

Геoeлектрическое строение зоны Дегтярского разлома на Среднем Урале по данным аудиоманнитотеллурических зондирований

В. А. Давыдов, 2020

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

Поступила 28 января 2020 г.

В настоящее время продолжается сокращение запасов и прогнозных ресурсов рудных полезных ископаемых за счет отработки ранее открытых месторождений. Воспроизводство запасов возможно за счет доразведки флангов и глубоких горизонтов известных рудных объектов. Для изучения геoeлектрического строения уральских рудоносных структур проведены аудиоманнитотеллурические зондирования по субширотным профилям, пересекающим зону Дегтярского разлома вблизи крупнейшего на Среднем Урале колчеданного месторождения. Полевые наблюдения выполнены с помощью универсальной широкополосной аппаратуры ОМАР-2, разработанной в Институте геофизики УрО РАН для электрометрических исследований урбанизированных территорий. Применяемый программно-аппаратный измерительный комплекс рассчитан на эффективное подавление промышленных помех с дополнительными способами цифровой фильтрации сетевых гармоник. Камеральная обработка аудиоманнитотеллурических данных заключалась в трансформации полученных частотных кривых зондирований в глубинные разрезы геoeлектрических параметров с помощью оригинального алгоритма преобразования. По материалам работ выделены литологические и тектонические границы сложного комплекса пород, примыкающих к Дегтярскому региональному разлому. Электроразведочными методами уверенно прослеживается поверхность фундамента коренных пород, а также трассируются ослабленные зоны. Проведенные исследования показали хорошую корреляцию геoeлектрических разрезов с реальной геологической обстановкой. Отмечается хорошая идентификация приразломных и рудоконтролирующих структур, что позволяет на их фоне выявить перспективные на оруденение участки, не выходящие на дневную поверхность. По результатам проведенных исследований выделены места возможного сосредоточения медной и никель-кобальтовой минерализации.

Ключевые слова: аудиоманнитотеллурические зондирования, рудные месторождения, разлом, геoeлектрический разрез, рудная минерализация.

Введение. В настоящее время продолжается сокращение запасов и прогнозных ресурсов полезных ископаемых цветных металлов за счет отработки старых рудников. Значительное число горнодобывающих комбинатов полностью прекратили свое существование, что вынуждает местные металлургические предприятия использовать завозное сырье. Нахождение новых месторождений в местах традиционной добычи, с развитой инфраструкту-

рой и квалифицированным рабочим персоналом, имеет высокую значимость для экономического развития регионов. Учитывая, что большинство неглубокозалегających месторождений уже найдено, необходимо сделать упор на выявление условий залегания «слепых» рудных объектов, не выходящих на поверхность. При этом к основным технологиям разведки следует отнести геофизические методы исследований. Подробное изучение известных

месторождений позволит выделить основные рудоконтролирующие структуры для определения перспективных участков. В качестве объекта исследований было выбрано Дегтярское рудное поле, расположенное в зоне влияния одноименного регионального разлома.

Дегтярский разлом входит в систему Серовско-Маукской сутуры и представляет собой долгоживущую субмеридиональную структуру с неоднократным подновлением по различным дислокациям. Основная дислокация имеет характер взбросо-сдвига с зонами кливажа, осложненными более поздними сбросами, надвигом и сдвигами. Как и все региональные структуры, Дегтярский разлом прослеживается по тектоническим линзам и будинам серпентинитов, часто сопровождаясь зонами серпентинитового меланжа, что хорошо видно в разрезах Дегтярского месторождения. Изучаемая область относится к Дегтярско-Полевскому рудному району и захватывает сложный комплекс пород приконтактной зоны регионального разлома, разделяющего Тагильский прогиб и Восточно-Уральское поднятие. К зоне меланжа тяготеет никель-кобальтовое оруденение, связанное с серпентинитами, контактирующими с мраморизованными известняками терригенно-карбонатной толщи. В вулканогенных породах, прилегающих к разлому, залегает ряд месторождений и рудопроявлений медноколчеданного типа. Считается, что перспективность района остается высокой, а доразведка флангов и глубоких горизонтов известных рудных объектов может привести к обнаружению на Урале новых месторождений [Жданов, Пыжьянов, 2011; Прокин и др., 2011].

Целью исследований является построение геоэлектрических разрезов по ряду профилей Дегтярского поля, секущих область разлома, с уточнением рудоконтролирующих структур, для выявления перспективных на оруденение зон, не выходящих на земную поверхность. К основным задачам относятся: проведение аудиоманнитотеллурических зондирований, обработка и интерпретация результатов с построением разрезов геоэлектрических параметров, анализ и сопоставление полученных данных с

имеющейся геологической информацией.

Методика исследований. Для изучения геоэлектрического строения разреза были использованы аудиоманнитотеллурические зондирования (АМТЗ), хорошо зарекомендовавшие себя при исследованиях средних глубин в горнорудных районах [Lap et al., 2014; Lahti, 2015; Singh, 2018; Lahti et al., 2019]. Обычно геофизические работы проводятся при поиске и разведке месторождений полезных ископаемых на малоосвоенных площадях. В промышленных районах электромагнитные методы исследований не всегда эффективны из-за сильных индустриальных помех. В этом случае необходимо использовать специальную помехозащищенную аппаратуру и дополнительные способы цифровой фильтрации сетевых гармоник. Для электрометрических исследований урбанизированных территорий в Институте геофизики УрО РАН была разработана универсальная широкополосная аппаратура серии ОМАР-2 [Давыдов, 2015]. В комплекте с активными датчиками электромагнитного поля и цифровым регистратором сигналов она представляет собой 2-канальную аудиоманнитотеллурическую станцию. Амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) датчиков и корректирующих фильтров аппаратуры настроены на эффективное подавление электромагнитных помех, в том числе частотой 50 Гц. Станция обеспечивает усиление, аналого-цифровое преобразование и запись геофизических сигналов в реальном масштабе времени. Аудиоманнитотеллурические зондирования на Дегтярской площади проводились в частотном диапазоне 60—16000 Гц, по методике мобильной экспресс-съемки горизонтальных компонент естественного электромагнитного поля E_y и H_x . Ранее проведенными работами было показано, что для оперативного зондирования малых и средних глубин вполне достаточно получения импеданса среды в одном направлении [Давыдов, 2014]. При этом ось x направлена вдоль простирания основных геологических структур, а ось y соответствует направлению профиля. Поскольку

уральские структуры имеют преимущественно меридиональное простирание, то ось x направлена на север, а ось y — на восток. Магнитная компонента H_x измерялась с помощью активного индукционного датчика АМД-50 с линеаризованной АЧХ и изменяемой чувствительностью. Ортогональная электрическая составляющая E_y снималась со стелющейся емкостной линии с предварительным усилителем, раскладываемой вдоль профиля [Давыдов, 2017]. Запись на точке осуществлялась в течении 3 мин, шаг наблюдений по профилю составлял 25—50 м. Отношение амплитуды электрической компоненты сигнала к ортогональной магнитной составляющей определяет входной импеданс среды $Z = E_y/H_x$, пропорциональный удельному электрическому сопротивлению (УЭС) горных пород [Berdichevsky, Dmitriev, 2009]. Результаты измерений представляются в виде параметра, вычисленного через модуль импеданса и эквивалентного кажущемуся сопротивлению [Cagniard, 1953]:

$$\rho_T = (1/2\pi f \mu) |Z|^2,$$

где f — частота электромагнитного поля, Гц; $\mu \approx 4\pi \cdot 10^{-7}$ — магнитная проницаемость среды, Гн/м.

