

ется дополнительное время и ресурсы, а в быстром получении набора разнородных детально закартированных характеристик геологической обстановки с последующим установлением зависимости между ними и признаками полезного компонента (в первую очередь с применением экспрессных геохимических методов или информации по участкам-аналогам), что позволяет за счет быстрых и дешевых БПЛА-методов получить детальную и комплексную информацию о ранжировании изучаемой площади по степени ресурсной перспективности с выделением локальных участков, на которых целесообразно сосредоточить дорогостоящие наземные работы вплоть до бурения, не тратя времени и средств на изучение всей территории.

Таким образом, несмотря на то что в настоящее время беспилотные технологии еще не заняли в России сколько-нибудь значимой доли рынка, авторы выражают уверенность в том, что полученные результаты свидетельствуют о возможности замещения существенной доли как наземных работ, так и классических аэросъемок беспилотными технологиями. Беспилотные геолого-геофизические методы следует рассматривать как реальный инструмент повышения эффективности геологических исследований. Значительным препятствием на пути повсеместного внедрения таких методов в практику геологической деятельности является слабо разработанная нормативная база применения БПЛА в России. Несмотря на это, авторы уверены, что беспилотные технологии уже в ближайшие годы существенно изменят отечественный рынок геологоразведки.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Анцев, В.Г. Применение магнитометрических систем на борту беспилотного летательного аппарата вертолетного типа для поиска и обнаружения магнитных аномалий / В.Г. Анцев, А.И. Маслова // Современные технологии в рудной и нефтяной геологоразведке, Шара-Тогот, 2016: <http://gis293.wixsite.com/vahromeev>.
2. Итоговое сравнение результатов беспилотных магнитометрических съемок комплексами ИНГГ СО РАН и ИРИНТУ-СибГеоТех // Матер. IV всерос. семинара им. Вахромеева «Современные технологии в рудной и нефтяной геологоразведке» // Шара-Тогот, 2016. tx (доступ на 07.04.2017)
3. Паршин, А.В. Экономичная технология беспилотной магниторазведки и ее апробация на рудопроявлениях Приольхонья / А.В. Паршин // Новое в познании процессов рудообразования. М.: ИГЕМ РАН, 2015. — С. 165–168.
4. Паршин, А.В. Низковысотная беспилотная аэромагниторазведка в решении задач крупномасштабного структурно-геологического картирования и поисков рудных месторождений в сложных ландшафтных условиях / А.В. Паршин, А.Е. Будяк, А.В. Блинов // География и природные ресурсы. Ч. 1. — М., 2016. — № 6. — С. 144–149. — Ч. 2. — С. 150–155.
5. Семенова, М.П. Перспективы развития беспилотной аэрогеофизики / М.П. Семенова, В.С. Цирель // Разведка и охрана недр. — 2016. — № 8. — С. 34–39.
6. Стратегия развития минерально-сырьевой базы Российской Федерации до 2030 года. / Проект. — М., 2016. — 27 с.
7. Фирсов, А.П. Применение высокочастотного магнитометра для легких БПЛА при геолого-геофизическом изучении трубков взрыва / А.П. Фирсов, И.Н. Злыгостев, П.Г. Дядьков и др. / Матер. конф. Интерэкспо-ГеоСибирь. — Новосибирск, 2015. — С. 299–304.
8. Цирель, В.С. Аэромагнитные съемки с беспилотных носителей — работы за рубежом и в России / В.С. Цирель, А.В. Титова, Е.В. Лавникова // Палеомагнетизм и магнетизм горных пород / Матер. междунар. школы-семинара / — СПб.: ИФЗ РАН, СПбГУ, 2016. — С. 154–160.
9. Черкасов, С.В. Использование БЛА для решения геологических задач. Аэромагнитная съемка / С.В. Черкасов, Б.В. Стерлигов, А.Е. Семенов // Матер. семинара «Применение технологии Геоскан для дистанционного зондирования земли и мониторинга объектов»,

2016. Электронный ресурс: <https://files.geoscan.aero/public/seminar/Cherkasov.pdf>.

10. Cunningham, M. Aeromagnetic surveying with unmanned aircraft systems / A thesis of Master of Science Diss / M. Cunningham — Canada, Ontario, 2016. — 144 p.

11. Parshin, A.V. Cost-saving low-altitude UAV magnetic survey technology and its GIS software / A.V. Parshin, V.S. Kanaikin, A.V. Blinov, A.O. Mikhalev // EAGE Geoinformatics. — 2016.

12. Pioneer Aerial Surveys UAV-MAG. The leader in Unmanned Geophysics Surveying / [http://pioneerairialsurveys.com/Pioneer\\_Aerial\\_Surveys\\_Promo\\_2017.pdf](http://pioneerairialsurveys.com/Pioneer_Aerial_Surveys_Promo_2017.pdf) (доступ на 07.04.2017)

© Паршин А.В., Цирель В.С., Анцев В.Г., 2017

Паршин Александр Вадимович // [sarhin@geo.istu.edu](mailto:sarhin@geo.istu.edu)  
Цирель Вадим Соломонович // [info@geolraz.com](mailto:info@geolraz.com)  
Анцев Василий Георгиевич // [ancev\\_vg@radar-mms.com](mailto:ancev_vg@radar-mms.com)

УДК 550.837

Давыдов В.А., Байдилов С.В., Астафьев П.Ф. (Институт геофизики УрО РАН им. Ю.П. Булашевича)

### ИЗУЧЕНИЕ ПОЛЯРИЗАЦИОННЫХ ЭФФЕКТОВ ИНДУКЦИОННЫМИ МЕТОДАМИ ЭЛЕКТРОРАЗВЕДКИ НА ПРИМЕРЕ ЧУСОВСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

