

УДК 550. 837.21: 550.8.052

УЧЕТ ВЛИЯНИЯ ВЕРХНЕЙ ЧАСТИ РАЗРЕЗА НА РЕЗУЛЬТАТЫ АУДИОМАГНИТОТЕЛЛУРИЧЕСКИХ ЗОНДИРОВАНИЙ С ПОМОЩЬЮ КОНТРОЛИРУЕМОГО ИСТОЧНИКА В БЛИЖНЕЙ ЗОНЕ

Давыдов Вадим Анатольевич,
davyde@yandex.ru

Институт геофизики им. Ю.П. Булашевича УрО РАН,
Россия, 620016, г. Екатеринбург, ул. Амурдсена 100.

Актуальность. Работа направлена на устранение пробела в получении данных о верхней части разреза при аудиоманнителлурических зондированиях. Одновременно решается проблема неконтролируемого смещения кривых зондирований за счет гальванических искажений, вносимых приповерхностными неоднородностями.

Цель работы заключается в опробовании методики исследований методом аудиоманнителлурических зондирований совместно с контролируемым источником в ближней зоне для получения сведений о верхней части разреза и внесении статических поправок.

Методы. Аудиоманнителлурические зондирования проводились с помощью приемно-регистрирующей аппаратуры ОМАР-2 (ИГФ УрО РАН, г. Екатеринбург) в частотном диапазоне 60–16000 Гц. Основные принципы обработки аудиоманнителлурических зондирований основываются на базе ранее разработанного способа преобразования частотных кривых зондирований в геометрические кривые с учетом априорной информации. Для детального изучения верхней части разреза были использованы два метода: вертикальные электрические зондирования и дистанционные индукционные зондирования. Работы методом вертикальных электрических зондирований проводились комплектом аппаратуры ЭРА-МАКС (НПП «ЭРА», г. Санкт-Петербург) по стандартной методике. Дистанционные индукционные зондирования выполнены аппаратурой МЧЗ-8 (ИГФ УрО РАН, г. Екатеринбург) на частоте 10 кГц по отработанной ранее методике работ.

Результаты. Выполнены опытно-методические работы, где в качестве контролируемого источника выступают генератор электрического поля с гальваническим заземлением и излучатель переменного магнитного поля индукционного типа. Проведены сравнения результатов обработки аудиоманнителлурических зондирований с природным источником сигналов и с дополнительным возбуждением искусственного поля. Выяснено, что трансформированные разрезы с использованием контролируемых источников различных типов имеют близкие параметры, они характеризуются повышенной контрастностью и большей достоверностью при выделении локальных объектов. Предложен оптимальный вариант установки для измерений аудиоманнителлурических зондирований с дополнительным использованием индукционного источника поля типа вертикального магнитного диполя.

Выводы. Выполненные исследования показали, что использование контролируемого источника электромагнитного поля в ближней зоне улучшает информативность аудиоманнителлурических зондирований и позволяет получить более достоверную информацию о геологическом строении разреза за счет внесения статических поправок.

Ключевые слова:

Аудиоманнителлурические зондирования, импеданс, трансформация, вертикальный магнитный диполь, дистанционные зондирования, геоэлектрический разрез.

Введение

Аудиоманнителлурические зондирования (АМТЗ) являются вариантом метода магнитотеллурических зондирований (МТЗ), изучающих средние глубины и использующих в качестве источника естественные электромагнитные поля звукового диапазона. Основным природным источником энергии этих полей являются грозовые разряды молний и ионосферно-магнитосферные возмущения околоземной плазмы [1]. Частотный спектр сигналов аудиоманнителлурического (АМТ) диапазона крайне неравномерен из-за особенностей образования и распространения длинных и сверхдлинных волн. На низких частотах амплитуды сигналов максимальны, с ростом частоты спектральная плотность поля снижается, с минимумом на частотах от 2 до 6 кГц. Затем опять наблюдается увеличение интенсивности, с локальным максимумом на частоте около 10 кГц и последующим резким спадом в сторону высоких частот. Таким образом, отличия амплитуд сигналов на разных частотах может составлять несколько порядков, что создает ре-

альные трудности в измерениях и обработке АМТЗ. Для решения этой проблемы в ряде случаев дополнительно применяют метод исследований с контролируемым источником АМТ сигналов (Controlled Source Audio-frequency Magnetotelluric – CSAMT), работающий в диапазоне «природного минимума» [2, 3]. Измерения ведутся в дальней зоне, при значениях электромагнитного параметра $P = |k/r| > 10$, где k – волновое число, r – расстояние. Для выполнения условий больших значений параметра P источник должен обладать высокой мощностью, поскольку располагается на расстоянии первых километров от приемника. Обычно он представляет собой высоковольтный генератор, нагруженный на заземленную электрическую линию [4–6], реже используются генераторы тока с магнитными петлями [7, 8]. Контролируемые источники сигналов, работающие в дальней зоне, позволяют применять стандартные способы обработки магнитотеллурических данных без всяких изменений.

Еще одной из проблем магнитотеллурики является неконтролируемое смещение кривых зондирований за

счет статических искажений, вносимых приповерхностными неоднородностями. Кроме того, ограниченный частотный диапазон регистрируемых сигналов приводит к пробелу в получении данных о верхней части разреза (ВЧР). Глубина зондирования для метода АМТЗ определяется эффективной глубиной проникновения электрического поля $h_{эф}$ и зависит от частоты сигнала и величины удельного электрического сопротивления (УЭС) среды [9]:

$$h_{эф} \approx \frac{\delta}{\sqrt{2}} = \sqrt{\frac{\rho}{\omega\mu_0}},$$

где δ – толщина скин-слоя, м; ρ – удельное электрическое сопротивление однородной среды, Ом·м; ω – круговая частота электромагнитного поля; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м (магнитная проницаемость вакуума).

Для граничных частот аудио диапазона минимальная глубина зондирования хорошо проводящей среды составляет более 10 м, для высокоомных пород это значение еще больше. Чтобы получить сведения об электрических свойствах горных пород самой верхней части разреза, необходимо изучать радиочастоты длинноволнового и средневолнового диапазона. Для этого требуется отдельная специализированная аппаратура и датчики сигналов, ориентированные под другую модификацию магнитотеллурических методов – радиоманнителлурические зондирования (РМТЗ) [10]. Альтернативный выход из положения для изучения малых глубин заключается в применении дистанционных электромагнитных зондирований, работающих в ближней зоне. Такие наблюдения позволяют установить начальный уровень значений УЭС для магнитотеллурической кривой [11]. Цель данной работы заключается в опробовании методики исследований методом АМТЗ совместно с контролируемым источником в ближней зоне для получения сведений о ВЧР и внесении статических поправок. К основным задачам исследований относится сравнение результатов обработки и интерпретации классических аудиоманнителлурических зондирований и АМТЗ с дополнительным возбуждением искусственного поля.