Фаза импеданса не учитывалась, поскольку для получения приемлемой погрешности требовалось большее время наблюдений на точке, что значительно сокращало скорость мобильной съемки. Камеральная обработка аудиоманнитотеллурических данных включала следующие операции:

- цифровую гребенчатую фильтрацию промышленных помех;
- получение частотных спектров на основе быстрого преобразования Фурье;
- восстановление истинных амплитуд сигналов с учетом АЧХ измерительных каналов и датчиков сигналов;
- определение частотной зависимости поперечного импеданса среды $Z(f)$;
- расчет частотных кривых кажущегося сопротивления (кривых АМТЗ) $\rho_T(f)$;
- трансформацию частотных кривых

АМТЗ в глубинный разрез сопротивлений $\rho_T(h)$ с помощью оригинального алгоритма преобразования [Давыдов, 2016];

– пересчет и построение разреза эффективной продольной проводимости $S_{эф}$.

Примеры частотных и трансформированных кривых АМТЗ представлены на рис. 1.

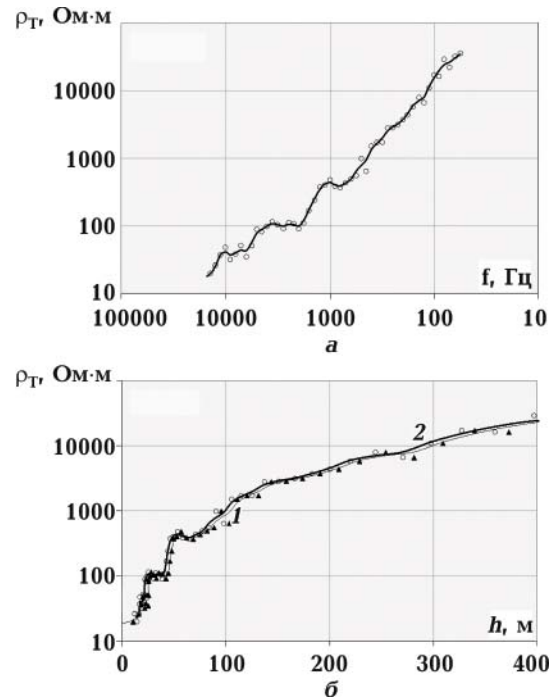


Рис. 1. Типовая кривая АМТЗ (а) и результаты ее преобразования (б) при разных способах учета информации о верхней части разреза: по данным ВЭС (1) и индукционных зондирований (2).

Fig. 1. Typical AMT curve (a) and the results of its transformation (b) for different methods of accounting for information about the upper part of the section: according to VES (1) and induction sounding (2).

Данные построения позволяют определить характер распределения геоэлектрических свойств по глубине, выделить локальные аномальные объекты и связать природу геофизических полей с геологическим строением и вещественным составом пород и руд. Это предоставляет необходимую информацию для построения геолого-геофизических моделей с возможностью прогнозирования условий залегания месторождений полезных ископаемых, не выходящих на поверхность.

Результаты и обсуждение. Аудиомагнитотеллурические зондирования проводились по трем субширотным профилям, пересекающим зону Дегтярского разлома вкрест простирания основных геологических структур (рис. 2).

Ревдинский профиль длиной 2600 м пролегает по северной оконечности Дегтярского рудного поля. Центральный профиль протяженностью 1100 м находится в 13 км южнее, на территории Дегтярского медно-колчеданного месторождения. Еще в 9 км к югу проходит Крылатовский профиль (2050 м), располагающийся недалеко от Крылатовско-Чесноковского золотокварцевого месторождения, представляющего собой серию минерализованных

кварцевых жил, залегающих в кварцсерицитовых метасоматитах [Сазонов и др., 1999].

Во всех методах частотных электромагнитных зондирований, в том числе магнитотеллурических, глубина исследований зависит от УЭС среды. Используемый в экспресс варианте АМТЗ частотный диапазон позволяет изучать геоэлектрическое строение низкоомных разрезов (20—100 Ом·м) на глубину 200—500 м, а высокоомных (более 500 Ом·м) — до 1 км и глубже. На Среднем Урале коренные породы сверху перекрываются элювиальными и делювиальными отложениями с развитым почвенно-растительным слоем мощностью до 10 м. Удельные электрические