*Проведено изучение электромагнитных параметров верхней части разреза над рудным телом Чусовского медно-колчеданного месторождения с помощью индукционной электроразведки. Различными методами выполнены профильные и площадные исследования электропроводности и частотной дисперсии рудной зоны месторождения. Проведенные работы показали принципиальную возможность обнаружения не выходящих на поверхность «слепых» колчеданных руд с помощью малоглубинных индукционных методов. **Ключевые слова:** вызванная поляризация, многочастотное индукционное профилирование, частотная дисперсия, кажущееся сопротивление, сульфидное месторождение.*

Davydov V.A., Baydikov S.V., Astafev P.F. (Senior researcher of the Geophysics Institute of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences)

### STUDY POLARIZATION EFFECTS THROUGH INDUCTION METHODS OF ELECTRICAL PROSPECTING ON THE EXAMPLE CHUSOVSKOY DEPOSIT

*The paper studied the electromagnetic parameters of the upper section of the ore body Chusovskoy massive sulphide deposit using electrical induction. Various methods are made profiled and area studies of electrical conductivity and the frequency dispersion of the ore deposit area. Past work has shown the fundamental possibility of detection is not coming to the surface of the «blind» massive sulphide ores using shallow induction methods. **Keywords:** induced polarization, multifrequency induction profiling, frequency dispersion, apparent resistivity, sulphide deposit.*

На основании изучения ряда Уральских колчеданных месторождений выяснено, что над «слепыми» рудными телами (не выходящими на поверхность) почти всегда имеется ореол слабой сульфидной минерализации. Он

может быть связан с присутствием аксессуарных сульфидных минералов во вмещающих породах либо с возникновением эпигенетического пирита в коре выветривания. ореол сульфидной минерализации может превышать в плане размеры основного рудного тела и приближаться к поверхности Земли вплоть до зоны аэрации. Так как сульфиды обладают повышенной поляризуемостью, то колчеданные руды должны выделяться электроразведочными методами, изучающими поляризационные эффекты, в том числе малоглубинными. Как известно, при пропускании через горную породу электрического тока происходит процесс вызванной поляризации (ВП). Интенсивность потенциалов вызванной поляризации принято выражать через параметр поляризуемости среды. При работах классическим методом ВП на постоянном токе поляризация проявляется в существовании на приемных электродах  $MN$  спадающего напряжения после выключения тока на питающих электродах  $AB$ . В качестве измеряемого параметра служит кажущаяся поляризуемость  $\eta$ , равная процентному соотношению разности потенциалов на приемных электродах через короткое время после отключения тока к напряжению на  $MN$  при пропускании тока. На переменном токе поляризуемость горных пород выражается в появлении частотной дисперсии (ЧД) электрического сопротивления и фазового сдвига между питающим током и измеряемым напряжением. Изучение низкочастотной дисперсии с использованием заземленных источников началось практически одновременно с исследованиями вызванной поляризации на постоянном токе. Позднее работы по обоснованию единой природы эффектов ЧД и ВП получили теоретическое и экспериментальное подтверждение [9]. Так, для вкрапленных руд колчеданных месторождений Урала были найдены корреляционные связи между классической кажущейся поляризуемостью, коэффициентом частотной дисперсии (КЧД) и тангенсом фазового угла комплексного сопротивления на частотах 3–150 Гц. Интервал частот, в котором проводились исследования, постоянно расширялся и в результате достиг диапазона от долей герц до десятков и сотен килогерц. При этом были выявлены несколько типов поляризации, возникающих при прохождении тока и отличающихся разным временем релаксации. Наиболее распространенные технологии ВП ориентированы на изучение низких частот (0,01–100 Гц) и связанных с ними электролитической и мембранной поляризации. Поляризация электроосмотического и миграционного (Максвелл-Вагнеровского) типа проявляется на более высоких частотах (0,1–1000 кГц) или ранней стадии ВП [8]. Эффекты ВП можно разделить по разной реакции на поляризацию тела по наблюдениям электрических и магнитных компонент поля [11]. При этом полезно использовать различные виды возбуждения электромагнитных полей: электрическую линию и вертикальный магнитный диполь (ВМД). Работы по использованию ВМД в качестве источника и приемника гармонических сигналов для изучения поляризационных эффектов ранее практически не проводились из-за отсутствия подходящей аппаратуры. В настоящее время

такая аппаратура имеется, и она может устранить пробел по изучению частотной дисперсии индукционными методами. В наших работах были использованы разные типы установок с электрическим и магнитным возбуждением поля как на низких, так и на высоких частотах.

Целью представленной статьи является исследование электромагнитных параметров верхней части разреза (ВЧР) над «слепым» рудным телом колчеданного месторождения индукционными электроразведочными методами. К задачам исследований относятся проведение профильных и площадных работ по изучению электропроводности и частотной дисперсии рудной зоны месторождения с помощью переменных электромагнитных полей контролируемых и естественных источников.