Основные положения

Основным магнитотеллурическим параметром является импеданс среды Z , равный отношению взаимно перпендикулярных компонент напряженности электрического (E) и магнитного (H) полей. В классическом варианте магнитотеллурических зондирований для получения информации об электропроводности геологической среды проводят одновременные измерения пяти составляющих электромагнитного поля: E_x , E_y , H_x , H_y и H_z . Это дает возможность более точно оценить характер геоэлектрического разреза с учетом анизотропии. Аудиоманнителлурические зондирования можно проводить в упрощенном варианте, осуществляя последовательные измерения импеданса среды двухканальной аппаратурой:

$$Z_{xy} = E_x/H_y; Z_{yx} = E_y/H_x.$$

Получив значения взаимных импедансов, можно рассчитать кажущиеся сопротивления в ортогональ-

ных направлениях и общее эффективное сопротивление ρ_T по формулам [12]:

$$\rho_{xy} = |Z_{xy}|^2 / (2\pi \cdot f \cdot \mu_0); \rho_{yx} = |Z_{yx}|^2 / (2\pi \cdot f \cdot \mu_0); \rho_T = (\rho_{xy} \cdot \rho_{yx})^{0.5}.$$

Направленность измерений влияет на тип поляризации и, соответственно, на возможный характер искажения кривых зондирований. H -поляризации (TM -мода) соответствуют кривые кажущегося сопротивления при поперечном протекании первичного индуцированного тока, относительно основных элементов геологического строения. Измерения проводят установкой, в которой электрическая линия ориентирована поперек линейных структур (E_y), а магнитный датчик (H_x) – вдоль структур. Поперечные кривые ρ_{yx} сильно подвержены влиянию гальванических эффектов, проявляющихся в вертикальном смещении магнитотеллурических кривых, обусловленных изменением интегральной проводимости верхнего слоя. Над плохо проводящими приповерхностными образованиями кривые приподняты, над хорошо проводящими объектами опущены [13]. E -поляризация (TE -мода) наблюдается при ориентации электрической линии вдоль структур (E_x) с поперечным магнитным датчиком (H_y). Продольные кривые кажущегося сопротивления ρ_{xy} подвержены большему влиянию индукционных эффектов за счет протекания теллурических токов в линейных проводящих структурах [14].

Магнитотеллурические кривые являются частотными характеристиками геоэлектрического разреза и отражают изменение электрических свойств среды с глубиной. Высокие частоты характеризуют ВЧР, низкие частоты несут информацию о более глубинном строении разреза. Количественная интерпретация АМТЗ (получение геоэлектрического разреза) осуществляется с помощью решения обратной задачи, или инверсии. В зависимости от характера однородности разреза по основным направлениям используют одномерную (1D), двумерную (2D) или трехмерную (3D) инверсию [15–18]. Количественная интерпретация не отражает локальных особенностей выделенных структур, предоставляя интегральные характеристики разреза. А учитывая существование эквивалентных решений, даже наиболее вероятная инверсия может оказаться ошибочной. Качественная интерпретация магнитотеллурических данных осуществляется путем преобразования частотного псевдоразреза в глубинный разрез с помощью специальных трансформаций [19, 20]. В обоих случаях верхняя часть разреза представляется в виде эквивалентного слоя с условными характеристиками, вычисленными на основании плавной аппроксимации ограниченной частотной зависимости. Для более точной интерпретации параметры верхнего слоя можно задать на основании априорной информации о ВЧР. На этой основе ранее был разработан и опробован оригинальный способ трансформации частотных кривых [21]. Идея заключается в нахождении мощности скин-слоя, соответствующей заданному интервалу частот. Технология трансформации состоит в последовательном вычислении сверху вниз эффективной глубины зондирования для каждой рабочей частоты с учетом из-

менения кажущихся сопротивлений. При этом мощность и УЭС верхнего слоя задается на основании априорных данных, по результатам предыдущих геолого-геофизических работ. Основные этапы обработки аудиоманнитотеллурических данных включают:

- фильтрацию и отбраковку помех;
- получение спектров сигналов на основе преобразования Фурье;
- вычисление взаимных импедансов и кажущихся сопротивлений среды в ортогональных направлениях;
- расчет эффективного сопротивления и получение частотного псевдоразреза $\rho_r(f)$;
- трансформацию частотной зависимости $\rho_r(f)$ в глубинный разрез $\rho_r(h_{эф})$ с учетом информации о геоэлектрическом строении верхней части разреза.

Чтобы повысить корректность вычислений, необходимо иметь более точное представление о ВЧР, для этого можно воспользоваться результатами других методов электромагнитных зондирований. Наиболее распространенным методом изучения малых глубин являются вертикальные электрические зондирования (ВЭЗ). Однако они потребуют применения дополнительной аппаратуры и специализированного оборудования. С точки зрения оптимизации желательно проводить все измерения одной электрометрической станцией, а в качестве дополнительного источника использовать маломощный генератор звуковых частот с электрическим или магнитным возбуждением. Чтобы не изменять технологию наблюдений, наиболее подходящими будут относительные измерения электромагнитных компонент поля в ближней зоне источника. Этим условиям удовлетворяют дистанционные (геометрические) зондирования с вертикальными магнитными диполями (ВМД) и горизонтальными электрическими диполями (ГЭД). Измеряемым параметром может служить импеданс, либо отношение магнитных компонент.

Используя разные типы источников и приемников, можно получить многочисленные комбинации установок для дистанционного зондирования и электропрофилирования среды. Например, в существующем методе радиальных индукционных зондирований (РИЗ) проводятся измерения импеданса, а источником поля служат как магнитные петли, так и электрические диполи [22]. При этом приемная электрическая линия ориентируется перпендикулярно направлению на генератор (E_ϕ), а магнитный датчик устанавливается в позиции на источник сигнала (H_r). В зависимости от типа источника для вычисления кажущегося сопротивления (КС) применяются формулы [23]:

$$\rho_k = Z \cdot r / 2 \text{ — для ГЭД,}$$
$$\rho_k = Z \cdot r / 4 \text{ — для ВМД,}$$

здесь $Z = E_\phi / H_r$ — импеданс среды в ближней зоне; r — расстояние между центрами питающих и приемных диполей, или разнос установок. Для симметричной заземленной электрической установки: $r = AB/2$.

В методе дистанционных индукционных зондирований (ДИЗ) в качестве источника и приемника сигналов используются ВМД. Технология изучения магнитных составляющих заключается в регистрации

вертикальной (H_z) и радиальной (H_r) компонент переменного магнитного поля. В ближней зоне кажущееся сопротивление рассчитывается по упрощенной формуле [24]:

$$\rho_k = 2 \cdot f \cdot r^2 \cdot |H_z| / |H_r|$$

где r — разнос установки, выраженный в километрах, а частота f — в герцах.

Основной проблемой сопоставления дистанционных и частотных зондирований является то, что в первом случае рассматривается зависимость УЭС от величины разноса, а во втором — от частоты. Трансформация частотных кривых АМТЗ в геометрические кривые позволяет привести данные к общим единицам измерений. Для дистанционных зондирований эффективная глубина проникновения электрического поля определяется расстоянием между источником и приемником. Для совмещения разрезов кажущихся сопротивлений, полученных разными методами, по оси глубин следует откладывать эффективную глубину исследования $h_{эф}$, составляющую для ВЭЗ $AB/4$, для дипольных электрических установок — $r/2$, для ДИЗ — $r/4$. За счет использования при пересчете кривых АМТЗ информации о верхней части разреза, полученной при помощи одного из методов дистанционных зондирований, создается взаимная увязка величин УЭС обоих методов.