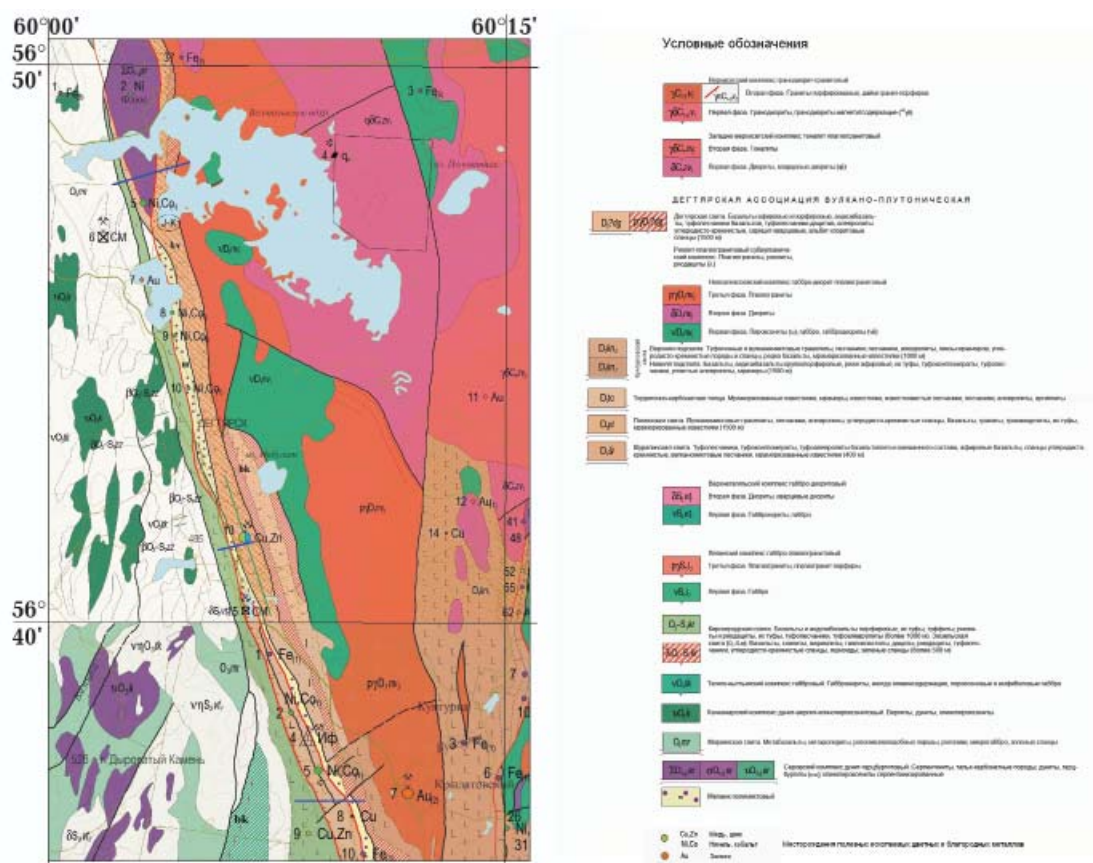


Рис. 2. Фрагмент карты месторождений полезных ископаемых (на основе Геологической карты донеогеновых образований издания 2017 г., листы О-41-XXV и О-41-XXXI) с нанесенными профилями АМТЗ (выделены синим цветом).

Fig. 2. Fragment of a map of mineral deposits (based on the Geological map of pre-Neogene formations, 2017 edition, sheets O-41-XXV and O-41-XXXI) with printed AMT profiles (highlighted in blue).

сопротивления рыхлых осадков обычно имеют низкие значения из-за высокой глинистости (12—60 Ом·м). Четвертичные отложения сменяются мезозойской корой выветривания палеозойских пород, прослеживающейся до глубины 20—30 м. Кора выветривания представлена суглинками, песками, песчаниками, дресвяно-щебенистыми отложениями, опоками, конгломератами и другими породами. Она отличается сильной неоднородностью электрометрических параметров (УЭС от 50 до 700 Ом·м), зависящей от гранулометрического состава и влажности. В основании разреза залегают преимущественно вулканогенные и вулканогенно-осадочные породы зеленокаменной полосы. По данным лабораторных анализов и электрокаротажа скважин, значения УЭС вулка-

ногенных пород колеблются в пределах от 1000 до 10000 Ом·м, кристаллические сланцы выделяются пониженными сопротивлениями от 300 до 2000 Ом·м. Еще более низкими сопротивлениями (50—300 Ом·м) характеризуются зоны метаморфических сланцев, обогащенных сульфидами. Из других пород на площади распространены мраморизованные известняки (300—1000 Ом·м), серпентинизированные ультрабазиты (1200—3500 Ом·м) и гранитоиды (2500—6000 Ом·м). В трещиноватых и обводненных зонах значения УЭС снижаются до 150—200 Ом·м. Сопротивление рудных зон составляет от 10 до 100 Ом·м, сплошных колчеданов — менее 1 Ом·м.

Для удобства общего рассмотрения представляемые разрезы АМТЗ ограничены гипсометрическим уровнем моря

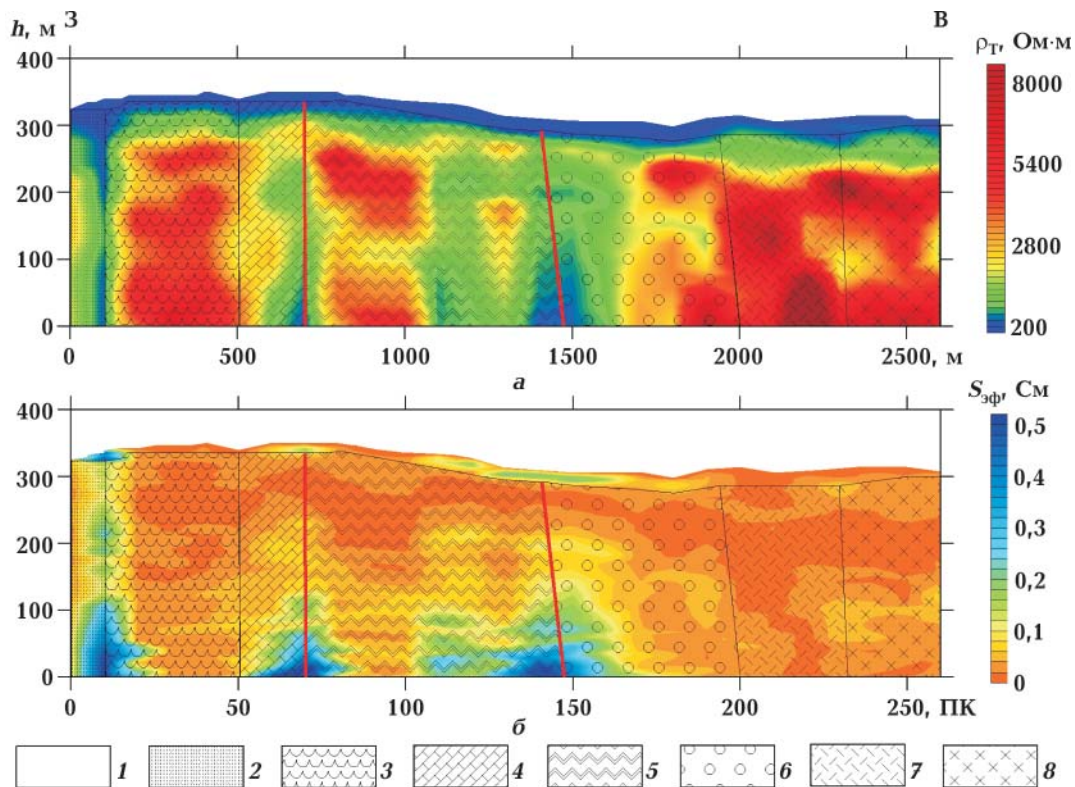


Рис. 3. Глубинные разрезы геоэлектрических параметров по Ревдинскому профилю: *a* — кажущееся сопротивление; *б* — эффективная продольная проводимость; 1 — кора выветривания; 2 — metabasalts; 3 — basalts; 4 — marbled limestones; 5 — serpentinitis; 6 — tuff sandstones; 7 — rhyolites; 8 — plagiogranites. Красными линиями выделены основные тектонические нарушения.