#### Методика исследований

Основной объем полевых работ выполнен методом дипольного электромагнитного профилирования (ДЭМП), проведенного индукционной аппаратурой МЧЗ-8 (ИГФ УрО РАН, г. Екатеринбург) на нескольких частотах. В состав аппаратуры входит генератор переменного тока с рамочным излучателем электромагнитного поля и измерительный блок с чувствительным приемником индукционного типа. Аппаратура позволяет выполнять измерения вертикальной  $H_z$  и горизонтальных  $H_r$ ,  $H_\phi$  составляющих переменного магнитного поля или большой  $H_a$  и малой  $H_b$  осей эллипса поляризации [1]. В аппаратуре МЧЗ-8 реализована возможность автоматической установки частоты генератора с пульта приемника с помощью радиоканала, построенного на базе радиостанции Motorola GP340 UHF. Оператор с пульта приемника задает желаемый набор частот и количество измерений при разной ориентировке датчиков. После этого в автоматическом режиме происходит последовательное измерение и запись результатов на всех заданных частотах и положениях датчика. Служебная информация и результаты текущих измерений выводятся на двухстрочный жидкокристаллический дисплей. По окончании работ данные в виде файла можно переписать в компьютер по интерфейсу RS-232 или USB. Аппаратура имеет 8 рабочих частот; исследовательские работы проводились на четырех из них: 10, 20, 40 и 80 кГц. Технология измерений заключалась в регистрации двух взаимно перпендикулярных компонент переменного магнитного поля ( $H_z$  и  $H_r$ ), по которым рассчитывалось кажущееся сопротивление по формуле для низкочастотной асимптотики [2]:

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

где:  $D$  — нормирующий параметр, зависящий от волнового числа;  $f$  — рабочая частота, Гц;  $r$  — расстояние между генератором и приемником, км.

Затем высчитывался коэффициент частотной дисперсии (КЧД) для различных пар частот по общей формуле с логарифмической нормализацией значений:

$$\text{КЧД} = (\rho_k^{\text{НЧ}} - \rho_k^{\text{ВЧ}}) / (\rho_k^{\text{НЧ}} \times \ln(f^{\text{ВЧ}} / f^{\text{НЧ}})),$$

где:  $\rho_k^{\text{НЧ}}$  — кажущееся сопротивление на низкой частоте;  $\rho_k^{\text{ВЧ}}$  — кажущееся сопротивление на высокой частоте;  $f^{\text{НЧ}}$  — низкая частота;  $f^{\text{ВЧ}}$  — высокая частота.

Профилирование по площади работ проводилось при расстоянии между источником и приемником 20 и 40 м с шагом 10 м, точка записи отнесена к месту расположения приемника. Эффективная глубина исследований методом ДЭМП принимается равной четверти разности. Погрешность полевых наблюдений составила менее 5 %.

Метод радиокомпарации и пеленгации (радиокип) с измерением магнитных компонент полей сверхдлинноволновых радиостанций (СДВР) применялся для изучения электропроводности верхней части разреза. За рубежом данный вариант известен как метод VLF-EM (Very Low Frequency ElectroMagnetic). При работах методом радиокип использовались сигналы станций радиотехнической системы дальней навигации РСДН-20 «Альфа». Для работы был применен двухканальный универсальный приемник ОМАР-2м [4]. С помощью малогабаритных датчиков РМД измерялись две ортогональные составляющие переменного магнитного поля — поперечная ( $H_\phi$ ) и вертикальная ( $H_z$ ). Датчики РМД чувствительностью 80 В/(А/м) состоят из многовитковых катушек с ферритовыми сердечниками, настроенных в резонанс на рабочую частоту радиостанции 12,65 кГц. Усиленные и отфильтрованные сигналы с датчиков записывались в цифровой регистратор. В камеральных условиях данные переписывались в компьютер и обрабатывались в специальной программе с целью улучшения соотношения сигнал/шум, а затем подвергались быстрому преобразованию Фурье (БПФ) в скользящем окне с накоплением. Спектральные отношения амплитуд сигналов  $H_z/H_\phi$  на рабочей частоте служат мерой электропроводности ВЧР. Эффективная глубина проникновения электромагнитного поля определяется скин-слоем и зависит от частоты и удельного электрического сопротивления (УЭС) среды. Для частоты радиостанции 12,65 кГц и величине УЭС вмещающих пород в диапазоне 100–250 Ом·м глубина исследований радиокип будет находиться в пределах 30–50 м. Конечным результатом съемки является карта отношений магнитных компонент  $H_z/H_\phi$  СДВР, по которой определяется присутствие и местоположение хорошо проводящих объектов на участке работ.

Ранее в Институте геофизики УрО РАН были получены положительные результаты измерения импеданса техногенного электромагнитного поля (ТЭМП) для изучения электрических свойств разреза [12]. В дальнейшем использовалась похожая методика работ, применяемая обычно в методах изучения естественных магнитотеллурических полей. С помощью аппаратуры ЭРА-МАКС (НПП «ЭРА», г. Санкт-Петербург) осуществлялись полевые наблюдения за электрическими и магнитными компонентами ТЭМП на частотах 50 и 100 Гц на фиксированном расстоянии от действующей линии электропередачи (ЛЭП). При этом измерялись электрическая составляющая  $E_x$  заземленной линии, расположенной параллельно ЛЭП, и поперечная ей горизонтальная магнитная составляющая  $H_y$ . В качестве магнитоприемника выступал резонансный магнитный датчик РМД-6ч, настроенный на первые две промышленные гармоники.

Основной параметр, рассчитываемый в результате проведения данных работ, — это входное сопротивление среды или импеданс, равный отношению ортогональных компонент электрического и магнитного полей:  $Z = E_x/H_y$ . В общем случае для определения импеданса используется следующая формула:

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

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 используется формула, полученная для импедансных измерений в ближней зоне источника электромагнитных сигналов:

$$\rho_k = Z \cdot r / 4,$$

где  $r$  — расстояние между ЛЭП и измерительной установкой.