Методика исследования

Аудиоманнитотеллурические исследования проводились с помощью универсальной двухканальной приемно-регистрирующей аппаратуры ОМАР-2, позволяющей работать с широкополосными сигналами в реальном масштабе времени [25]. Стандартные наблюдения естественного АМТ поля велись в частотном диапазоне 60–16000 Гц. На каждой точке зондирования последовательно проводилась запись двух взаимно перпендикулярных составляющих электромагнитного поля E_x-H_y и E_y-H_x . Время записи каждой пары компонент составляла около 5 минут. Для измерения электрического поля использовались заземленные линии MN длиной 20 м, для регистрации магнитных составляющих — активные индукционные датчики АМД-50 с линейной амплитудно-частотной характеристикой в рабочем диапазоне частот и чувствительностью 50 В/(А/м) [26].

Для детального изучения верхней части разреза были опробованы два метода: ВЭЗ и ДИЗ. Работы методом ВЭЗ проводились комплектом аппаратуры ЭРА-МАКС (НПП «ЭРА», г. Санкт-Петербург) по стандартной методике [27]. Использовалась симметричная 4-электродная установка Шлюмберже ($AMNB$) с выносом питающих электродов $AB/2$ на расстояния от 1,5 до 150 м с логарифмическим шагом. Измерения проводились при стабилизированном токе в питающей линии от 10 до 50 мА. Кажущееся сопротивление рассчитывалось по стандартной формуле:

$$\rho_k = k \cdot U_{MN} / I_{AB},$$

где k — геометрический коэффициент установки (м); U_{MN} — напряжение между приемными электродами MN (мВ); I_{AB} — ток, подающийся в линию AB (мА).

Результаты количественной интерпретации ВЭЗ послужили, наряду с геологическими данными, основой для оценки достоверности построения трансформированных глубинных разрезов АМТЗ с коррекцией статических искажений.

Дистанционные индуктивные зондирования выполнены аппаратурой МЧЗ-8 (Институт геофизики УрО РАН, г. Екатеринбург) [28] на частоте 10 кГц по отработанной в нашей лаборатории методике работ. Электромагнитное поле генерировалось ВМД, измерялись две ортогональные составляющие переменного магнитного поля: H_z и H_r . Приемник располагался на точке зондирования, а генератор последовательно относился на расстояние (r) от 5 до 100 м вдоль профиля с шагом 5–10 м.

Эффективное удельное электрическое сопротивление в этом случае рассчитывается по уточненной формуле, учитывающей волновой параметр [29]:

$$\rho_{эф} = 2D \cdot f \cdot r^2 \cdot |H_z| / |H_r|,$$

где D – коэффициент нормировки. При выполнении условий ближней зоны волновой параметр поля меньше единицы, а коэффициент D примерно равен единице. Область средних параметров $1 < P < 10$ характеризует промежуточную зону, где D находится из

функциональных зависимостей от магнитных отношений в однородном полупространстве.

По результатам измерений строились совмещенные кривые АМТЗ и дистанционных зондирований на едином бланке. На основе сопоставления формы кривых проводилась корректировка статических искажений и стыковка кривых для получения единой зависимости кажущихся сопротивлений от эффективной глубины исследований, с учетом ВЧР. На основе пересчета полученных данных строился скорректированный глубинный разрез, который сравнивался с имеющейся геолого-геофизической информацией на предмет достоверности.

Результаты исследования

Способ преобразования частотного псевдоразреза в разрез эффективных глубин, с учетом априорной информации о ВЧР, хорошо зарекомендовал себя при исследованиях рудных объектов [30, 31]. Трансформированный глубинный разрез КС неплохо согласуется с результатами двухмерной (2D) инверсии АМТЗ, полученными с помощью программы ZondMT2d [32], в чем можно убедиться на представленном примере по одному из контрольных профилей Института геофизики УрО РАН (рис. 1).

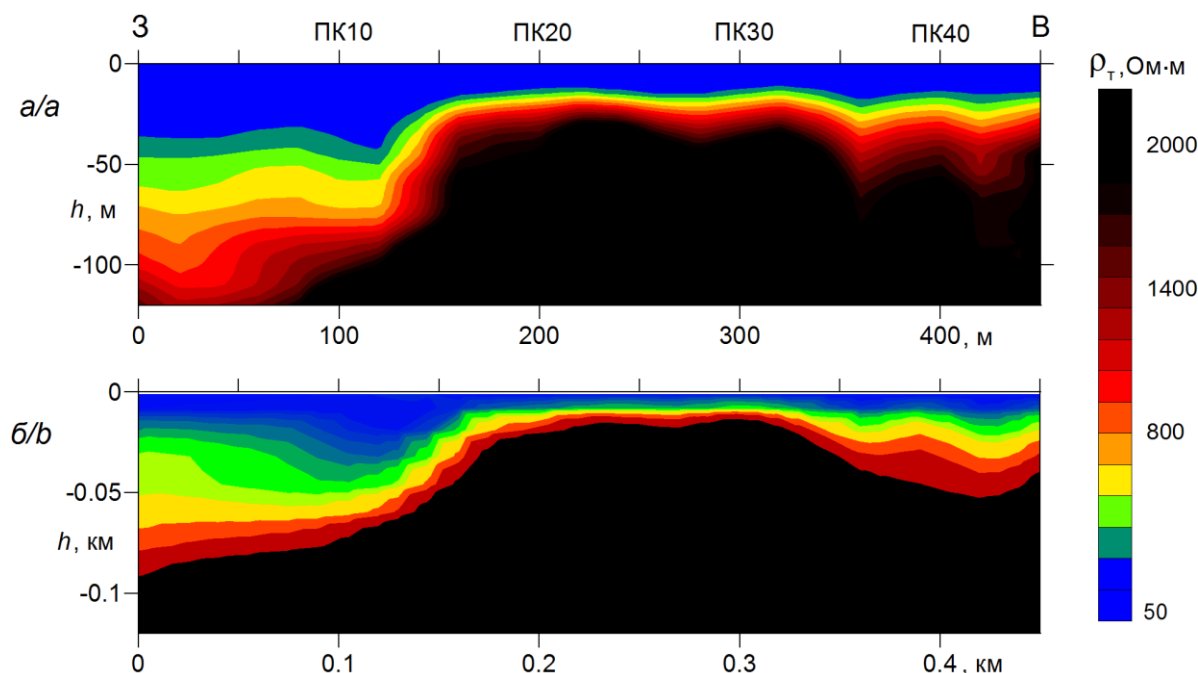


Рис. 1. Сравнение разрезов, полученных в результате трансформации (а) и двухмерной (2D) инверсии (б) аудиоманнителлурических зондирований на контрольном профиле

Fig. 1. Comparison of sections obtained as a result of transformation (a) and two-dimensional (2D) inversion (b) of audiomagnetotelluric soundings on the control profile

