УДК 553.461: 550.837

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТА ЧАСТОТНОЙ ДИСПЕРСИИ НА УЛЬТРАОСНОВНЫХ ХРОМИТОНОСНЫХ МАССИВАХ УРАЛА

Давыдов В.А. – Институт геофизики УрО РАН, Екатеринбург

Аннотация. Приведены материалы по изучению поляризационно-частотных свойств хромитовых руд и вмещающих их ультрамафитов в естественном залегании с помощью различных электроразведочных установок. Исследования проводились на трех ультраосновных массивах Урала офиолитовой ассоциации: Рай-Из, Верх-Нейвинском и Ключевском. Получены обнадеживающие результаты по аномальному поведению частотной дисперсии электрического сопротивления в рудных зонах с использованием установок индукционного типа.

Электромагнитные исследования, вызванная поляризация, хромитовые руды, индукционные дистанционно-частотные измерения.

RESEARCH OF A FREQUENCY DISPERSION ON THE ULTRABASIC CHROMITE-BEARING MASSIFS OF URALS MOUNTAINS

Davydov V.A. – Institute of Geophysics UB of RAS, Yekaterinburg

Abstract. Materials on studying of polarization frequency properties chromite ores and containing them ultramafic rocks in natural occurrence by means of various electrical probes are resulted. Researches were spent on three ultrabasic massifs of Urals Mountains ophiolite associations: Rai-Iz, Verkh-Neyvinsky and Kljuchevsky. Encouraging results on abnormal behaviour of resistivity frequency dispersion in ore zones with use of induction type probes are received.

Electromagnetic researches, induced polarization, chromite ores, induction offset-frequency measurements.

Введение

Месторождения хромитов складчатых областей, к каковым относится Урал, локализуются в ультраосновных массивах офиолитовой ассоциации, иначе называемых альпинотипными. Многие массивы перекрыты рыхлыми отложениями, что затрудняет их непосредственное геологическое изучение с поверхности. В вопросе поиска месторождений под осадочным чехлом помогают геофизические методы, однако физические свойства хромитов и вмещающих их пород (дунитов) бывают очень близкими, за исключением плотности. Сплошные руды хромитов обладают высокой плотностью (более 4 г/см^3), низкой магнитной восприимчивостью (50–150·10^{-5} ед. СИ) и высоким удельным электрическим сопротивлением (2000–5000 Ом·м). Вкрапленные руды характеризуются очень широким диапазоном изменения физических свойств, в зависимости от содержания в руде хромшпинелида, характера силикатного цемента, пористости и трещиноватости. Неизмененные дуниты и гарцбургиты высокоомны и слабомагнитны, имеют плотность от 2,7 до 3,3 г/см^3, однако серпентинизация ультрамафитов приводит к резкому увеличению магнитной восприимчивости, снижению плотности и электрического сопротивления. Традиционно используемым методом поиска и разведки хромитовых месторождений является комплексирование гравиметрии и магнитометрии (Пахомов, Баторин, 2006). Данный комплекс хорошо зарекомендовал себя на крупных месторождениях хромитов стратиформного типа, однако на альпинотипных месторождениях Урала эффективность этих методов оказалась под вопросом. Серпентинизация, тектонический характер рудоконтролирующих структур и жилообразная форма хромитовых залежей сильно усложняют общую картину физических полей. Поэтому нахождение дополнительных геофизических параметров, по которым можно бы было идентифицировать рудные тела, является актуальной задачей. Электроразведка при поисках хромитов применяется только как вспомогательный метод, т. к. по

проводящим свойствам отличить руду от вмещающих пород не удается. Метод вызванной поляризации (ВП) вообще считается не правомерным, поскольку хромит не является электронным проводником. Однако стоит вспомнить, что серпентинизированные ультрабазиты содержат значительное количество магнетита, а в рудных зонах может присутствовать вкрапленность сульфидов. Положительные примеры применения метода ВП имеются на Шоржинском месторождении в Армении (Газарян, 1965), при поисках хромитов в Швеции (Parasnis, 1964), разведочных работах в Турции (Bayrak, 2002) и в других местах. Так как теоретически и экспериментально доказано единство природы эффектов вызванной поляризации и частотной дисперсии (ЧД) электрического сопротивления (Кормильцев, Мезенцев, 1989), предпринята попытка исследовать эффект ЧД на хромитоносных массивах Урала.

