горных выработок и, соответственно, возможных пустот, представляющих опасность при градостроительстве, не всегда известно. Для их

выявления по рекомендации Березовского рудоуправления в состав инженерно-геологических изысканий были включены геофизические работы, в том числе профильные АМТЗ. Результаты по одному из профилей АМТЗ, полученные с использованием представленной в статье методики, показаны на рис. 5.

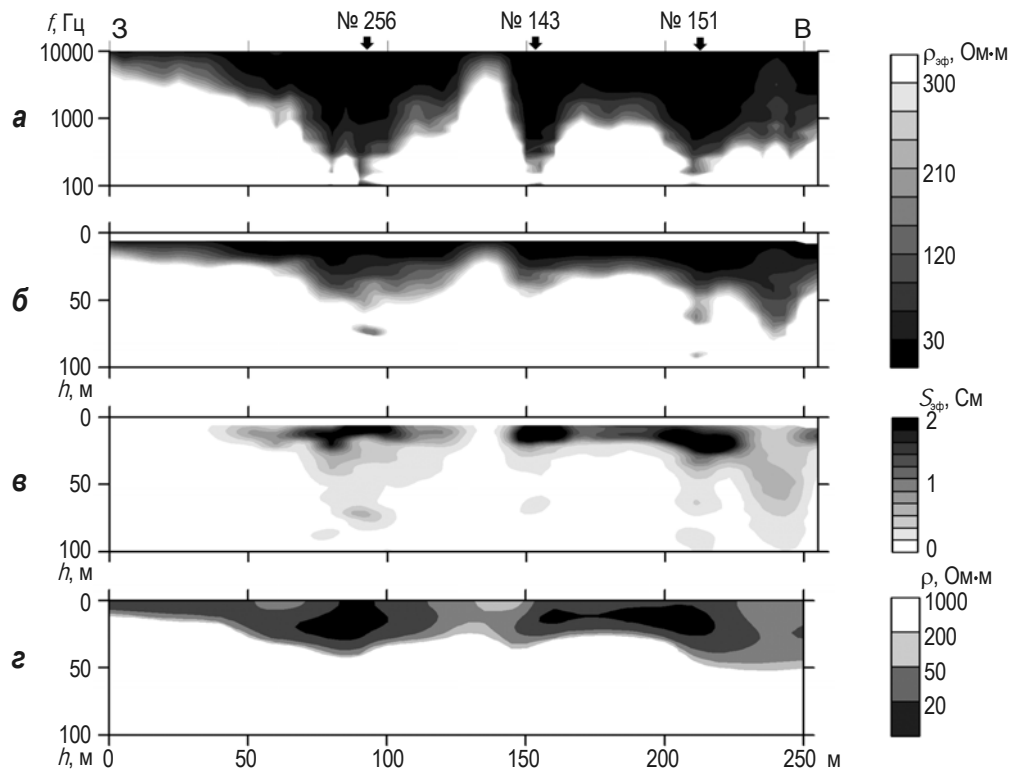


Рис. 5. Шахтное поле Березовского золоторудного месторождения, Средний Урал. Геофизические разрезы в районе старых подземных разработок: *a*, *б*, *в* – то же, что на рис. 3, 4; *г* – геоэлектрический разрез, полученный в результате двумерной инверсии АМТЗ. Стрелками отмечено положение “красичной” жилы № 256, даек №№ 143 (Леонтьевской) и 151

По данным Березовского рудоуправления, старые горные работы на исследуемом участке велись по “красичной” жиле № 256, дайкам №№ 143 (Леонтьевской), 151 на глубину до 15–25 м. Выработанное пространство довольно четко отображается на разрезах низкоомными аномалиями (см. рис. 5, *a*, *б*, *в*).

Помимо представленной в статье технологии, при обработке наблюдений по рассматриваемому профилю была применена программа двумерной инверсии ZondMT2D [Каминский, 2006]. Геоэлектрический разрез, полученный в результате двумерной инверсии данных АМТЗ, приведен на рис. 5, *г*, где можно видеть, что положение низкоомных аномальных зон совпадает с положением аналогичных зон, выделенных с использованием представляемого автором способа трансформации.