Указанный профиль расположен в зоне влияния регионального разлома, разделяющего геологические формации западного и восточного склона Урала, вкрест простираения основных структур. Вмещающими породами являются вулканогенно-осадочные образования с локальными зонами сульфидной минерализации. На сравнительных разрезах отмечается, что величина и характер поведения УЭС в обоих случаях

в основном совпадают, однако глубина залегания характерных структур зачастую отличается. Причиной может служить неправильное задание характеристик верхней части разреза, от которых зависят начальные условия пересчета кривых зондирований. Действительно, для одного участка работ обычно вводится одно среднее значение УЭС и глубины залегания первого слоя, но в реальности эти параметры могут

сильно изменяться в пределах профиля. Зная точную информацию о поверхностных отложениях в каждой точке зондирования, можно получить более точный геоэлектрический разрез. Опытные-методические АМТ измерения с дополнительными электромагнитными зондированиями показали правомерность сделанных выводов. На первом этапе было проведено сравнение результатов измерений ВЭЗ и АМТЗ в одних точках зондирования. Большинство полученных кривых неплохо стыкуются друг с другом в местах перекрытий, повторяя основные особенности и сохраняя близкие

величины кажущихся сопротивлений. Это свидетельствует о правильности выбора средних значений УЭС и мощности верхнего слоя для пересчета АМТЗ. При наличии сильных техногенных помех при аудиоманнителлурических измерениях увеличивает дисперсию и может привести к локальному смещению и пересечению кривых. При наличии геологической неоднородности или сильной анизотропии верхней части разреза может проявиться эффект «ворот» (рис. 2), подобный кривым ВЭЗ при переходе на другую длину приемной линии.

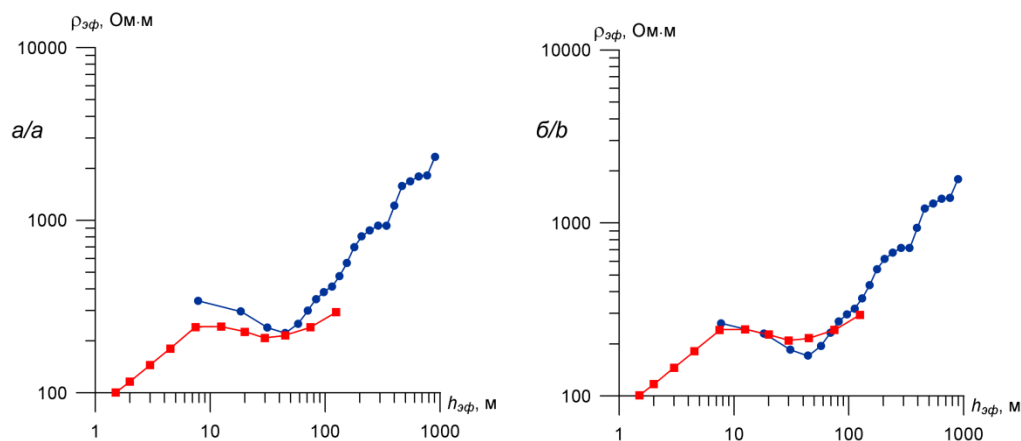


Рис. 2. Графики кривых вертикальных электрических зондирований (красным цветом) и трансформированных кривых аудиоманнителлурических зондирований (синим цветом): а) исходная аудиоманнителлурическая кривая немного приподнята относительно кривой вертикального электрического зондирования; б) корректировка аудиоманнителлурической кривой к уровню кривой вертикального электрического зондирования

Fig. 2. Graphs of curves of vertical electrical soundings (red color) and transformed curves of audiomagnetotelluric soundings (blue color): a) the original audiomagnetotelluric curve is slightly raised relative to the curve of vertical electrical sounding; b) correction of the audiomagnetotelluric curve to the level of the vertical electrical sounding curve

Смещения кривых легко устраняются соответствующим сдвигом, а для плавного перехода одной кривой в другую можно использовать сглаживающую интерполяцию. Главным условием коррекции будет сдвиг только кривой АМТЗ к неизменяемой кривой ВЭЗ,

принимаемой в качестве репера. Аналогичные измерения и сопоставления были выполнены для ДИЗ и АМТЗ, которые показали схожие результаты. Отличия заключаются в уменьшении области перекрытия и увеличении, в ряде случаев, ширины «ворот» (рис. 3).

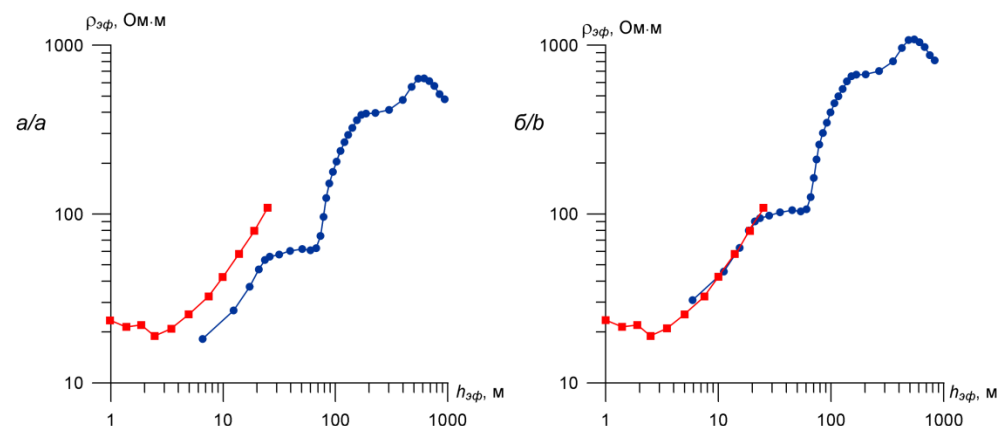


Рис. 3. Графики кривых дистанционных индукционных зондирований (красным цветом) и трансформированных кривых аудиоманнителлурических зондирований (синим цветом): а) исходная аудиоманнителлурическая кривая опущена относительно кривой дистанционного индукционного зондирования; б) корректировка аудиоманнителлурической кривой к уровню кривой дистанционного индукционного зондирования

Fig. 3. Graphs of curves of remote induction soundings (red color) and transformed curves of audiomagnetotelluric soundings (blue color): a) the original audiomagnetotelluric curve is omitted relative to the curve of remote induction sounding; b) correction of the audiomagnetotelluric curve to the level of the remote induction sensing curve

Возможно, что некоторые виды геологических неоднородностей вблизи поверхности могут оказывать влияние и на результаты индукционных зондирований. Вопрос, который требовал более детального рассмотрения, это насколько отличаются поправки в зависимости от типа контролируемого источника. Для этого были пересмотрены результаты ряда работ на геологических объектах Урала, в составе которых проводились электромагнитные зондирования: ВЭЗ, ДОЗ (дипольно-осевое зондирование), ДИЗ и РИЗ. После анализа ситуации выбраны несколько параметрических профилей, на которых были проведены аудиоманнителлурические зондирования. Кривые АМТЗ были преобразованы двумя способами с учетом информации о ВЧР, полученной с помощью гальванических и индукционных установок. Результаты пересчета свидетельствуют о практически взаимной идентичности большинства трансформированных кривых вне зависимости от типа генераторной установки (рис. 4).