Цель работы заключалась в изучении поляризационных свойств хромовых руд и вмещающих их ультраосновных пород офиолитовой серии. Основными задачами исследований являлись электрометрические измерения на переменном токе с применением гальванических и индуктивных установок по выявлению частотной дисперсии среды.

Методика работ

Гальваническое возбуждение. Исследовательские работы проводились установкой дипольно-осевого профилирования (ДОП) в традиционном виде и в варианте измерений импеданса. В первом случае применялась стандартная установка A10B15M10N с заземляемыми питающими (*AB*) и приемными (*MN*) линиями. Расстояние между центрами генераторного и приемного диполей составляло 25 м, использовался комплект электроразведочной аппаратуры ЭРА-МАКС (НПП ЭРА, г. Санкт-Петербург) на частотах 4,88 и 625 Гц. В случае импедансных измерений в качестве приемного устройства подключалась двухканальная измерительная аппаратура ОМАР-2м (Давыдов, 2015а) с датчиками электромагнитного поля. К одному каналу приемника подключалась незаземленная 20-метровая стелющаяся линия, измеряющая электрическую компоненту E_r вдоль профиля, ко второму каналу – индукционный датчик АМД-50 (Давыдов, 2014), измеряющий поперечную магнитную составляющую H_φ. Геометрический коэффициент эквивалентной электрической дипольно-осевой установки при этом такой же, таким образом проводилось постоянное согласование приемных устройств между собой. Так как аппаратура ОМАР-2м имеет широкую частотную полосу регистрации, производилась запись не только несущей частоты, но и прочих гармоник сигнала. Для расчета кажущегося удельного электрического сопротивления (УЭС) при работе со стандартной установкой ДОП использовалась известная формула (Якубовский, 1980):

$$\rho_к = k \cdot U_{MN} / I_{AB},$$

где U_{MN} – разность потенциалов между приемными электродами (мВ);

I_{AB} – ток в питающей линии (мА);

$$k = \frac{2\pi}{\left(\frac{1}{AM}\right) - \left(\frac{1}{BM}\right) - \left(\frac{1}{AN}\right) + \left(\frac{1}{BN}\right)} \quad -$$

геометрический коэффициент установки (м).

Другой параметр, рассчитываемый в результате проведения данных работ, – это входное сопротивление среды или импеданс, равный отношению ортогональных компонент электрического и магнитного полей: $Z = E_r / H_\varphi$. В общем случае для определения импеданса используется следующая формула (Электроразведка, 1989):

$$Z = (U_e / U_m) \cdot (g / h_l),$$

где U_e – напряжение на концах электрической линии, мВ;

U_m – напряжение на выходе магнитного датчика, мВ;

g – чувствительность магнитного датчика, В/(А/м);

h_l – действующая длина электрической приемной линии, м.

Для вычисления кажущегося сопротивления (КС) применялась формула, предназначенная для импедансных измере-

ний в ближней зоне горизонтального электрического источника (Журавлева, Самоделкина, 1992):

$$\rho_к = Z \cdot r / 2,$$

где r – расстояние между центрами питающих и приемных диполей, м.

Основным интересуемым электрометрическим параметром была частотная дисперсия, связанная с поляризационными свойствами среды. Она характеризует разницу в электрическом сопротивлении на разных частотах. В нашем случае определялся коэффициент частотной дисперсии (КЧД) на двух несущих частотах (4,88 и 625 Гц) и на четырех нечетных гармониках частоты 625 Гц. При вычислениях КЧД использована формула, полученная нашими предшественниками по эмпирическим данным (Астраханцев, Улитин, 1968):

$$К_f = (\rho_к^{НЧ} - \rho_к^{ВЧ})/(\rho_к^{НЧ} \times \lg (f^{ВЧ} / f^{НЧ})),$$

где $\rho_к^{НЧ}$ – кажущееся сопротивление на низкой частоте;

$\rho_к^{ВЧ}$ – кажущееся сопротивление на высокой частоте;

$f^{НЧ}$ – низкая частота;

$f^{ВЧ}$ – высокая частота.