Fig. 3. Depth sections of geoelectric parameters along the Revdinsky profile: *a* — apparent resistivity; *б* — effective longitudinal conductivity; 1 — weathering crust; 2 — metabasalts; 3 — basalts; 4 — marbled limestones; 5 — serpentinitis; 6 — tuff sandstones; 7 — rhyolites; 8 — plagiogranites. The red lines highlight the main tectonic disturbances.

(абсолютная нулевая отметка). Для сопоставления использованы результаты государственного геологического картирования масштаба 1:200000 [Калугина и др., 2017а,б], фондовые материалы по поисково-разведочным работам на данной территории и другие источники [Иванов, Меркулов, 1937; Соколов и др., 1984; Смывина и др., 2000].

Ревдинский профиль. Начало профиля слагают metabазальты Мариинской свиты (O_3mr), за которыми следуют вулканы риолит-базальтовой серии Зюзельской свиты (O_3-S_1zz). Тектонический контакт двух свит на пикете ПК10 четко выделяется вертикальной аномалией на разрезах геоэлектрических параметров (рис. 3).

Контакт базальтоидов Зюзельской свиты с мраморизованными известняками терригенно-карбонатной толщи (D_1tc) отображается депрессией в рельефе местности на пятидесятом пикете. На Ревдинском участке главная ось Дегтярского разлома разделена на две ветви серпентинизированными ультраосновными породами Серовского комплекса (ΣO_{1-2sr}), слагающими небольшой массив. Западный контакт серпентинитов с известняками перспективен на силикатно-никелевое оруденение, локализующееся в карстовых полостях верхней части карбонатной толщи. Так, в 700 м к югу от профиля находится Петровское никель-кобальтовое месторождение подобного генезиса, еще дальше обнаружен

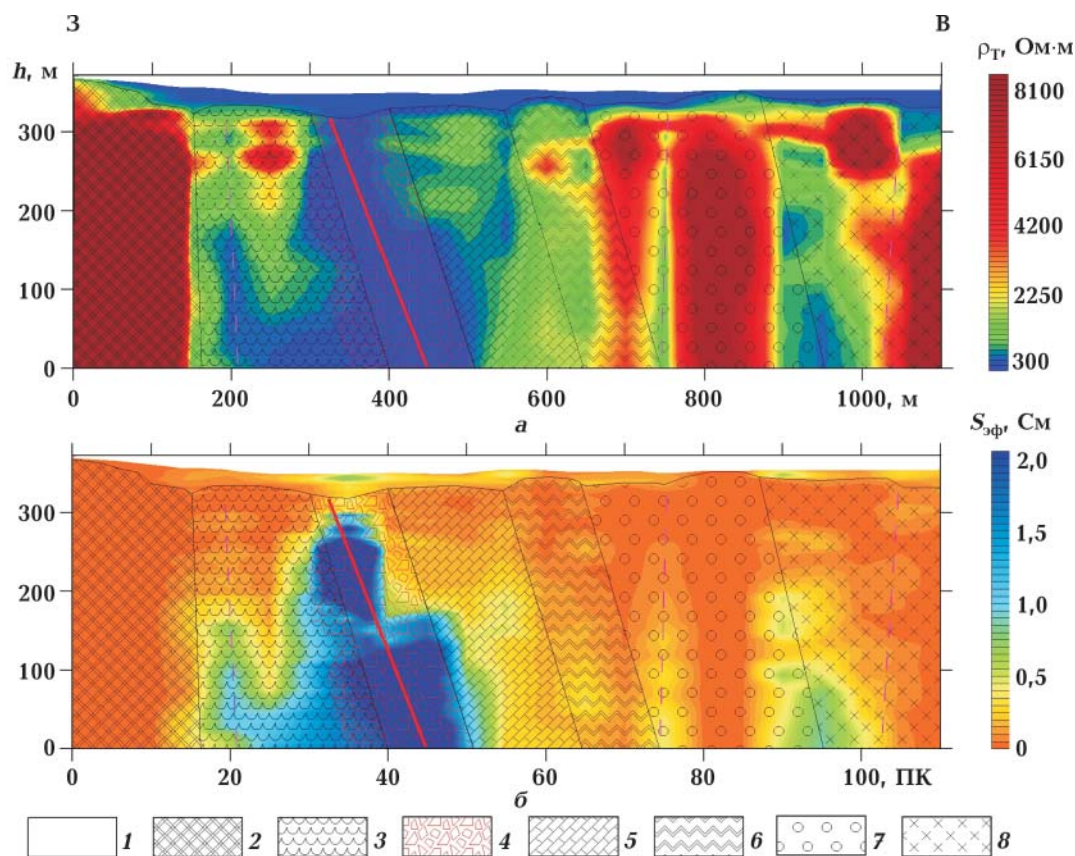


Рис. 4. Глубинные разрезы геоэлектрических параметров по Центральному профилю: *a* — кажущееся сопротивление; *б* — эффективная продольная проводимость; 1 — кора выветривания; 2 — габбродолериты; 3 — базальты; 4 — зона дробления; 5 — мраморизованные известняки; 6 — серпентиниты; 7 — туфопесчаники и сланцы; 8 — риодациты и плагиограниты. Красной линией выделена ось Дегтярского разлома.

Fig. 4. Deep sections of geoelectric parameters along the Central profile: *a* — apparent resistivity; *б* — effective longitudinal conductivity; 1 — weathering crust; 2 — gabbrodolerites; 3 — basalts; 4 — crushing zone; 5 — marbled limestones; 6 — serpentinities; 7 — sandstone and shale; 8 — rhyodacites and plagiogranites. The red line marks the axis of the Degtyarsky fault.