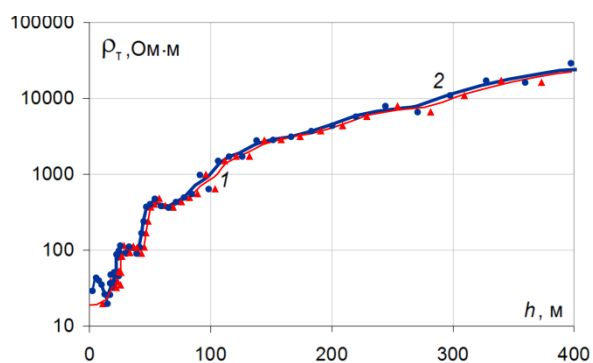


Рис. 4. Исправленные за верхнюю часть разреза графики трансформированных кривых аудиоманнителлурических зондирований с использованием контролируемых источников гальванического (1 – красным цветом) и индукционного (2 – синим цветом) типов

Fig. 4. Graphs of the transformed curves of audiomagnetotelluric soundings using controlled sources of galvanic (1 – red color) and induction (2 – blue color) types, corrected for the upper part of the section

При этом отмечается, что количество слоев ВЧР и значения их удельных сопротивлений могут отличаться по результатам интерпретации различными методами зондирований. Однако суммарная продольная проводимость интегрального слоя, за который вносится первичная поправка, сохраняет близкие значения, как при кондуктивном, так и при индуктивном возбуждении сигнала. Не учитываемые резкие изменения электропроводности в верхней части разреза могут сильно исказить результаты интерпретации на глубине. Например, при появлении сверху низкоомного слоя эффективная глубина зондирования снижается, а в случае высокоомных наносов глубинность исследований возрастает. Учет электрического сопротивления ВЧР в каждой точке зондирования позволяет внести правильную поправку и устранить искажение геоэлектрического разреза. Это напоминает внесение статических поправок за зону малых скоростей в сейсморазведочном методе общей глубинной точки (ОГТ). От корректности определения статических поправок в методе ОГТ напрямую зависит качество глубинного сейсмического разреза. В нашем случае качество трансформированного геоэлектрического разреза зависит от точности внесения поправки за счет дистанционных зондирований. Разница в определении глубины залегания опорного горизонта, с внесением поправки и без нее, может варьировать от единиц до десятков метров и более.

Полученный опыт позволяет предложить наиболее оптимальный вариант установки для измерений АМТЗ с одновременным изучением ВЧР. Установка содержит стандартную аппаратуру АМТЗ (в нашем случае – ОМАР-2), а в качестве контролируемого источника выступает генератор индукционной аппаратуры (например, ДЭМП или ФАГР), нагруженный на вертикальный магнитный диполь, возбуждающий первичное поле H_0 . Рабочая частота (f) выбирается в диапазоне от 2 до 16 кГц. Методика наблюдений аналогична дистанционным индуктивным зондированиям с измерением ортогональных составляющих переменного магнитного поля H_z и H_y . Приемник АМТЗ располагается на точке зондирования, а генератор последовательно относится на различные расстояния по линии профиля (рис. 5).

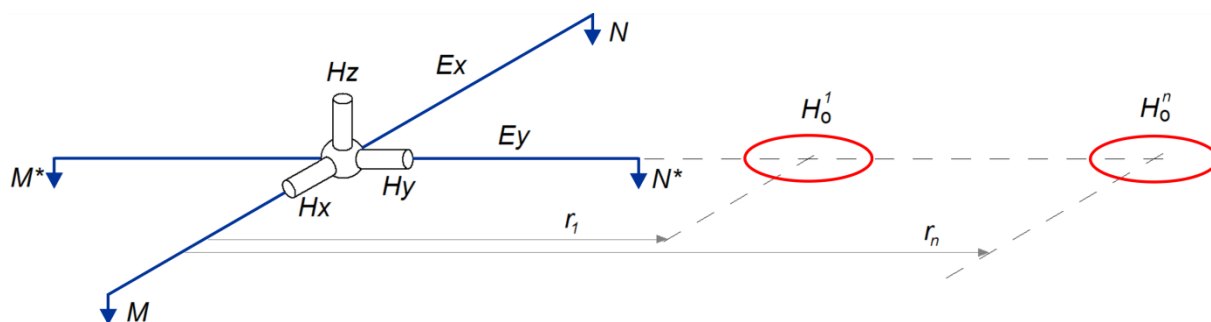


Рис. 5. Система наблюдений аудиоманнителлурических зондирований с дополнительным использованием контролируемого источника (вертикального магнитного диполя) в ближней зоне

Fig. 5. Observation system of audiomagnetotelluric soundings with additional use of a controlled source (vertical magnetic dipole) in the near zone

Время измерения при каждой новой установке генератора не превышает 30 секунд. Эффективная глубина зондирования равна одной четверти разноса диполей, а точка записи относится к месту установки приемника.

Для опробования работоспособности установки проведены специальные опытно-методические работы на Кунгурковском параметрическом профиле. Начало профиля слагают мраморированные известняки, затем следуют серпентинизированные ультрабазиты, а в конце профиля распространены разнообразные вулканогенные породы основного состава. Поро-

ды обладают разными свойствами, широтной зональностью изменения электропроводности и крутым падением грани. Мощность рыхлых отложений изменяется от нескольких метров до 50 м. Удельные электрические сопротивления в разрезе изменяются более чем на два порядка: от 12 Ом·м у глинистых слоев до 2000 Ом·м и выше в серпентинизированных ультраосновных породах. Трансформированные АМТ разрезы, с использованием генератора и без него, визуально очень похожи друг на друга, а также имеют близкие параметры изменения по глубине и удельному электрическому сопротивлению (рис. 6).