Индуктивное возбуждение. Работы выполнялись методом дипольного электромагнитного профилирования (ДЭМП) и дистанционного индукционного зондирования (ДИЗ) на двух частотах. Применяемые частоты находились в диапазоне от 8 до 128 кГц и отличались друг от друга в 4–8 раз. Аппаратура исследований представляет из себя ранний прототип мелкосерийной индукционной аппаратуры МЧЗ-8 (Байдиков, Человечков, 2011) без микропроцессорного управления. При профилировании расстояние (r) между генератором и приемником равнялось 20 м, при зондировании – от 5 до 40 м. Точка записи отнесена к месту расположения приемника, эффективная глубина исследований принимается равной четверти разноса ($h = r/4$). Первичное электромагнитное поле генерировалось с помощью вертикального магнитного диполя. Технология измерений заключались в последовательной регистрации двух взаимно перпендикулярных компонент переменного магнитного поля (H_z и H_r) на рабочих частотах. Кажущееся сопротивление рассчитывалось по упрощенной формуле для низкочастотной асимптотики (Журавлева и др., 1994):

$$r_к = 2r^2 f |H_z|/|H_r|,$$

где r – расстояние генератор-приемник (в км);

f – частота генератора (в Гц);

H_z – вертикальная компонента магнитного поля;

H_r – горизонтальная (осевая) компонента поля.

Коэффициент частотной дисперсии для различных пар частот рассчитывался по модифицированной формуле с логарифмической нормализацией значений:

$$К_f = (\rho_к^{ВЧ} - \rho_к^{НЧ})/(\rho_к^{НЧ} \times \ln (f^{ВЧ} / f^{НЧ})).$$

Дело в том, что используемые индукционные установки работают в высокочастотном диапазоне поляризации электроосматического или миграционного типа, характеризующейся отрицательным знаком (Задорожная, 2011). Чтобы аномалии ЧД выглядели стандартным образом, т. е. положительными, были взаимно изменены положения компонентов числителя формулы. Кроме того, новые исследования дисперсии электросопротивления на индуктивных установках показали частотную зависимость, близкую к натуральному логарифму, что также отражено в формуле.

По результатам измерений и расчетов строились графики или качественные разрезы кажущихся сопротивлений и КЧД. Данные построения позволяют определить тенденции изменения электрических свойств разреза и выделить локальные поляризующиеся объекты.

Результаты исследований

Для уральских месторождений хрома следует выделить два основных момента: малая мощность рудных тел и слабое отличие физических свойств руд и вмещающих пород друг от друга. В результате этого, аномальный эффект от рудного объекта невысокий, а малые тела просто пропускаются. Чтобы уверенно идентифицировать рудопроявления требуется соблюдать не-

обходимую детальность съемки (аномалия должна прослеживаться не менее чем в трех точках). В приведенных примерах шаг геофизических наблюдений составлял не менее 5 м.

Массив Рай-Из. Хромитоносный гипербазитовый массив Рай-Из на Полярном Урале входит в число крупнейших в мире. Массив сложен дунитами и гарцбургитами, окаймленными по периферии пироксенитами. Породы в разной степени серпентенизированы, в меньшей степени амфиболитизированы и оталькованы. Массив разбит разрывными нарушениями на отдельные блоки с образованием зон рассланцевания и смятия. Четвертичные отложения исследуемого участка представлены элювиально-делювиальными крупноглыбовыми отложениями с щебнем и небольшим количеством суглинистого заполнителя. Мощность рыхлых отложений варьирует от 0,5 до 2–4 м. С дунит-гарцбургитовым комплексом пространственно и генетически связано хромитовое оруденение. Месторождения хромитов содержат многочисленные уплощенно-линзовидные рудные тела, залегающие кулисообразно вдоль хромитоносной зоны. Размеры отдельных рудных тел достигают по длине 300–500 м, по мощности – от 0,5 до 14 м. Преобладающими являются сплошные и густовкрапленные хромовые руды, в краевых частях развиты более бедные вкрапленные руды (Перевозчиков и др., 2005).