Из-за скачков нагрузки в ЛЭП и сильной нестациональности техногенного поля погрешность полевых измерений составила более 10 %. Коэффициент частотной дисперсии для промышленных гармоник 50 и 100 Гц рассчитывался таким же образом, что и для ДЭМП (см. формулу КЧД). В качестве дополнительных параметров поляризуемости разреза выступили отношения модулей магнитных компонент гармоник ТЭМП: вертикальных  $H_z^{100 \text{ Гц}} / H_z^{50 \text{ Гц}}$  и горизонтальных  $H_\phi^{100 \text{ Гц}} / H_\phi^{50 \text{ Гц}}$ . Изучение характеристик техногенного электромагнитного поля было выполнено только в пределах параметрического профиля ПРЗ.

Аудиомагнитотеллурические зондирования (АМТЗ) проводились с помощью уже упомянутой двухканальной приемно-регистрирующей аппаратуры «ОМАР-2м», обеспечивающей усиление, аналого-цифровое преобразование и запись широкополосных геофизических сигналов в реальном масштабе времени. Измерения велись в частотном диапазоне 100–15000 Гц экспресс-методом на стелющуюся незаземленную линию вдоль профиля ( $E_y$ ) и магнитную антенну ( $H_x$ ), располагающуюся поперек профиля [5]. Электрическая стелющаяся антенна составляла в длину 10 м; в качестве магнитной антенны использовался активный датчик индукционного типа АМД-5 с линеаризованной амплитудно-частотной характеристикой [6].

Камеральная обработка аудиомагнитотеллурических данных включала:

- фильтрацию промышленных помех;
- получение частотных спектров сигналов с помощью БПФ;
- восстановление истинных амплитуд с учетом калибровки измерительных каналов;
- расчет продольного импеданса среды  $Z = E_y / H_x$ ;
- расчет кажущегося сопротивления (КС):  $\rho_k = |Z|^2 / 2\omega \cdot f \cdot \mu_0$ , где:  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м — магнитная проницаемость воздуха;
- получение частотного псевдоразреза  $\rho_k(f)$ ;

трансформацию частотной зависимости  $\rho_k(f)$  в глубинный разрез КС  $\rho_k(h)$  с помощью оригинального способа преобразования АМТ данных с учетом априорной информации [3];

пересчет и построение глубинного разреза кажущейся продольной проводимости  $S_k(h)$ .

Аудиомагнитотеллурические зондирования проводятся по профилю, проходящему над центром рудной зоны, вкrest простирания основных структур. Результаты АМТЗ представлены в виде трансформированных глубинных разрезов кажущихся сопротивлений и продольной проводимости.

#### Краткая характеристика объекта

Чусовское медно-колчеданное месторождение расположено в Полевском районе Свердловской области. Прилегающая территория охватывает зону сочленения южной части Тагильского прогиба с западной границей Восточно-Уральского поднятия. Граница между указанными структурами первого порядка проходит по Дегтярскому сдвигу. Чусовское месторождение располагается в пределах Полевской мегасинклинали и приурочено к меридионально вытянутой Чусовско-Поварнинской зоне метаморфических сланцев, залегающих среди зеленокаменных пород (альбитофиры, порфиroidы, серпентиниты) венлокского возраста ( $S_1-w$ ). Месторождение представлено системой жиллообразных тел, сложенных густыми вкрапленниками с линзами и прожилками сплошных колчеданов кулисообразного, параллельного или четкообразного залегания согласно сланцеватости метаморфических сланцев. Рудоносная зона не имеет выхода на поверхность («слепое» тело) и располагается на глубине от 50 до 300 м. Основное рудное тело сравнительно небольших размеров (до 100–200 м по падению и мощностью до 10 м) имеет меридиональное простирание и крутое ( $60-70^\circ$ ) восточное падение.

Вследствие небольшого размера и значительной глубины залегания Чусовское месторождение не разрабатывалось, однако на нем проведен большой объем разведочного бурения. Повсеместно был выполнен стандартный каротаж, а для изучения глубинного строения рудной зоны на многих скважинах опробовались специальные методы геофизических исследований [10]. По данным электрокаротажа скважин удельное электрическое сопротивление (УЭС) пород меняется в широких пределах. УЭС зеленокаменных пород колеблется от 2000 до 10000 Ом·м. Полоса метаморфических сланцев выделяется пониженными сопротивлениями от 300 до 1500 Ом·м. Более низким сопротивлением (50–300 Ом·м) характеризуются зоны метаморфических сланцев, обогащенных сульфидами, а также зоны развития наносов (10–20 Ом·м). УЭС рудных зон составляет от 10 до 100 Ом·м. Удельное сопротивление сплошных колчеданов менее 1 Ом·м. В течение длительного времени месторождение служило и продолжает

служить в качестве контрольного полигона для опытно-методических и научных работ. Территория участка расположена в долине р. Западная Чусовая и характеризуется заметными изменениями мощности рыхлых отложений от 0,5–1 м в южной части до 5–10 м на севере.

#### Результаты работ

Площадные электрометрические работы проводились по системе меридиональных профилей, размеченных параллельно расположенной рядом ЛЭП, чтобы влияние помех было одинаковым для всех точек, располагающихся на одном профиле. Расстояние между профилями — 20 м, профиль ПР4 расположен по оси ЛЭП, поэтому на нем измерения не проводились. Два отдельных профиля проложены в широтном направлении (по линии пикетов ПК4 и ПК6), пересекая рудное тело вкrest его простирания. Методом радиокип СДВР измерения проведены на 9 профилях (7 меридиональных и 2 широтных), многочастотные ДЭМП выполнены в центральной части рудной зоны по четырем профилям (ПР0–ПР3). Площадная съемка радиокип СДВР с измерением магнитных составляющих (VLF-EM) выявила обширную проводящую зону, сопоставимую с областью окolorудных гидротермальных изменений. Максимальные значения отношений  $H_z/H_\varphi$  располагаются на местности внутри треугольника, образованного скважинами С-2068, С-2064 и С-2512 (рис. 1).