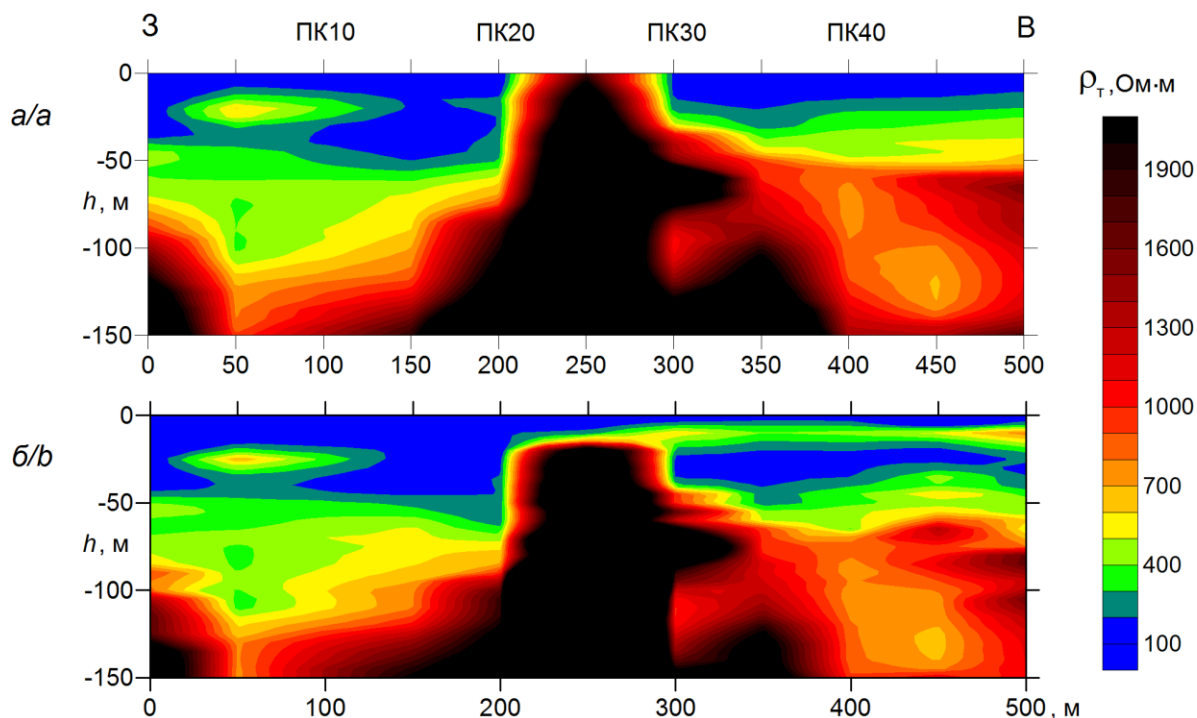


Рис. 6. Трансформированные разрезы аудиоманнителлурических зондирований на Кунгурковском профиле: а) по классической схеме, без внесения поправок; б) с использованием контролируемого источника типа вертикального магнитного диполя и внесением поправок за верхнюю часть разреза

Fig. 6. Transformed sections of audiomagnetotelluric soundings on the Kungurkov profile: а) according to the classical scheme, without making corrections; б) using a controlled source such as a vertical magnetic dipole and making corrections for the upper part of the section

В то же время разрез АМТЗ с внесенными статическими поправками имеет лучшую контрастность и большую достоверность при выделении локальных объектов. На участке распространения известняков, перекрытых мощным слоем низкоомных отложений (ПК0–ПК20), разрезы практически совпадают – скажется однородный характер свойств ВЧР. Все меняется с пикета ПК20: по результатам обработки классических АМТЗ, залегающие здесь серпентиниты выходят на поверхность, однако на самом деле они закрыты своей корой выветривания (ПК20–ПК30), хорошо видной на скорректированном разрезе (рис. 6, б). В интервале пикетов ПК30–ПК50 залегают вулканы, перекрытые «слоеным пирогом» рыхлых отложений разного состава. На стандартном разрезе АМТЗ эти осадочные наносы не расчленяются, а поверхность коренных пород выглядит довольно ровно. На разрезе АМТЗ с внесенными поправками можно уве-

ренно выделить три слоя коры выветривания вулканитов с разными значениями сопротивлений, а также рассмотреть более детально структуру коренных пород. Все особенности скорректированного геоэлектрического разреза АМТЗ подтверждаются геологическими данными и результатами других геофизических работ.

Заключение

Выполненные исследования показали, что использование контролируемого источника электромагнитного поля в ближней зоне улучшает информативность аудиоманнителлурических зондирований и позволяет получить более достоверную информацию о геологическом строении разреза за счет внесения статических поправок. Обработка результатов аудиоманнителлурических измерений осуществляется путем трансформации частотного псевдоразреза в глубин-

ный геоэлектрический разрез с учетом сведений о верхней части разреза, полученных с помощью дистанционных зондирований. В качестве дополнительного источника может выступать генератор электрического поля с гальваническим заземлением или излучатель переменного магнитного поля индукционного типа. Трансформированные разрезы с использо-