Для нахождения корреляционных геолого-геофизических зависимостей хромового оруденения были проведены комплексные опытно-методические работы с изучением частотной дисперсии на участках трех рудопроявлений. На одном из них рудное тело хромитов мощностью более десяти метров было вскрыто траншеей, эталонный профиль был размечен через его центральную часть. Работы на эталонном профиле выполнены методом дипольно-осевого профилирования на нескольких частотах. Как оказалось, частотная дисперсия проявляется по-разному на разных типах установок. При гальваническом возбуждении и приеме дисперсия практически отсутствует на всех изученных частотах, точнее отсутствуют аномалии над рудными объектами. В случае импедансных измерений получены уверенные аномалии КЧД на всех гармониках. Достоверность данных подтверждает тот факт, что значения коэффициентов K_f при различных вариантах пересчета пяти используемых гармоник сигнала имеют подобную форму графиков вдоль профиля, отличаясь только смещением по амплитуде. Таким образом, подтверждается высказанное ранее предположение, что эффекты ВП можно разделить за счет разной реакции на поляризацию тела по наблюдениям электрических и магнитных компонент поля (Светов и др., 2011).

По результатам ДОП над рудным телом наблюдаются повышенные значения сопротивлений (около 5000 Ом·м), при «нормальном» уровне 1000–2000 Ом·м. Коэффициент частотной дисперсии, вычисленный по импедансным данным на первой (625 Гц) и третьей гармонике (1875 Гц), отразился над рудой четкой аномалией шириной более 50 м (рис. 1).

Следует отметить, что аномалия силы тяжести менее выделяема на фоне геологических помех и сосредоточена над хромовой рудой в пределах расчистки. Более широкая аномалия ЧД свидетельствует о том, что поляризуется не только тело хромитов, но и область околорудных изменений. Это дает дополнительное преимущество при поиске небольших рудных тел.

Характер поведения других геофизических полей на проявлениях хромита довольно изменчивый. В рудных зонах могут наблюдаться ожидаемые изменения гравитационного и магнитного полей, однако если руда не выходит на поверхность – значимые аномалии отсутствуют. Сейсмическими исследованиями отмечена закономерность размещения оруденения в куполообразных структурах повышенных значений упругих параметров (скоростей сейсмических волн, коэффициента Пуассона), вблизи градиентных участков изменения свойств (Давыдов, 2015б). Аудиомагнитотеллурические зондирования на Рай-

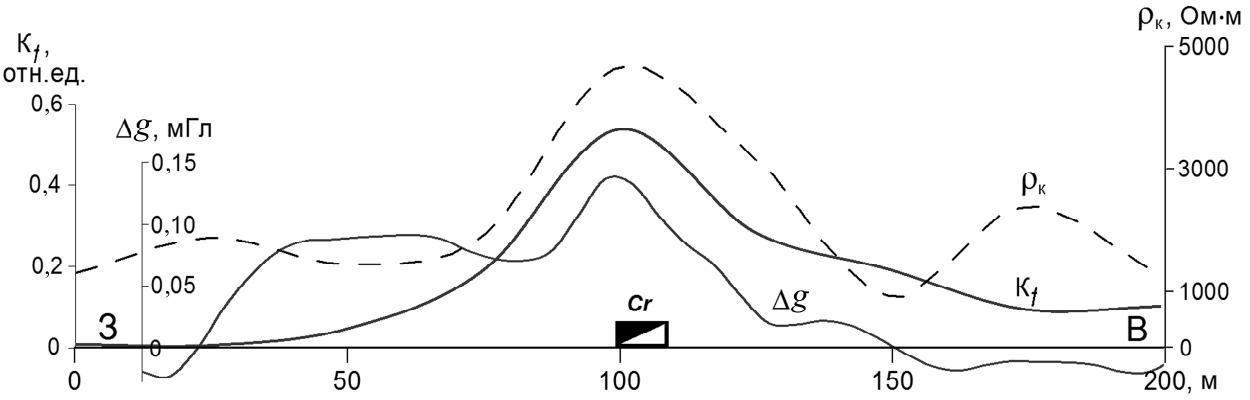

Рис. 1. Графики кажущегося сопротивления ($\rho_к$), коэффициента частотной дисперсии (K_f) и аномального гравитационного поля (Δg) над хромитовым рудопроявлением (массив Рай-Из, Полярный Урал)

Изе выявили преимущественную локализацию рудных тел в высокоомных блоках, в обрамлении зон пониженных УЭС, выделяющих рудоконтролирующие разломы (Давыдов, 2016). Проведенные электроразведочные работы подтвердили данную особенность поведения электрического сопротивления, а измерения на трех известных рудопроявлениях массива показали во всех случаях уверенные положительные аномалии частотной дисперсии над рудными объектами. Изучение железистости хромовых шпинелей показало, что рудные хромититы могут соответствовать составу субферрихромитов, а акцессорные шпинели околорудных ультрамафитов достигать состава феррихромита и хроммагнетита (Ширяев, Вахрушева, 2016). Электронная проводимость последних может объяснить наличие поляризационно-частотного эффекта в зонах оруденения.