Все эти скважины подсекли рудное тело на разных глубинах; скважины, пробуренные западнее профиля ПР0, оруденения не встретили. Строение минерализованных зон было детально изучено следующими методами геофизических исследований скважин (ГИС): кажущегося сопротивления (КС), межскважинной электрической корреляции (МЭК), радиоволнового просвечивания (РВП), дипольного электромагнитного профилирования, переходных процес-

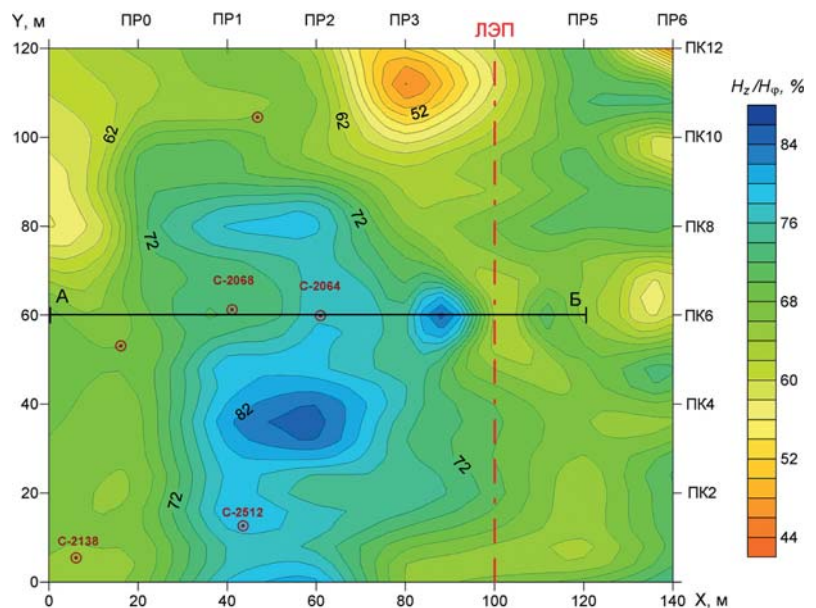
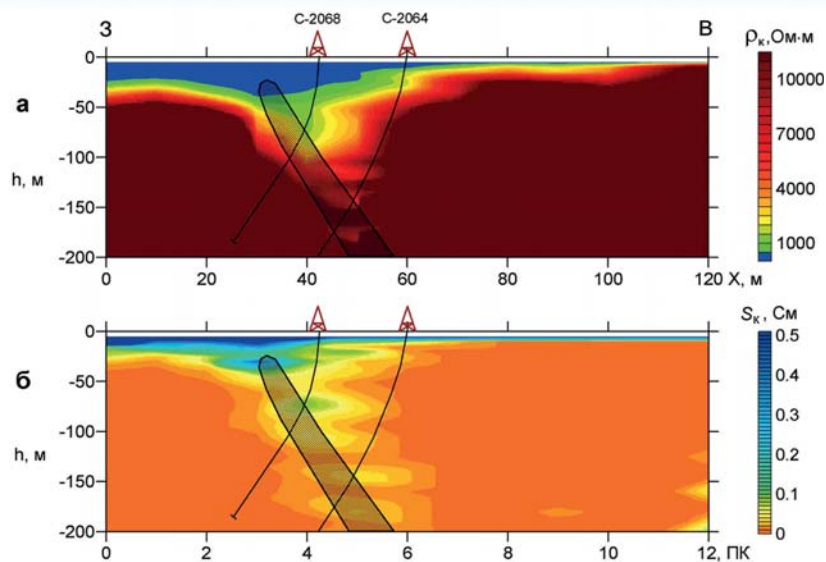


Рис. 1. Карта площадной съемки отношений магнитных компонент сигналов СДВР частотой 12,65 кГц на территории Чусовского месторождения. Линия АБ — профиль АМТЗ. Значками отмечены пробуренные разведочные скважины

сов и методом заряда [7]. В результате проведенных ГИС форма и положение рудного тела известны достаточно хорошо. Для колчеданных месторождений Среднего Урала характерно их расположение среди кварцево-серицитовых сланцев с зоной интенсивного окварцевания над рудными телами. На местности они часто приурочены к положительным формам рельефа, а электрические сопротивления ВЧР имеют повышенные значения. При выполнении поисково-оценочных работ было выяснено, что большинство колчеданных месторождений Дегтярско-Полевского района залегают в довольно высокоомных породах (до 10000–15000 Ом·м), а гидротермальные изменения вблизи рудных зон характеризуются понижениями УЭС в несколько раз. Это подтверждается проведенными наземными аудиоманнитотеллурическими экспресс-зондированиями, хорошо отбившими местоположение и характер залегания рудного тела (рис. 2).

Ранее, при обработке метода КС на Чусовском месторождении было установлено пропорциональное уменьшение сопротивления при приближении к рудному телу. При этом сопротивления горных пород с сульфидной минерализацией изменяются от единиц Ом·м (руда) до 1000 Ом·м (гидротермально-измененные породы обрамления). Снижение УЭС наблюдается более чем за 100 м от рудного тела, а величина 3000 Ом·м считается границей, за которой оруденение маловероятно. Полученная закономерность позволяет установить границы гидротермально-измененных пород, в которых возможно обнаружение рудного тела. Как видно из приведенных примеров, традиционная электротометрия, ориентированная на обнаружение проводящих объектов, вполне справляется с разведкой колчеданных месторождений, если она обладает достаточной глубиной исследования. Однако широко распространенные методы электроразведки, такие как методы сопротивлений, обладают невысокой разрешающей способностью при изучении глубоких горизонтов. При этом шаг поисковых работ может превышать размеры рудных тел, поэтому для обнаружения небольших колчеданных месторождений необходимы более детальные и производительные методы исследований.