ванием различных типов источников имеют близкие параметры. С учетом более простых полевых наблюдений применение генератора индукционного типа является наиболее эффективным для внесения поправок за верхнюю часть разреза при интерпретации аудиоманнителлурических зондирований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Xavier G., Jones A. G. Atmospheric sources for audiomagnetotellurics (AMT) sounding // *Geophysics*. – 2002. – V. 67. – № 2. – P. 448–458.
2. Goldstein M.A., Strangway D.W. Audio-frequency magnetotellurics with a grounded electric dipole source // *Geophysics*. – 1975. – № 40. – P. 669–683.
3. Rydman O. Data processing of Controlled Source Audio Magnetotelluric (CSAMT) Data. – Uppsala: Uppsala University, 2019. – 36 p.
4. Zonge K.L., Ostrander A.O., Emer D.F. Controlled-source Audio-frequency Magnetotelluric Measurements // *Magnetotelluric Methods*. – Tulsa: Society of Exploration Geophysicists, 1985. – P. 749–763.
5. Shevtsov A.N. Joint interpretation of magnetotelluric and CSAMT data on the Kola Peninsula (Kovdor Area) // *Practical and Theoretical Aspects of Geological Interpretation of Gravitational, Magnetic and Electric Fields*. – Cham: Springer, 2019. – P. 23–30.
6. Zhang M., Farquharson C.G., Liu C. Improved controlled source audio-frequency magnetotelluric method apparent resistivity pseudo-sections based on the frequency and frequency-spatial gradients of electromagnetic fields // *Geophysical Prospecting*. – 2021. – V. 69. – № 2. – P. 474–490.
7. McPhee D.K., Chuchel B.A., Pellerin L. Audiomagnetotelluric data from Spring, Cave, and Coyote Spring Valleys, Nevada. – Washington: US Geological Survey, 2006. – 15 p.
8. Explorations of gold and lead-zinc deposits using a magnetotelluric method: case studies in the Tianshan-Xingmeng Orogenic Belt of Northern China / Q. Zeng, Q. Di, T. Liu, G. Li, C. Yu, P. Shen, H. Liu, J. Ye. // *Ore Geology Reviews*. – 2020. – V. 117. – P. 103283 (36 p).
9. Weidelt P. The inverse problem of geomagnetic induction // *Journal of Geophysics*. – 1972. – V. 38. – P. 257–289.
10. Сараев А.К., Симаков А.Е., Шлыков А.А. Метод радиоманнителлурических зондирований с контролируемым источником // *Геофизика*. – 2014. – № 1. – С. 18–25.
11. Геоэлектрический разрез литосферы Северного Урала / А.Г. Дьяконова, К.С. Иванов, П.Ф. Астафьев, В.С. Вишнев, А.Д. Коноплин // *Физика Земли*. – 2007. – № 4. – С. 15–20.
12. Бердичевский М.Н., Дмитриев В.И. Модели и методы магнитотеллурики. – М.: Научный мир, 2009. – 680 с.
13. Effects of galvanic distortions on magnetotelluric data: Interpretation and its correction using deep electrical data / J. Stephen, S.G. Gokarn, C. Manoj, S.B. Singh // *Journal of Earth System Science*. – 2003. – V. 112. – № 1. – P. 27–36.
14. Жамалетдинов А.А. Магнитотеллурический метод изучения строения массивов горных пород. – Апатиты: Петрозаводский государственный университет, 2014. – 103 с.
15. Oldenburg D.W. One-dimensional inversion of natural source magnetotelluric observations // *Geophysics*. – 1979. – V. 44. – № 7. – P. 1218–1244.
16. Rodi W., Mackie R. Non linear conjugate gradient algorithm for 2D magnetotelluric inversion // *Geophysics*. – 2001. – № 6 (1). – P. 174–187.
17. Ansari S.M., Craven J.A. A fully finite-element based algorithm for 3D magnetotelluric inversion. – Tulsa: Society of Exploration Geophysicists, 2020. – P. 555–559.
18. Ren Z., Kalscheuer T. Uncertainty and resolution analysis of 2D and 3D inversion models computed from geophysical electromagnetic data // *Surveys in Geophysics*. – 2020. – V. 41. – № 1. – P. 47–112.
19. Jones A.G. On the equivalence of the «Niblett» and «Bostick» transformations in the magnetotelluric method // *Journal of Geophysics*. – 1983. – V. 53. – № 1. – P. 72–73.
20. Schmucker U. Substitute conductors for electromagnetic response estimates // *Pure and applied geophysics*. – 1987. – V. 125. – № 2–3. – P. 341–367.
21. Давыдов В.А. Способ преобразования аудиоманнителлурических данных с учетом априорной информации // *Геофизические исследования*. – 2016. – Т. 17. – № 4. – С. 57–66.
22. Астраханцев Г.В. Индукционное зондирование при изучении контрастных по электропроводности сред. – Свердловск: УрО АН СССР, 1988. – 182 с.
23. Журавлева Р.Б., Самоделькина С.А. К решению обратной задачи дистанционных и частотных зондирований с гальваническим и индукционным возбуждением поля // *Теория и практика электромагнитных методов геофизических исследований: Сб. науч. трудов*. – Екатеринбург: Наука. Урал. отделение, 1992. – С. 6–18.
24. Вешев А.В., Любцева Е.Ф., Леончиков В.М. Временное руководство по методу электромагнитного зондирования с вертикальным магнитным диполем. – Л.: ЛГУ, 1978. – 55 с.
25. Давыдов В.А. Измерительная аппаратура ОМАР-2 для электромагнитных методов исследований // *Уральский геофизический вестник*. – 2015. – № 1 (25). – С. 37–41.
26. Давыдов В.А. Новые электромагнитные датчики для среднечастотной электроразведки // *Датчики и системы*. – 2017. – № 11. – С. 58–62.
27. Инструкция по электроразведке. – Л.: Недра, 1984. – 352 с.
28. Байдилов С.В., Человечков А.И. Аппаратура для высокочастотных индукционных зондирований МЧЗ-8 // *Уральский Геофизический Вестник*. – 2011. – № 1. – С. 4–8.
29. Давыдов В.А. Двухмерная инверсия дистанционных индукционных зондирований // *Вопросы естествознания*. – 2018. – № 1 (15). – С. 62–69.
30. Электрометрические исследования на Крылатовском руднике / В.А. Давыдов, Е.В. Арзамасцев, С.В. Байдилов, В.Ю. Горшков // *Известия вузов. Горный журнал*. – 2019. – № 3. – С. 64–71.
31. Давыдов В.А. Изучение техногенеза Дегтярского рудника с помощью аудиоманнителлурических экспресс-зондирований // *Записки Горного института*. – 2020. – Т. 243. – С. 379–387.
32. Каминский А.Е. Программа двумерной интерпретации данных магнитотеллурических зондирований (MT, AMT, PMT). ZondMT2d. Руководство пользователя. – СПб.: Zond geophysical software, 2020. – 123 с.

Поступила 23.06.2021 г.

Информация об авторах

Давыдов В.А., кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник лаборатории экологической геофизики Института геофизики им. Ю.П. Булашевича УрО РАН.

UDC 550.837.21: 550.8.052

TAKING INTO ACCOUNT THE INFLUENCE OF THE UPPER PART OF THE SECTION ON THE RESULTS OF AUDIOMAGNETOTELLURIC SOUNDINGS USING A CONTROLLED SOURCE IN THE NEAR ZONE

Vadim A. Davydov,
davyde@yandex.ru

Bulashevich Institute of Geophysics, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,
100, Amundsen street, Yekaterinburg, 620016, Russia.

Relevance. The work is aimed at bridging the gap in obtaining data on the upper part of the section during audiomagnetotelluric sounding. At the same time, the problem of uncontrolled displacement of sounding curves due to galvanic distortions introduced by near-surface irregularities is being solved.

The main aim of this work is to test the research methodology by the audiomagnetotelluric sounding method together with a controlled source in the near zone to obtain information about the near-field distribution and the introduction of static corrections.

Methods. Audiomagnetotelluric soundings were carried out using the receiving and recording equipment OMAR-2 (Institute of Geophysics UB RAS, Yekaterinburg) in the frequency range of 60–16000 Hz. The basic principles of audiomagnetotelluric processing are based on the previously developed method for converting the frequency curves of soundings into geometric curves, taking into account a priori information. For a detailed study of the upper part of the section, two methods were used: vertical electrical sounding and remote induction sounding. The work by the vertical electrical sounding method was carried out with a set of ERA-MAX equipment (ERA, St. Petersburg) according to the standard method. Remote induction soundings were performed with the MFS-8 equipment (Institute of Geophysics UB RAS, Yekaterinburg) at a frequency of 10 kHz according to the previously developed methodology.

Results. Experimental and methodological works, where an electric field generator with galvanic grounding and an induction-type alternating magnetic field emitter act as a controlled source, were carried out. Comparisons of the results of processing audio magnetotelluric soundings with a natural source of signals and with additional excitation of an artificial field are carried out. It was found that the transformed sections using controlled sources of various types have similar parameters, they are characterized by increased contrast and greater reliability in the selection of local objects. An optimal version of the setup for audiomagnetotelluric measurements with the additional use of an induction field source such as a vertical magnetic dipole is proposed.

Conclusions. The studies performed shown that the use of a controlled source of an electromagnetic field in the near zone improves the information content of audiomagnetotelluric soundings and allows obtaining more reliable information about the geological structure of the section due to the introduction of static corrections.

Key words:

Audiomagnetotelluric sounding, impedance, transformation, vertical magnetic dipole, remote sensing, geoelectric section.