Верх-Нейвинский массив расположен на стыке Тагильского мегасинклинория и Восточно-Уральского поднятия, приурочен к Серовско-Маукскому глубинному разлому. Массив сложен породами серовского дунит-гарцбургитового комплекса и габброидами тагило-кытлымского комплекса. Контакты массива с вмещающими вулканогенно-осадочными образованиями зюзельской, кировградской и кунгурковской свит тектонические, с падением на восток под углами 55–80º. Северная часть состоит в основном из дунитов, которые контактируют на севере и востоке с габброидным массивом. Вдоль контакта развита мощная зона клинопироксенитов и верлитов. Южная часть массива также представлена дунитовым телом, зажатым между клинопироксенитами (Alekseev, 2017). Ультраосновные породы Верх-Нейвинского массива интенсивно серпентинизированы, с аподунитовыми серпентинитами связаны многочисленные рудопроявления и мелкие месторождения хромитовых руд. Хромитовое оруденение объединяется в два рудных поля: Лешачьи лога и Жужинские горы. Оба рудных поля расположены в краевых дунитовых телах среди дунит-клинопироксенит-габбрового комплекса. Участок работ располагался в Жужинских горах, где рудные тела меньше по размерам, с преобладанием вкрапленных руд.

Профиль для исследований размечен в центральной части небольшого месторождения, выработанного открытым способом. Размеры карьера 50×20 м, глубина около 15 м. Простирание отработанного рудного тела субмеридианальное, с падением на восток под углом 80º. На дне карьера сохранилась жила сплошного хромита мощностью полметра, в окружении вкрапленников. Профиль проходит по южному краю карьера, через пробуренную рядом разведочную скважину С-5, подсекшую остатки руды на глубине 20 м. Электроразведочные работы проводились методом ДЭМП на частотах 10 и 80 кГц. Как показали недавние опытные работы по согласованию результатов измерений на постоян-

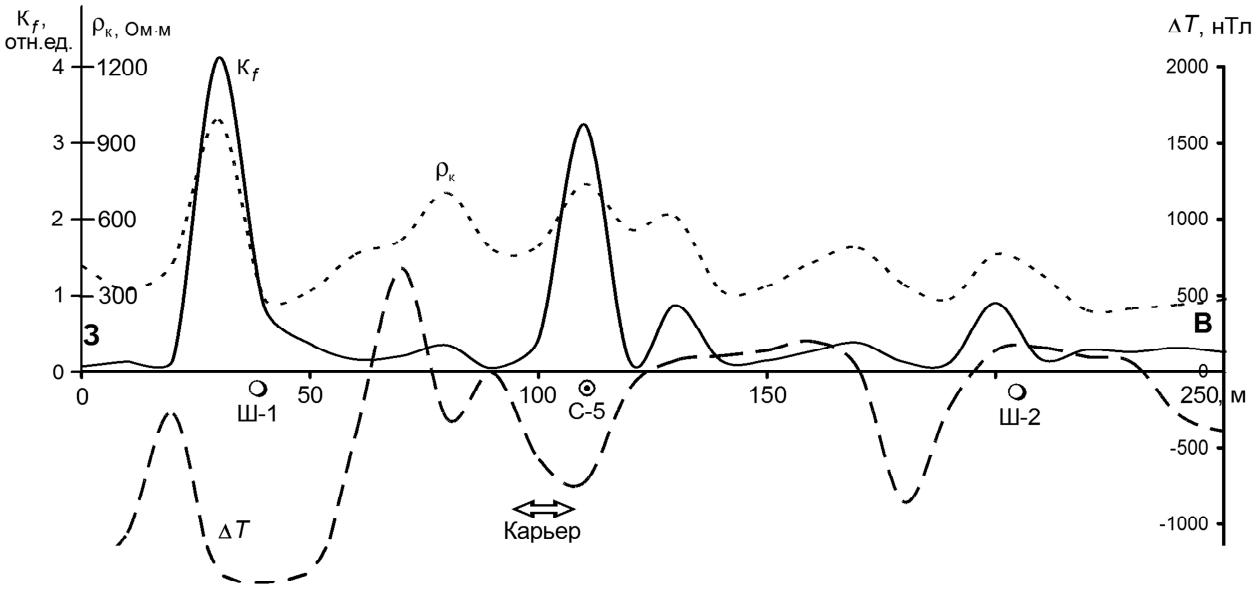

Рис. 2. Графики кажущегося сопротивления ($\rho_к$), коэффициента частотной дисперсии (K_f) и аномального магнитного поля (ΔT) в районе старых выработок хромитов (Верх-Нейвинский массив, Средний Урал)