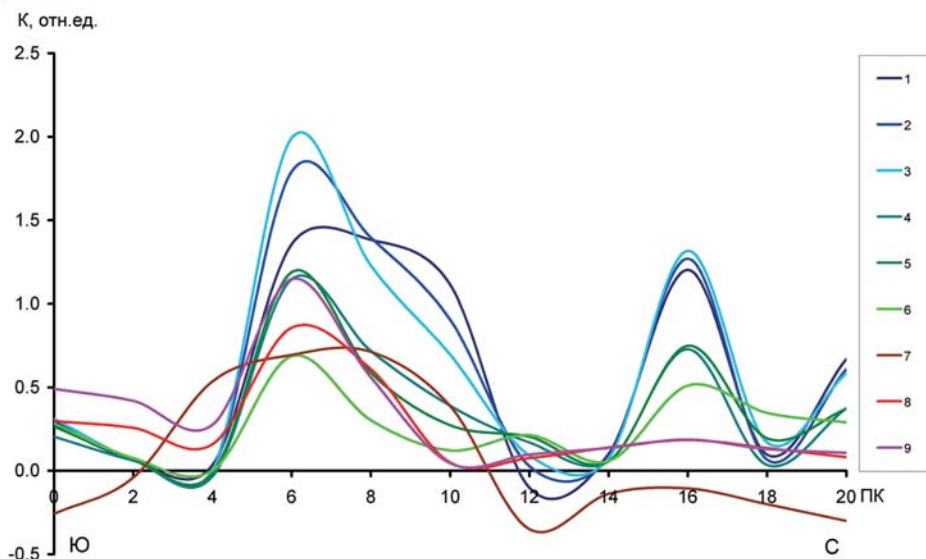
Изучение частотной дисперсии на Чусовском месторождении началось с опытно-методических работ. На параметрическом профиле ПРЗ было проведено многочастотное дипольное электромагнитное (индукционное) профилирование на частотах 10, 20, 40 и 80 кГц. Одновременно были выполнены импедансные измерения на двух гармониках ТЭМП (50 и 100 Гц). Начальные параметры измерительных установок были выбраны таким образом, чтобы эффективная глубина проникновения электромагнитного поля составляла около 5 м. Это глубже зоны аэрации, где основные поляризующиеся минералы окислены, но недостаточно



**Рис. 2. Трансформированные глубинные разрезы аудиоманнитотеллурических параметров на территории Чусовского месторождения (по линии АБ): а) разрез кажущегося сопротивления; б) разрез продольной проводимости. На разрезах штриховкой показан контур рудного тела по результатам комплексных геологоразведочных работ**

глубоко, чтобы получить отклик от собственно рудного тела. Таким образом, проводилось изучение области возможного ореола сульфидной минерализации над колчеданным месторождением. Значения кажущихся сопротивлений по данным ДЭМП и ТЭМП довольно ощутимо зависят от частоты. Если спроектировать контуры рудного тела на профиль наблюдений, то оно будет находиться в интервале пикетов ПК4-8. В этом же диапазоне заметны максимальные различия в значениях сопротивлений на разных частотах. Наиболее наглядно аномальный эффект выглядит на графиках рассчитанных нормированных коэффициентов частотной дисперсии (КЧД) и отношений магнитных компонент гармоник ТЭМП (рис. 3).

Аномалия коэффициента частотной дисперсии, вычисленная по импедансам гармоник ТЭМП, имеет над рудной зоной положительный знак, характерный для электролитического типа поляризации. Отрицательные значения коэффициента, полученные за пределами аномалии, связаны с индукционными наводками ЛЭП. Аномалии ЧД индукционного профилирования напротив получились отрицательными по величине, что согласуется со знаком Максвелл-Вагнеровской поляризации, проявляющейся в этом частотном диапазоне. Для удобства в сопоставлении графиков значения КЧД ДЭМП были инвертированы (рис. 3). Зона аномальной частотной дисперсии шире рудного интервала и немного смещена (ПК5-11), однако максимальные (по амплитуде) КЧД наблюдаются непосредственно над центром рудного тела (ПК 6-7). На интервале ПК15-17 фиксируется аномалия ДЭМП от лежащей на земле железобетонной опоры, по результатам измерений ТЭМП — ложная аномалия отсутствует. Параметры частотной дисперсии, изучаемые с помощью техногенного поля (КЧД и отношения магнитных компонент двух гармоник), выглядят более убедительно, однако метод



**Рис. 3. Графики, характеризующие поляризационные свойства разреза на параметрическом профиле Чусовского месторождения.** Инвертированные коэффициенты частотной дисперсии ДЭМП при разносо 20 м на разных парах частот: 10–80 кГц (1); 20–80 кГц (2); 40–80 кГц (3); 10–40 кГц (4); 20–40 кГц (5); 10–20 кГц (6); параметры ТЭМП: КЧД для гармоник 50 и 100 Гц (7); отношения магнитных компонент  $0,1 \times |H_z^{100 \text{ Гц}} / H_z^{50 \text{ Гц}}|$  (8);  $0,1 \times |H_\phi^{100 \text{ Гц}} / H_\phi^{50 \text{ Гц}}|$  (9)