Выводы

Результаты математического моделирования и практических работ на реальных геологических объектах свидетельствуют о корректности представленного способа преобразования частотных аудиоманнитотеллурических данных в глубинные разрезы эффективных электромагнитных параметров среды.

Методика обработки дает возможность при необходимости согласовывать данные разных методов дистанционных и частотных электромагнитных зондирований по глубине для проведения их качественной и полуколичественной интерпретации.

Удобная для пользователя технология трансформации позволяет без решения обратной задачи визуально проследивать в геологическом разрезе форму аномальных проводящих объектов и глубину их залегания. Это может значительно повысить общую производительность поисково-оценочных работ на подземные воды, полиметаллические и сульфидные руды.

Литература

- Анищенко Г.Н.* О трансформациях импеданса при магнитотеллурических зондированиях // Прикладная геофизика. Вып. 130. М.: Недра, 1994. С.48–66.
- Давыдов В.А.* Аудиоманнитотеллурическая съемка в движении // Геофизика. 2014а. № 2. С.47–53.
- Давыдов В.А.* Эквивалентные схемы и основные характеристики различных датчиков электромагнитных сигналов в широкой полосе частот // Уральский геофизический вестник. 2014б. № 1 (23). С.46–54.
- Давыдов В.А.* Измерительная аппаратура ОМАР-2 для электромагнитных методов исследований // Уральский геофизический вестник. 2015. № 1 (25). С.37–41.
- Каминский А.Е.* Программа интерпретации магнитотеллурических зондирований ZondMT2d: Руководство пользователя. СПб.: Zond Software, 2006. 22 с.
- Матвеев Б.К.* Электроразведка при поисках месторождений полезных ископаемых. М.: Недра, 1985. 375 с.
- Сазонов В.Н., Огородников В.Н., Коротеев В.А., Поленов Ю.А.* Месторождения золота Урала. Екатеринбург: УГГГА, 1999. 570 с.
- Электроразведка. Справочник геофизика / Под ред. В.К. Хмелевского, В.М. Бондаренко. М.: Недра, 1989. 438 с.
- Pirttijärvi M.* AMTINV – 1D interpretation of audio-magnetotelluric EM soundings. User's guide. University of Oulu, Finland. 2004. 8 p.

Сведения об авторе

ДАВЫДОВ Вадим Анатольевич – кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, Институт геофизики им. Ю.П. Булашевича УрО РАН. 620016, Екатеринбург, ул. Амундсена, д. 100. Тел.: +7(922) 201-77-30. E-mail: davyde@yandex.ru

AUDIO MAGNETOTELLURIC DATA TRANSFORMATION USING A PRIORI INFORMATION

V.A. Davydov

Institute of Geophysics of UB RAS, Yekaterinburg, Russia

Abstract. Audio magnetotelluric (AMT) soundings represent updated frequency soundings studying dependence of medium impedance on frequency of natural electromagnetic fields. The main task during impedance transformation is to improve the identification of high and low values of resistance corresponding to local heterogeneities based on the cross-sections obtained.

The paper presents the method of AMT data transformation to cross-sections of effective electromagnetic parameters using a priori information on a structure of the cross-section upper part. The sequence of procedures required to transform the initial frequency AMT cross-section into the apparent resistivity and longitudinal conductivity cross-sections is described in details. The processing technique allows to conform the different methods

of remote and frequency electromagnetic soundings at various depths for their qualitative and semi-quantitative interpretation. The transformation algorithm was tested using the mathematical modeling of typical geoelectric cross-sections. The calculation results were analyzed for the following models: depression of loose sediments, fault, and water-bearing horizon. The method of transformation and visualization was applied to the observational data obtained using the AMT station OMAR-2m developed earlier. Observations were conducted on three geological objects in the Urals: block of ultramafic rocks, marble open pit, and a gold deposit. The cross-sections obtained were compared with two-dimensional geoelectric sections constructed using the results of quantitative interpretation. It is shown that the method proposed allows visual recognition of the form and depth of anomalous conducting objects without solution of the inverse problem, which can considerably increase the general productivity of prospecting for water-bearing horizons, polymetallic and sulphidic ores.

Keywords: audio magnetotelluric sounding, transformation, mathematical modeling, resistivity, effective longitudinal conductivity.