ном и переменном токе, более точные значения кажущихся сопротивлений при электромагнитном профилировании получаются на высоких частотах (40–80 кГц) (Давыдов и др., 2017). Кажущиеся УЭС (при f = 80 кГц) на выбранном профиле изменяются в широком диапазоне (250–1000 Ом·м) и не имеют ярко выраженной связи с положением старых выработок, которая отмечается на графике коэффициента частотной дисперсии (рис. 2).

Аномалии частотной дисперсии наблюдается у скважины С-5 в районе карьера, а также рядом с шурфами Ш-1 и Ш-2, причем шурф Ш-1, по своей капитальности крепления стенок, больше похож на вертикальный ствол старой шахты. Дополнительным подтверждением связи ЧД с рудой могут служить результаты магниторазведки, которые показали вблизи выделенных зон характерные для хромитов отрицательные аномалии магнитного поля от 600 до 1200 нТл (см. рис. 2). Следует отметить, что абсолютная амплитуда КЧД в индуктивном варианте измерений превосходит значения, полученные при гальваническом возбуждении.

Ключевской массив. Следующий участок опытно-методических работ находится на Ключевском офиолитовом массиве, в 40 км к юго-востоку от Екатеринбурга, в окрестностях г. Двуреченска. Массив приурочен южному обрамлению Мурзинско-Адуйского гранитоидного блока, его положение контролируется Мурзинским и Восточно-Ключевским разломами. С запада, Ключевской массив по зоне тектонических нарушений соприкасается с вулканогенно-осадочной тощей (D_3), с юга и востока – с колюткинской карбонатно-терригенной толщей (S_{1-2}). На площади массива известно около 200 мелких хромитовых месторождений и рудопроявлений. Наиболее крупные из них приурочены к дунит-верлит-клинопироксенитового комплексу и представляют собой крутопадающие рудные тела жилообразной формы, залегающие в серпентинизированных дунитах (Пушкарев, 2006).

Геофизический профиль был разбит в 20 м от края старого хромитового карьера Ревдинско-Первомайской группы месторождений, размером 30×10 м и глубиной до 10 м. Направление профиля задано в крест простирания линзы вкрапленных руд, обнаруженной в карьере среди серпентинитов. Сделана попытка определить поляризационные свойства хромовых руд на основе изучения частотной дисперсии в варианте дистанционно-частотных измере-