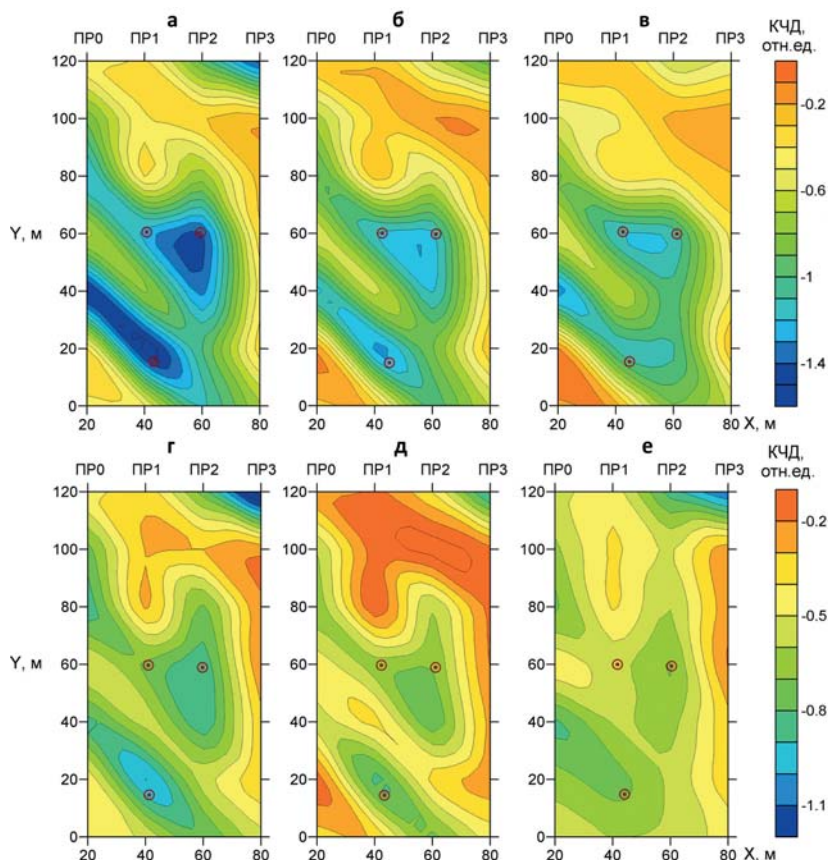
ТЭМП нельзя использовать при площадном изучении месторождения из-за различия эффективных глубин исследований на разных удалениях от ЛЭП. Это касается случаев измерений ТЭМП в ближней зоне источника индустриального поля. На большом удалении от ЛЭП, когда электромагнитную волну можно считать плоской, площадное изучение ЧД по промышленным гармоникам также невозможно. Это обусловлено скин-эффектом, за счет которого при изменении частоты сигнала происходит изменение эффективной глубины проникновения электромагнитного поля (режим зондирования). Следовательно, многочастотное (как минимум двухчастотное) электропрофилирование с фиксированным разносом практически безальтернативно при площадном изучении ЧД.

Многочастотные площадные измерения ДЭМП были проведены на двух разносах: 20 и 40 м. Эффективная глубина исследования при разносо 20 м составляет 5 м, при разносо 40 м — порядка 10 м. В целом результаты схожи между собой, максимальные значения КЧД на разносо 20 м несколько выше, зато контрастность и местоположение аномалий лучше выглядят при разносо 40 м (рис. 4).

В зависимости от пар применяемых частот аномальные зоны испытывают смещения, но все же тяготеют к рудному контуру. Амплитуды аномалий закономерно уменьшаются при общем снижении частоты и при меньшей разнице частот. Соответственно этому наиболее информативной парой частот признаны мини-

мальная (10 кГц) и максимальная (80 кГц) измеряемые частоты. Аномалия частотной дисперсии в этом случае располагается по центру рудной зоны, диапазон изменений КЧД в относительных единицах составляет от  $-0,1$  до  $-1,5$ . По форме аномалии заметно, что она состоит из двух частей, вытянутых с СЗ на ЮВ. Это согласуется с элементами залегания рудной зоны, выявленных с помощью бурения и каротажа скважин. На полученных планах заметно, что в районе скважин, подсекших руду, наблюдаются и максимальные значения КЧД независимо от используемых частот (рис. 4). Поскольку при увеличении разности абсолютная амплитуда КЧД снижается, складывается впечатление, что поляризационный эффект проявляется интен-

сивней при приближении к поверхности земли. Учитывая, что в зоне аэрации сульфиды разлагаются за счет окисления можно предположить, что максимальные концентрации пирита приурочены к восстанови-



**Рис. 4. Коэффициенты частотной дисперсии (КЧД) при разносо 40 м на разных парах частот: а) 10–80 кГц; б) 20–80 кГц; в) 40–80 кГц; г) 10–40 кГц; д) 20–40 кГц; е) 10–20 кГц. Значками отмечены разведочные скважины, прошедшие через рудное тело**

тельной обстановке на глубине приблизительно в 4–5 м. Возможно, здесь располагается геохимический барьер, приуроченный к грунтовым водам, где происходит вторичное сульфидное обогащение.

#### Выводы

Проведенные исследования показали принципиальную возможность обнаружения не выходящих на поверхность «слепых» колчеданных руд с помощью индукционных электроразведочных методов, таких как дипольное электромагнитное профилирование (ДЭМП) и метод техногенного электромагнитного поля (ТЭМП). Ореол слабой сульфидной минерализации, обрамляющий рудное тело и достигающий верхней части разреза, можно обнаружить по поляризационным эффектам, в частности, по аномалиям частотной дисперсии электрического сопротивления. Изучение частотной дисперсии по гармоникам ТЭМП возможно только в профильном варианте, в ближней зоне источника индустриального поля, например, вблизи линий электропередачи.

Исследования поляризуемости геологических объектов с помощью ДЭМП можно проводить как по отдельным профилям, так и в площадном варианте. Съёмку рекомендуется вести на двух частотах, отличающихся приблизительно на порядок, при фиксированном расстоянии между питающим и приемным диполями в 20–40 м.