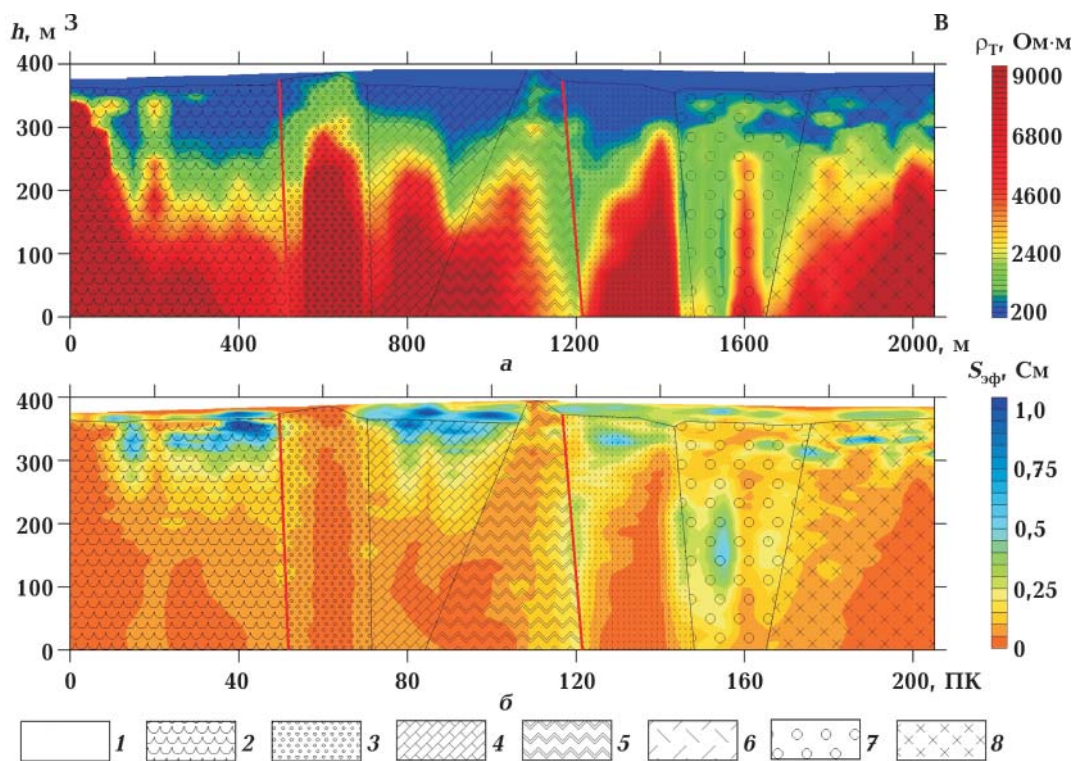


Рис. 5. Глубинные разрезы геоэлектрических параметров по Крылатовскому профилю: *a* — кажущееся сопротивление; *б* — эффективная продольная проводимость; 1 — рыхлые отложения; 2 — вулканогенные породы; 3 — вулканомиктовые песчаники; 4 — мраморизованные известняки; 5 — серпентиниты; 6 — риолиты; 7 — базальты; 8 — плагиограниты. Красными линиями выделены основные тектонические нарушения.

Fig. 5. Depth sections of geoelectric parameters along the Krylatov profile: *a* — apparent resistivity; *б* — effective longitudinal conductivity; 1 — loose deposits; 2 — volcanic rocks; 3 — volcanomict sandstones; 4 — marbled limestones; 5 — serpentinitis; 6 — rhyolites; 7 — basalts; 8 — plagiogranites. The red lines highlight the main tectonic disturbances.

целый ряд рудопоявлений. В пределах ультраосновного массива встречается минерализация сульфидно-никелевой формации, в 3 км севернее профиля известно Гребневское рудопоявление никеля. Серпентинизированные породы массива характеризуются повышенным уровнем магнитного поля ($\Delta T_a = +2000 \dots 4000$ нТл), а их тектонические границы, являющиеся ветвями разлома, хорошо выделяются на геоэлектрических разрезах низкоомными линейными аномалиями (ПК70 и ПК150). Восточная ветвь разлома отделяет ультрабазиты от рудоносной Дегтярской свиты ($D_2^?dg$), сложенной преимущественно туфопесчаниками и туфоалевролитами кислого и основного составов (ПК150—200). Свита прослеживаются в виде непрерывной узкой субмеридиональ-

ной полосы шириной до 2 км через весь Дегтярско-Полевской рудный район (см. рис. 2.). Вулканогенно-осадочные образования свиты вмещают субвулканические тела риолитов ($\lambda D_2^?dg$), располагающиеся на Ревдинском профиле в интервале ПК200—230. Завершающий участок профиля (ПК230—260) слагают плагиограниты Новоалексеевского массива ($\rho \gamma D_1 \nu_3$). Гранитоиды Дегтярского субвулканического комплекса близки по составу плагиогранитам Новоалексеевского комплекса и не отличаются в физических полях, поэтому район контакта выделяется с трудом по небольшому увеличению мощности рыхлых отложений.

Значительных аномалий электропроводности, не связанных с тектоникой, на Ревдинском профиле не наблюдается. Есть не-

большая зона пониженных сопротивлений в пределах рудоносной Дегтярской свиты (ПК170—190) на глубине 120—180 м от поверхности. Она может быть связана как со слабой сульфидной минерализацией, так и с локальной зоной трещиноватости.

Центральный профиль проходит по южной части Дегтярского месторождения рядом с ликвидированной шахтой «Комсомольская». Месторождение представлено одной колчеданной залежью, залегающей согласно с вмещающими вулканогенными и вулканогенно-осадочными породами висячем боку Дегтярского разлома [Прокин и др., 1988]. Профиль начинается на возвышенности, сложенной габбро-диоритами (ПК0—15) с самыми высокими значениями УЭС (4000—10000 Ом·м). Далее следуют комагматичные рассланцованные базальты (ПК15—30), сопротивление которых изменяется в зависимости от трещиноватости от 500 до 3000 Ом·м. Зона дробления Дегтярского разлома (ПК30—40) выделяется самыми низкими значениями УЭС (50—200 Ом·м), довольно четко определяя падение разлома на восток под углом около 70° (рис. 4).

Известняково-серпентинитовый меланжевый горизонт разделяет сильно дислоцированные образования Дегтярской свиты на востоке от образований Зюзельской свиты на западе. Удельные сопротивления зоны меланжа (ПК40—64) варьируют в пределах 300—2000 Ом·м, при этом выделяемые с помощью магниторазведки серпентиниты (ПК52—64) имеют повышенные значения УЭС (1000—2000 Ом·м). Контактующими породами Дегтярской свиты являются туфопесчаники (ПК65—75), которые затем сменяются метаморфическими сланцами (ПК75—87) и субвулканитами кислого состава (ПК87—110). Значения УЭС горных пород свиты достаточно выдержанные и составляют 3000—8000 Ом·м. Выход рудного тела на поверхность приурочен к заболоченной низине и располагался в интервале пикетов ПК65—70. В настоящее время болото почти полностью засыпано отходами известкового производства. На

геоэлектрическом разрезе рудная зона не выделяется по причине полной отработки месторождения с обрушением или закладкой подземных выработок. Однако на пикете ПК75 отмечается вертикальная низкоомная аномалия, прослеживаемая на всю глубину зондирования. Она связана с вертикальным дизъюнктивным нарушением, которое можно считать реперным. По данным рудничной документации это взбросовая дислокация, секущая рудное тело со смещением до 10—15 м и характерная для центральной и южной части месторождения. Породы Дегтярской свиты метаморфизованы в зеленосланцевой фации, локально развиты зоны гидротермально-метасоматических изменений с развитием полевошпат-кварц-серицитовых, серицит-хлорит-кварцевых гидротермалитов. Метасоматиты обладают повышенной трещиноватостью и обводненностью, поэтому характеризуются низкими значениями УЭС. Аномально проводящая зона в районе ПК88—90, по-видимому, связана именно с метасоматической проработкой пород в зоне контакта сланцев и риодацитов. В пользу этого свидетельствует нахождение высыпок жильного кварца на поверхности в интервале ПК100—105. В районе ПК105 происходит ступенчатая смена характера геоэлектрического разреза, которая по данным геологии характеризует локальный тектонический контакт между породами субвулканического комплекса Дегтярской свиты — риодацитами и плагиогранитами.