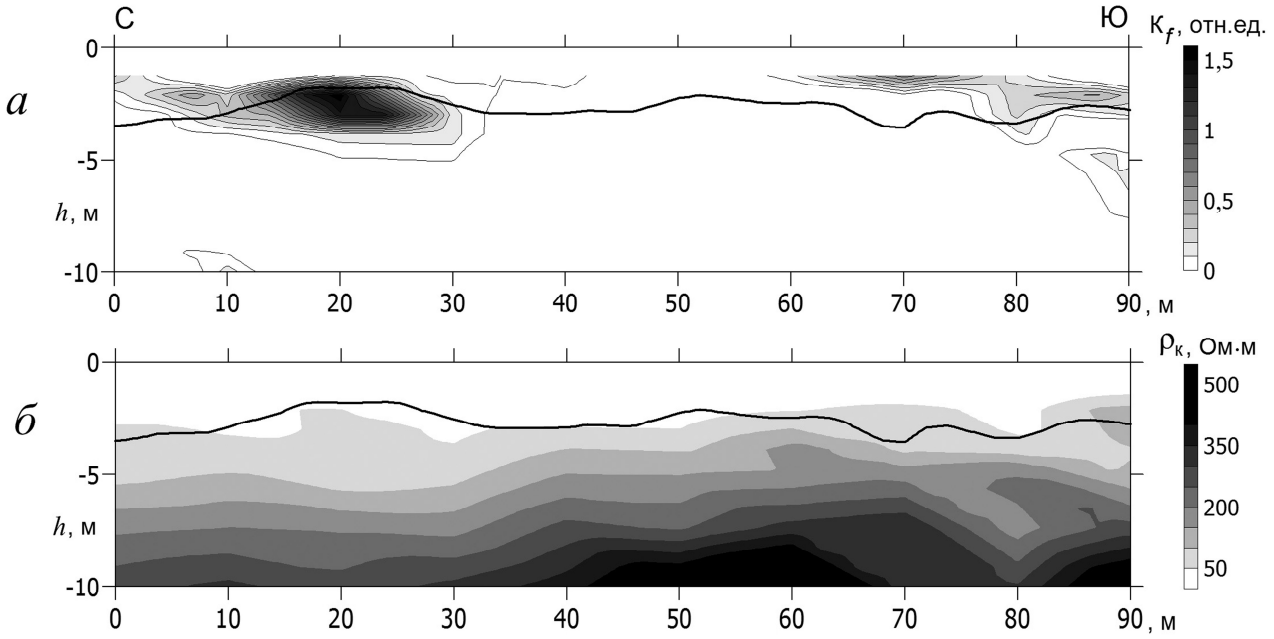

Рис. 3. Результаты индукционных зондирований на Ключевском массиве (Средний Урал):
а) разрез коэффициента частотной дисперсии;
б) разрез кажущихся сопротивлений на частоте 32 кГц.

ний (многочастотных индукционных зондирований). Для этого были проведены ДИЗ на частотах 8, 32 и 128 кГц. Наиболее интересные результаты получены при рассмотрении разрезов кажущихся удельных электрических сопротивлений и поляризационно-частотного эффекта на частотах 8 и 32 кГц (рис. 3).

На разрезах наблюдается выраженная аномалия электросопротивления и частотной дисперсии в месте ожидаемого пересечения профиля с рудной жилой (интервал 15–30 м, глубина 2–4 м). Правильность привязки рудного тела подтверждается отрицательной аномалией магнитного поля в 200 нТл на 20-метровой отметке. О том, что аномальная зона находится в коренных породах, свидетельствует положение преломляющей границы, полученной с помощью сейсморазведки методом преломленных волн. Таким образом, можно констатировать присутствие поляризации во вкрапленных хромитовых рудах Ключевского массива. Аномалии КЧД отмечаются в том же месте на всех измеренных парах частот (8–128 кГц, 32–128 кГц), но имеют меньшую амплитуду. Видимо, существует оптимальный частотный диапазон, в котором поляризационный эффект в рудных зонах проявляется в максимальной степени. Для его определения необходимы более трудоемкие измерения по детальной сетке частот аппаратуры МЧЗ-8 (4, 8, 16, 32, 64, 128 кГц).

На полученном разрезе КС в конце профиля (интервал 70–80 м, глубина 6–10 м) замечена аномалия пониженных сопротивлений в коренных породах. По геологическим данным она может быть связана с тектоническим нарушением. Повышенные значения КЧД в рыхлых отложениях над ней могут свидетельствовать о присутствии эпигенетического пирита над зоной разлома.

Заключение

Изучение поляризационно-частотных свойств хромитовых руд и вмещающих их ультрамафитов в естественном залегании с помощью различных электроразведочных установок находится пока в стадии развития. Выполненные работы с использованием традиционных электрических установок на низких частотах не выявили значимых поляризационных эффектов. Тем не менее, получены обнадеживающие результаты по аномальному поведению частотной дисперсии электрического сопротивления в рудных зонах с помощью высокочастот-

ных установок с индуктивным приемом. Наиболее перспективным при исследованиях эффектов вызванной поляризации на хромитоносных офиолитовых массивах следует признать применение индукционных дистанционно-частотных измерений.

Автор признателен своим коллегам: Алексееву А.В. (ИГГ УрО РАН), Байдикову С.В., Вдовину А.Г., Понамареву В.В. и Сарвартинову А.И. (ИГФ УрО РАН) за проведение совместных полевых работ на Верх-Нейвинском массиве, а также особо благодарит Вахрушеву Н.В. (ИГГ УрО РАН) за организацию работ на массивах Рай-Из и Ключевском.