REFERENCES

- Xavier G., Jones A. G. Atmospheric sources for audiomagnetotellurics (AMT) sounding. *Geophysics*, 2002, vol. 67, no. 2, pp. 448–458.
- Goldstein M.A., Strangway D.W. Audio-frequency magnetotellurics with a grounded electric dipole source. *Geophysics*, 1975, no. 40, pp. 669–683.
- Rydman O. *Data processing of Controlled Source Audio Magnetotelluric (CSAMT) Data*. Uppsala, Uppsala University, 2019. 36 p.
- Zonge K.L., Ostrander A.O., Emer D.F. Controlled-source Audio-frequency Magnetotelluric Measurements. *Magnetotelluric Methods*. Tulsa, Society of Exploration Geophysicists, 1985. pp. 749–763.
- Shevtsov A.N. Joint Interpretation of Magnetotelluric and CSAMT Data on the Kola Peninsula (Kovdor Area). *Practical and Theoretical Aspects of Geological Interpretation of Gravitational, Magnetic and Electric Fields*. Cham, Springer, 2019. pp. 23–30.
- Zhang M., Farquharson C.G., Liu C. Improved controlled source audio-frequency magnetotelluric method apparent resistivity pseudo-sections based on the frequency and frequency-spatial gradients of electromagnetic fields. *Geophysical Prospecting*, 2021, vol. 69, no. 2, pp. 474–490.
- McPhee D.K., Chuchel B.A., Pellerin L. *Audiomagnetotelluric data from Spring, Cave, and Coyote Spring Valleys, Nevada*. Washington, US Geological Survey, 2006. 15 p.
- Zeng Q., Di Q., Liu T., Li G., Yu C., Shen P., Liu H., Ye J. Explorations of gold and lead-zinc deposits using a magnetotelluric method: case studies in the Tianshan-Xingmeng Orogenic Belt of Northern China. *Ore Geology Reviews*, 2020, vol. 117, pp. 103283 (36 p).
- Weidelt P. The inverse problem of geomagnetic induction. *Journal of Geophysics*, 1972, vol. 38, pp. 257–289.
- Saraev A.K., Simakov A.E., Shlykov A.A. Method of radio-magnetotelluric sounding with a controlled source. *Geofizika*, 2014, no. 1, pp. 18–25. In Rus.
- Dyakonova A.G., Ivanov K.S., Astafiev P.F., Vishnev V.S., Konoplin A.D. Geoelectric section of the lithosphere of the Northern Urals. *Fizika Zemli*, 2007, no. 4, pp. 15–20. In Rus.
- Berdichevsky M.N., Dmitriev V.I. *Models and Methods of Magnetotellurics*. Berlin, Springer, 2009. 563 p.
- Stephen J., Gokarn S.G., Manoj C., Singh S.B. Effects of galvanic distortions on magnetotelluric data: Interpretation and its correction using deep electrical data. *Journal of Earth System Science*, 2003, vol. 112, no. 1, pp. 27–36.
- Zhamaletdinov A.A. *Magnitotelluricheskiy metod izucheniya stroyeniya massivov gornykh porod* [Magnetotelluric method for studying the structure of rock massifs]. Apatity, Petrozavodsk State University Publ., 2014. 103 p.
- Oldenburg D.W. One-dimensional inversion of natural source magnetotelluric observations. *Geophysics*, 1979, vol. 44, no. 7, pp. 1218–1244.
- Rodi W., Mackie R. Non linear conjugate gradient algorithm for 2D magnetotelluric inversion. *Geophysics*, 2001, no. 6 (1), pp. 174–187.
- Ansari S.M., Craven J.A. A fully finite-element based algorithm for 3D magnetotelluric inversion. Tulsa, Society of Exploration Geophysicists, 2020. pp. 555–559.
- Ren Z., Kalscheuer T. Uncertainty and resolution analysis of 2D and 3D inversion models computed from geophysical electromagnetic data. *Surveys in Geophysics*, 2020, vol. 41, no. 1, pp. 47–112.
- Jones A.G. On the equivalence of the «Niblett» and «Bostick» transformations in the magnetotelluric method. *Journal of Geophysics*, 1983, vol. 53, no. 1, pp. 72–73.
- Schmucker U. Substitute conductors for electromagnetic response estimates. *Pure and applied geophysics*, 1987, vol. 125, no. 2–3, pp. 341–367.

21. Davydov V.A. Method for converting audio magnetotelluric data with regard to a priori information. *Geofizicheskie issledovaniya*, 2016, vol. 17, no. 4, pp. 57–66. In Rus.
22. Astrakhantsev G.V. *Induktsionnoe zondirovanie pri izuchenii kontrastnykh po elektroprovodnosti sred* [Induction sounding in the study of media contrasting in electrical conductivity]. Sverdlovsk, UrO AN SSSR Publ., 1988. 182 p.
23. Zhuravleva R.B., Samodelkina S.A. K resheniyu obratnoy zadachi distantsionnykh i chastotnykh zondirovaniy s galvanicheskimi i induktsionnym vzbuzhdeniem polya [To the solution of the inverse problem of remote and frequency sounding with galvanic and induction field excitation]. *Teoriya i praktika elektromagnitnykh metodov geofizicheskikh issledovaniy. Sbornik nauchnykh trudov* [Theory and practice of electromagnetic methods of geophysical research: collection of articles. scientific. works]. Yekaterinburg, Nauka Publ., 1992. pp. 6–18.
24. Veshev A.V., Lyubtseva E.F., Leonchikov V.M. *Vremennoe rukovodstvo po metodu elektromagnitnogo zondirovaniya s vertikalnym magnitnym dipolem* [Interim guidance on the vertical magnetic dipole electromagnetic sounding method]. Leningrad, LGU Publ., 1978. 55 p.
25. Davydov V.A. Izmeritelnaya apparatura OMAR-2 dlya elektromagnitnykh metodov issledovaniy [OMAR-2 measuring equipment for electromagnetic research methods]. *Uralskiy geofizicheskiy vestnik*, 2015, no.1, pp. 37–41.
26. Davydov V.A. New electromagnetic sensors for medium-frequency electrical prospecting. *Datchiki i sistemy*, 2017, no. 11, pp. 58–62. In Rus.
27. *Instruktsiya po elektrorazvedke* [Electrical Survey Instructions]. Leningrad, Nedra Publ., 1984. 352 p.
28. Baydikov S.V., Chelovechkov A.I. Apparatura dlya vysokochastotnykh induktsionnykh zondirovaniy MCHZ-8 [Equipment for high-frequency induction sounding MFS-8]. *Uralskiy Geofizicheskiy Vestnik*, 2011, no. 1, pp. 4–8.
29. Davydov V.A. Dvukhmernaya inversiya distantsionnykh induktsionnykh zondirovaniy [Two-dimensional inversion of remote induction soundings]. *Voprosy yestestvoznaniya*, 2018, no. 1 (15), pp. 62–69.
30. Davydov V.A., Arzamastsev E.V., Baydikov S.V., Gorshkov V.Yu. Electrometric research at the Krylatovsky mine. *Izvestiya vuzov. Gornyy zhurnal*, 2019, no. 3, pp. 64–71. In Rus.
31. Davydov V.A. Study of the technogenesis of the Degtyarsky mine by audiomagnetotelluric express sounding. *Journal of Mining Institute*, 2020, vol. 243, pp. 379–387.
32. Kaminskiy A.E. *Programma dvumernoy interpretatsii dannykh magnetotelluricheskikh zondirovaniy (MT, AMT, RMT). ZondMT2d. Rukovodstvo polzovatelya* [Program for two-dimensional interpretation of magnetotelluric sounding data (MT, AMT, PMT). ZondMT2d. User manual]. St. Petersburg, Zond geophysical software, 2020. 123 p.

Received: 23 June 2021.

Information about the authors

Vadim A. Davydov, Cand. Sc., senior researcher, Bulashevich Institute of Geophysics, Ural Branch of the RAS.