Территория Дегтярского месторождения подробно исследована сетью разведочных скважин, не выявивших дополнительных рудных тел. На полученных разрезах АМТЗ также нет никаких аномалий, которые могли бы принадлежать рудным объектам.

Крылатовский профиль располагается к западу от Крылатовского золото-кварцевого месторождения, в полосе развития оруденения колчеданного типа, связанного с вулканогенными породами района. Дегтярское колчеданное месторождение находится в 10 км севернее, а группа По-

левских медных месторождений — в пределах 15 км к югу. Поблизости от профиля известны проявления сульфидной минерализации. По данным геологического картирования в начале профиля (ПК0—50) в основании разреза залегают вулканогенные породы рудоносной Зюзельской свиты (O_3-S_{1zz}), с которой связано ближайшее Кунгурковское медно-цинковое рудопроявление. Базальтоиды отделены первой зоной Дегтярского разлома от вулканогенно-осадочных пород Полевской свиты (D_{1pl}), представленных вулканомиктовыми песчаниками (ПК50—70). Электрические свойства двух свит близкие, однако в пределах Зюзельской свиты выделяются две хорошо проводящие области (более 0,5 См) на глубину более 50 м (ПК10—18 и ПК22—50). Не исключено, что эти аномалии имеют отношение к рудной минерализации (рис. 5).

К востоку от Полевской свиты следует терригенно-карбонатная толща (D_{1tc}), состоящая в основном из мраморизованных известняков (ПК70—108). По данным вертикальных электрических зондирований карбонаты обладают развитой глинистой корой выветривания мощностью свыше 50 м [Давыдов и др., 2019]. В интервале ПК108—116 залегает полоса интенсивно рассланцованных серпентинитов (ΣO_{1-2sr}), часть из которых выходит на поверхность в форме «гребенок» с вертикальной отдельностью. Как уже упоминалось, в зоне известняково-серпентинитового меланжа присутствует силикатно-никелевое оруденение. Так, в километре к северу располагается Кунгурское никель-кобальтовое месторождение, а в нескольких километрах южнее профиля известны аналогичные малые месторождения контактово-карстового типа — Осиновское и Северское. Результаты ВЭЗ указывают на достаточно ровную поверхность кровли известняков вдоль профиля, однако на геоэлектрическом разрезе АМТЗ явно выделяется депрессия пониженных сопротивлений в районе ПК90. Характер продольной проводимости указывает на присутствие двух хорошо проводящих

объектов внутри массива известняков, которые можно идентифицировать как области развития карста. Центральные части предполагаемых карстовых полостей находятся на ПК80 и ПК90. Их линейные размеры превышают 50 м, и они могут быть перспективны на никелевое оруденение.

Второй ветвью Дегтярского разлома является тектонический контакт серпентинитов с субвулканическим комплексом (ПК116—120). В пределах Крылатовского профиля породы Дегтярской свиты ($D_2^{?dg}$) представлены риолитами и базальтами, мощность коры выветривания составляет 30—35 метров. Породы можно отличить по разным значениям УЭС, составляющим в среднем 1000—2000 Ом·м для базальтов и более 5000 Ом·м для риолитов. На глубине около 100 м в коренных породах к востоку от разлома присутствует прерывистый низкоомный горизонт, что связано с региональной областью развития трещинных вод, имеющих разгрузку в зону разлома. Более интересной выглядит аномалия электропроводности (до 0,6 См) в интервале ПК150—158, на глубинах 200—300 м от земной поверхности. Структурное положение и условия залегания могут свидетельствовать о присутствии в этом месте медно-колчеданного оруденения, не выходящего на поверхность, аналогичного рудному телу Чусовского месторождения [Родионов и др., 1972].

В конце профиля (ПК175—205) залегают плагиограниты Новоалексеевского массива ($p\gamma D_{1pv3}$). Граница массива отмечается увеличением рыхлых отложений в зоне контакта с последующим вздыманием фундамента в сторону гранитоидов. Геоморфологическим проявлением служит ступенчатое поднятие рельефа местности на 5—6 м. Кора выветривания гранитов отличается меньшей мощностью (16—20 м), большим количеством слоев (до четырех) и сильной неоднородностью электрометрических параметров (от 50 до 700 Ом·м).

Проведенные исследования показали хорошую сопоставимость геоэлектрических разрезов, полученных с помощью АМТЗ, с реальной геологической обста-

новкой, что позволило наметить перспективные участки рудной минерализации.

Выводы. Для изучения геоэлектрического строения уральских рудоносных структур проведены АМТЗ по субширотным профилям, пересекающим зону Дегтярского разлома вкрест простирания основных геологических границ. По результатам работ построены глубинные разрезы геоэлектрических параметров. Выделены литологические и тектонические границы сложного комплекса пород, примыкающих к региональному разлому. Электроразведочными методами уверенно прослеживается поверхность фундамента коренных пород, а также трассируются

ослабленные зоны. Проведенные исследования показали хорошую корреляцию геоэлектрических разрезов с реальной геологической обстановкой. Отмечается хорошая идентификация приразломных и рудоконтролирующих структур, что позволяет на их фоне выявить перспективные на оруденение участки, не выходящие на земную поверхность. Таким образом, выделено несколько мест возможного сосредоточения медной и никель-кобальтовой минерализации. В целом получены обнадеживающие результаты по геофизическому прогнозированию размещения рудных объектов колчеданного и контактово-карстового типа.