Литература

Астраханцев Г.В., Улитин Р.В. Комплексная электропроводность горных пород на звуковых частотах и способы ее изучения в полевых условиях // Электрометрия при поисках сульфидных месторождений. Сборник № 8. Свердловск: УФАН СССР, 1968. С. 41–47.

Байдиков С.В., Человечков А.И. Аппаратура для высокочастотных индукционных зондирований МЧЗ-8 // Уральский геофизический вестник. 2011. № 1. С. 4–8.

Газарян Г.О. Результаты применения метода вызванной поляризации на хромитовом месторождении // Методика и техника разведки. 1965. № 49. С. 123–128.

Давыдов В.А. Измерительная аппаратура ОМАР-2 для электромагнитных методов исследований // Уральский геофизический вестник. 2015а. № 1 (25). С. 37–41.

Давыдов В.А. Спектральный анализ данных микросейсмических зондирований // Геофизика. 2015б. № 1. С. 72–77.

Давыдов В.А. Эквивалентные схемы и основные характеристики различных датчиков электромагнитных сигналов в широкой полосе частот // Уральский геофизический вестник. 2014. № 1 (23). С. 46–54.

Давыдов В.А. Способ преобразования аудиомагнитотеллурических данных с учетом априорной информации // Геофизические исследования. 2016. Т. 17. № 4. С. 57–66.

Давыдов В.А., Байдиков С.В., Арзамасцев Е.В. Альтернативные методы электропрофилирования на линейных объектах // Инженерные изыскания. 2017. № 1. С. 62–67.

Журавлева Р.Б., Самоделкина 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.

Журавлева Р.Б., Самоделкина С.А., Бакаев В.П. К выбору интерпретационных параметров при дистанционном зондировании и профилировании с аппаратурой ДЭМП–СЧ // Российский геофизический журнал. 1994. № 2–4. С. 67–70.

Задорожная В.Ю. Поляризационные свойства осадочных горных пород и руд: физические процессы, математическое моделирование и лабораторные измерения // Материалы Пятой всероссийской школы-семинара им. М.Н. Бердичевского и Л.Л. Ваньяна по электромагнитным зондированиям Земли – ЭМЗ-2011. В двух книгах. Кн. 2. СПб: СПбГУ, 2011. С. 256–259.

Кормильцев В.В., Мезенцев А.Н. Электроразведка в поляризующихся средах. Свердловск: УрО АН СССР, 1989. 128 с.

Пахомов М.И., Баторин В.Б. Геологические основы и геофизические методы поисков хромитов. М.: РИЦ ВИМС, 2006. 67 с.

Перевозчиков Б.В., Кениг В.В., Лукин А.А., Овечкин А.М. Хромиты массива Рай-Из на Полярном Урале (Россия) // Геология рудных месторождений. 2005. Т. 47. №. 3. С. 230–248.

Пушкарев Е.В. Ключевской офиолитовый массив на Среднем Урале // Офиолиты: геология, петрология, металлогения и геодинамика. Мат-лы междунар. науч. конф. XII Чтения памяти А.Н. Заварицкого. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 2006. С. 334–345.

Светов Б.С., Агеев В.В., Агеева О.А., Каринский С.Д. О связи феноменологического описания вызванной поляризации среды с происходящими в ней физическими процессами. Постановка вопроса // Геофизика. 2011. № 4. С. 25–29.

Ширяев П.Б., Вахрушева Н.В. Оливин-хромшпинелевое равновесие в хромити-

тах и ультрамафитах массива Рай-Из, Полярный Урал // Литосфера. 2016. № 2. С. 107–110.

Электроразведка. Справочник геофизика. В двух книгах / Под ред. В.К. Хмелевского и В.М. Бондаренко. М.: Недра, 1989. 438 с.

Якубовский Ю.В. Электроразведка: Учебник для вузов. М.: Недра, 1980. 384 с.

Alekseev A.V. The study of the ore bodies zonality by composition of olivine in the chromite deposit no. 219 of the Verkh-Neyvinsky massif (Middle Urals) // Известия Уральского государственного горного университета. 2017. Вып. 3 (47). С. 34–38.

Bayrak M. Exploration of chrome ore in Southwestern Turkey by VLF-EM // Journal of the Balkan geophysical society. 2002. Vol. 5. No 2. P. 35–46.

Parasnis D. Some aspects of geophysical prospecting for chromite // Methods of Prospection for Chromite. Paris, 1964. T. 16. P. 225–231.