*Работа выполнена при поддержке программы фундаментальных исследований УрО РАН, проекты №15-2-5-31 и №15-11-5-13. Авторы выражают благодарность сотрудникам Института геофизики УрО РАН — Горшкову В.Ю., Маликову А.В. и Арзамасцеву Е.В., принимавшим участие в полевых работах.*

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Байдинов, С.В. Аппаратура для высокочастотных индукционных зондирований МЧЗ-8 / С.В. Байдинов, А.И. Человечков // Уральский Геофизический Вестник. — 2011. — № 1. — С. 4–8.

2. Вешев, А.В. Электромагнитное профилирование / А.В. Вешев, В.Г. Ивочкин, Г.Ф. Игнатъев — Л.: Недра, 1971. — 216 с.
3. Давыдов, В.А. Способ преобразования аудиоманнитотеллурических данных с учетом априорной информации / В.А. Давыдов // Геофизические исследования. — 2016 — Т. 17. — № 4. — С. 57–66.
4. Давыдов, В.А. Измерительная аппаратура ОМАР-2 для электромагнитных методов исследований / В.А. Давыдов // Уральский геофизический вестник. — 2015. — № 1 (25). — С. 37–41.
5. Давыдов, В.А. Аудиоманнитотеллурическая съёмка в движении / В.А. Давыдов // Геофизика. — 2014а. — № 2. — С. 47–53.
6. Давыдов, В.А. Эквивалентные схемы и основные характеристики различных датчиков электромагнитных сигналов в широкой полосе частот / В.А. Давыдов // Уральский геофизический вестник. — 2014б. — № 1 (23). — С. 46–54.
7. Ермаков, Н.П. Поиски глубокозалегающих месторождений железа, меди и бокситов на Урале с применением комплекса геофизических методов / Н.П. Ермаков, З.Я. Сегаль, И.М. Пильник, В.В. Бояринков, В.К. Бабенков // Строение и развитие земной коры и структур рудных полей Урала по геофизическим данным. — Свердловск: УНЦ АН СССР, 1976. — С. 62–69.
8. Задорожная, В.Ю. Поляризационные свойства осадочных горных пород и руд: физические процессы, математическое моделирование и лабораторные измерения / В.Ю. Задорожная // Матер. пятой всероссийской школы-семинара им. М.Н. Бердичевского и Л.Л. Ванына по электромагнитным зондированиям Земли — ЭМЗ-2011. В 2-х книгах. Книга 2. — СПб: СПбГУ, 2011. — С. 256–259.
9. Кормильцев, В.В. Электроразведка в поляризующихся средах / В.В. Кормильцев, А.Н. Мезенцев. — Свердловск: УрО АН СССР, 1989. — 128 с.
10. Родионов, П.Ф. Сравнительная характеристика методов скважинной электроразведки (по материалам Чусовского колчеданного месторождения) / П.Ф. Родионов, С.А. Жданов, А.А. Кожевников, И.И. Кононенко / Теория и практика электрометрии. — Свердловск: УНЦ АН СССР, 1972. — С. 164–176.
11. Светов, Б.С. О связи феноменологического описания вызванной поляризации среды с происходящими в ней физическими процессами. Постановка вопроса / Б.С. Светов, В.В. Агеев, О.А. Агеева, С.Д. Каринский // Геофизика. — 2011. — № 4. — С. 25–29.
12. Титлинов, В.С. О возможности использования полей-гармоник 50-периодного тока промышленных ЛЭП в многочастотной электроразведке / В.С. Титлинов // Теория и практика электромагнитных методов геофизических исследований: Сб. науч. трудов. — Екатеринбург: Наука. Уральское отд-е, 1992. — С. 64–77.

© Давыдов В.А., Байдинов С.В., Астафьев П.Ф., 2017

Давыдов Вадим Анатольевич // davyde@yandex.ru  
Байдинов Сергей Владимирович // badikek@mail.ru  
Астафьев Павел Федорович // pashaek@mail.ru

## ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИЯ

УДК 622.7

Иванова М.В., Броницкая Е.С., Соколов С.В. (ФГБУ «ВИМС»), Газалеева Г.И. (ОАО «Уралмеханобр»)

### ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИИ ОБОГАЩЕНИЯ ТОНКОВКРАПЛЕННЫХ РЕДКОМЕТАЛЛЬНЫХ РУД С ПРИМЕНЕНИЕМ СОВРЕМЕННОГО ОБОРУДОВАНИЯ РАЗЛИЧНОГО ПРИНЦИПА ДЕЙСТВИЯ

*Показана эффективность применения комплекса современного оборудования как в процессе рудоподготовки, так и при гравитационно-магнитном обогащении тонковкрапленных редкометалльных руд. Установлено влияние содержания тонкозернистых фракций на возмож-*

*ность получения танталового концентрата. Ключевые слова: редкометалльные руды, селективная рудоподготовка, гравитационно-магнитное обогащение, современное оборудование, танталовый концентрат.*

Ivanova M.V., Bronitskaya E.S., Sokolov S.V. (VIMS), Gazaleeva G.I. (Uralmehanoobr)

### OPTIMIZATION OF TECHNOLOGY OF ENRICHMENT OF RARE-METAL ORES WITH THE APPLICATION OF MODERN EQUIPMENT OF VARIOUS PRINCIPLE OF ACTION

*The efficiency of using a complex of modern equipment in the process of ore preparation and in the gravitational-magnetic enrichment of finely-grained rare-metal ores has been shown. The influence of the content of fine-grained fractions on the*