Список литературы

- Давыдов В. А. Аудиомагнитотеллурическая съемка в движении. *Геофизика*. 2014. № 2. С. 47—53.
- Давыдов В. А. Измерительная аппаратура ОМАР-2 для электромагнитных методов исследований. *Уральский геофизический вестник*. 2015. № 1(25). С. 37—41.
- Давыдов В. А. Новые электромагнитные датчики для среднечастотной электроразведки. *Датчики и системы*. 2017. № 11. С. 58—62.
- Давыдов В. А. Способ преобразования аудиомагнитотеллурических данных с учетом априорной информации. *Геофизические исследования*. 2016. Т. 17. № 4. С. 57—66.
- Давыдов В. А., Арзамасцев Е. В., Байдилов С. В., Горшков В. Ю., Астафьев П. Ф. Геофизические исследования в зоне Серовско-Маукского разлома. *Уральский геофизический вестник*. 2019. № 1(35). С. 17—22. doi: 10.25698/UGV.2019.1.3.17.
- Жданов С. А., Пыжьянов Ю. Б. Результаты работ по обобщению геолого-геофизических материалов в Дегтярско-Полевском районе. *Леса России и хозяйство в них*. 2011. № 1(38). С. 19—26.
- Иванов С. Н., Меркулов М. И. Дегтярское колчеданное месторождение. Москва-Ленинград: ОНТИ НКТП СССР, 1937. 124 с.
- Калугина Р. Д., Копанев В. Ф., Стороженко Е. В. и др. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:200 000. Изд. 2-е. Сер. Среднеуральская. Лист О-41-XXV. Объяснительная записка. Москва: Изд. Московского филиала ФГБУ «ВСЕГЕИ», 2017а. 156 с.
- Калугина Р. Д., Копанев В. Ф., Стороженко Е. В. и др. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:200 000. Изд. 2-е. Сер. Среднеуральская. Лист О-41-XXXI. Объяснительная записка. Москва: Изд. Московского филиала «ВСЕГЕИ», 2017б. 180 с.
- Прокин В. А., Буслаев Ф. П., Исмагилов М. И. Медноколчеданные месторождения Урала: Геологическое строение. Свердловск: Изд. УрО АН СССР, 1988. 241 с.
- Прокин В. А., Серавкин И. Б., Виноградов А. М. Геологические условия размещения и перспективы выявления крупных медноколчеданных месторождений на Урале. *Литосфера*. 2011. № 6. С. 123—133.
- Родионов П. Ф., Жданов С. А., Кожевников А. А., Кононенко И. И. Сравнительная характеристика методов скважинной электроразведки (по материалам Чусовского колчеданного месторождения). В кн.: Теория и практика электрометрии. Свердловск: Изд. РИСО УНЦ АН СССР, 1972. С. 164—176.

- Сазонов В. Н., Огородников В. Н., Коротев В. А., Поленов Ю. А. Месторождения золота Урала. Екатеринбург: Изд-во УГГГА, 1999. 570 с.
- Смывина В. С., Кузин А. В., Наседкин А. П., Папулов Н. Б. Палеовулканические реконструкции Полевского рудного района. *Уральский геологический журнал*. 2000. № 3(15). С. 107—117.
- Соколов В. Б., Аверкин Ю.П., Силин В. А. Стрение разреза верхней части земной коры в районе развития зеленокаменных толщ Урала и структурная позиция Дегтярского меднорудного района. *Док. АН СССР*. 1984. Т. 276. № 5. С. 1185—1189.
- Berdichevsky, M. N., & Dmitriev, V. I. (2009). *Models and methods of magnetotellurics*. Berlin: Springer, 563 p. doi: 10.1007/978-3-540-77814-1.
- Cagniard, L. (1953). Basic theory of the magnetotelluric method in geophysical prospecting. *Geophysics*, (8), 605—635. doi: 10.1190/1.1437915.
- Lahti, I. (2015). Audiomagnetotelluric (AMT) measurements: A new tool for mineral exploration and upper crustal research at the Geological Survey of Finland. Novel technologies for greenfield exploration. *Geological Survey of Finland, Special Paper 57*, 155—172.
- Lahti, I., Kontinen, A., & Nykänen, V. (2019). AMT survey in the Outokumpu ore Belt, Eastern Finland. *Exploration Geophysics*, 50(4), 351—363. doi: 10.1080/08123985.2019.1606200.
- Lap, T. T., Xue, C., Wei, A., Liu, L., Li, W., Hu, Q., & Zhang, T. (2014). Application of Audio-magnetotelluric method for exploration the concealed ore-bodies in Yuele lead-zinc ore field, Dagan County, NE Yunnan Province, China. *Journal of Geoscience and Environment Protection*, (2), 35—45. doi: 10.4236/gep.2014.23005.
- Singh, S., Maurya, V. P., Singh, R. K., Srivastava, S., Tripathi, A., & Adhikari, P. K. (2018). Audio-magnetotelluric investigation of sulfide mineralization in Proterozoic-Archean greenstone belts of Eastern Indian Craton. *Journal of Earth System Science*, 127(3), 34. doi: 10.1007/s12040-018-0938-z.

Geoelectric structure of the Degtyarsky Fault Zone in the Middle Urals according to audiomagnetotelluric soundings

V. A. Davydov, 2020

Yu. P. Bulashevich Institute of Geophysics, Ural Branch
of the Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russia

Currently, the reduction of reserves and forecast resources of ore minerals due to the development of previously discovered deposits continues. The reproduction of reserves is possible due to additional exploration of the flanks and deep horizons of known ore objects. To study the geoelectric structure of the Ural ore-bearing structures, audiomagnetotelluric soundings were carried out along sub-latitudinal profiles crossing the zone of the Degtyarsky fault near the largest pyrite deposit in the Middle Urals. Field observations were performed using the OMAR-2 universal broadband equipment developed at the Institute of Geophysics, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences for electrometric studies of urbanized territories. The applied hardware-software measuring complex is designed to effectively suppress industrial noise with additional methods for digital filtering of network harmonics. The cameral processing of audiomagnetotelluric data consisted in transforming the obtained frequency sounding curves into deep sections of geoelectric parameters using an original transformation algorithm. Based on the materials of the work, lithological and tectonic boundaries of a complex rock complex adjacent to the Degtyarsky regional fault are identified. Electric prospecting methods confidently trace the surface of the bedrock base, and weakened zones are also traced. Studies have shown a good correlation of geoelectric sections with real geological conditions. Good identification of the fault-bearing and ore-controlling structures is noted, which makes it

possible to identify areas of mineralization that are promising for mineralization that do not reach the surface. According to the results of the research, places of possible concentration of copper and nickel-cobalt mineralization are identified.

Key words: audiomagnetotelluric sounding, ore deposits, fault, geoelectric section, ore mineralization.

References

- Davydov, V. A. (2014). Audio magnetotelluric motion capture. *Geofizika*, (2), 47—53 (in Russian).
- Davydov, V. A. (2015). OMAR-2 measuring equipment for electromagnetic research methods. *Ural'skiy geofizicheskiy vestnik*, (1), 37—41 (in Russian).
- Davydov, V. A. (2017). New electromagnetic sensors for mid-frequency electrical prospecting. *Datchiki i sistemy*, (11), 58—62 (in Russian).
- Davydov, V. A. (2016). Audio magnetotelluric data transformation using a priori information. *Geofizicheskie issledovaniya*, 17(4), 57—66 (in Russian).
- Davydov, V. A., Arzamastsev, E. V., Baydikov, S. V., Gorshkov, V. Yu., & Astafiev, P. F. (2019). Geophysical surveys in the Serov-Mauk fault zone. *Ural'skiy geofizicheskiy vestnik*, (1), 17—22. doi: 10.25698/UGV.2019.1.3.17 (in Russian).
- Zhdanov, S. A., Pyzh'yanov, Yu. B. (2011). The results of the generalization of geological and geophysical materials in the Degtyarsko-Polevsky district. *Lesa Rossii i hozyaystvo v nikh*, (1), 19—26 (in Russian).
- Ivanov, S. N., & Merkulov, M. I. (1937). Degtyarsky pyrite deposit. Moscow-Leningrad: ONTI NKTP USSR, 124 p. (in Russian).
- Kalugina, R. D., Kopanev, V. F., Storozhenko, E. V., et al. (2017a). State geological map of the Russian Federation. Scale 1:200 000. Second edition. Series Sredneuralskaya. Sheet O-41-XXV. Explanatory note. Moscow: Publ. of the Moscow branch of FSBI «VSEGEI», 156 p. (in Russian).
- Kalugina, R. D., Kopanev, V. F., Storozhenko, E. V., et al. (2017b). State geological map of the Russian Federation. Scale 1:200 000. Second edition. Series Sredneuralskaya. Sheet O-41-XXXI. Explanatory note. Moscow: Publ. of the Moscow branch of FSBI «VSEGEI», 180 p. (in Russian).
- Prokin, V. A., Buslaev, F. P., & Ismagilov, M. I. (1988). *Copper pyrite deposits of the Urals: Geological structure*. Sverdlovsk: Edition of the Ural Branch of the USSR Academy of Sciences, 241 p. (in Russian).
- Prokin, V. A., Seravkin, I. B., & Vinogradov, A. M. (2011). Geological conditions of location and prospects for identifying large copper pyrite deposits in the Urals. *Litosfera*, (6), 123—133 (in Russian).
- Rodionov, P. F., Zhdanov, S. A., Kozhevnikov, A. A., & Kononenko, I. I. (1972). Comparative characteristics of borehole electrical exploration methods (based on the materials of the Chusovsky pyrite deposit). In *Theory and practice of electrometry* (pp. 164—176). Sverdlovsk: Edition of the Editorial and Publishing Council of the Ural Scientific Center of the USSR Academy of Sciences (in Russian).
- Sazonov, V. N., Ogorodnikov, V. N., Koroteev, V. A., & Polenov, Yu. A. (1999). *Gold deposits of the Urals*. Yekaterinburg: Publ. House of the Ural State Mining and Geological Academy, 570 p. (in Russian).
- Smyvina, V. S., Kuzin, A. V., Nasedkin, A. P., & Papulov, N. B. (2000). Paleovolcanic reconstructions of the Polevsky ore district. *Ural'skiy geologicheskii zhurnal*, (3), 107—117 (in Russian).
- Sokolov, V. B., Averkin, Yu. P., & Silin, V. A. (1984). The structure of the section of the upper part of the earth's crust in the region of development of the greenstone strata of the Urals and the structural position of the Degtyarsky copper ore region. *Doklady AN SSSR*, 276(5), 1185—1189 (in Russian).
- Berdichevsky, M. N., & Dmitriev, V. I. (2009). *Models and methods of magnetotellurics*. Berlin: Springer, 563 p. doi: 10.1007/978-3-540-77814-1.
- Cagniard, L. (1953). Basic theory of the magnetotelluric method in geophysical prospecting. *Geophysics*, (8), 605—635. doi: 10.1190/1.1437915.
- Lahti, I. (2015). Audiomagnetotelluric (AMT) mea-

- surements: A new tool for mineral exploration and upper crustal research at the Geological Survey of Finland. Novel technologies for greenfield exploration. *Geological Survey of Finland, Special Paper 57*, 155—172.
- Lahti, I., Kontinen, A., & Nykänen, V. (2019). AMT survey in the Outokumpu ore Belt, Eastern Finland. *Exploration Geophysics*, 50(4), 351—363. doi: 10.1080/08123985.2019.1606200.
- Lap, T. T., Xue, C., Wei, A., Liu, L., Li, W., Hu, Q., & Zhang, T. (2014). Application of Audio-magnetotelluric method for exploration the concealed ore-bodies in Yuele lead-zinc ore field, Dagan County, NE Yunnan Province, China. *Journal of Geoscience and Environment Protection*, (2), 35—45. doi: 10.4236/gep.2014.23005.
- Singh, S., Maurya, V. P., Singh, R. K., Srivastava, S., Tripathi, A., & Adhikari, P. K. (2018). Audio-magnetotelluric investigation of sulfide mineralization in Proterozoic-Archean greenstone belts of Eastern Indian Craton. *Journal of Earth System Science*, 127(3), 34. doi: 10.1007/s12040-018-0938-z.

Геоелектрична будова зони Дегтярського розлому на Середньому Уралі за даними аудіомагнітотелуричних зондувань

В. А. Давидов, 2020

Інститут геофізики ім. Ю. П. Булашевича УрВ РАН, Єкатеринбург, Росія

У даний час триває скорочення запасів і прогнозних ресурсів рудних корисних копалин за рахунок відпрацювання раніше відкритих родовищ. Відтворення запасів можливо за рахунок дорозвідки флангів і глибоких горизонтів відомих рудних об'єктів. Для вивчення геоелектричної будови уральських рудоносних структур проведено аудіомагнітотелуричне зондування за субширотними профілями, які перетинають зону Дегтярського розлому поблизу найбільшого на Середньому Уралі колчеданного родовища. Польові спостереження виконані за допомогою універсальної широкосмугового апаратури ОМАР-2, розробленої в Інституті геофізики УрВ РАН для електрометричних досліджень урбанізованих територій. Застосований програмно-апаратний вимірювальний комплекс розрахований на ефективне придушення промислових завад з додатковими способами цифрової фільтрації мережеских гармонік. Камеральна обробка аудіомагнітотелуричних даних полягала в трансформації отриманих частотних кривих зондувань в глибинні розрізи геоелектричних параметрів за допомогою оригінального алгоритму перетворення. За матеріалами робіт виділено літологічні і тектонічні кордони складного комплексу порід, що приликають до Дегтярського регіонального розлому. Електророзвідувальними методами впевнено простежується поверхня фундаменту корінних порід, а також трасуються ослаблені зони. Проведені дослідження показали хорошу кореляцію геоелектричних розрізів з реальною геологічною обстановкою. Виділяється хороша ідентифікація природного і рудоконтрольованих структур, що дає змогу на їх фоні виявити перспективні на оруднення ділянки, які не виходять на денну поверхню. За результатами проведених досліджень виділено місця можливого зосередження мідної і нікель-кобальтової мінералізації.

Ключові слова: аудіомагнітотелуричне зондування, рудні родовища, розлом, геоелектричний розріз, рудна мінералізація.