

Предпосылки успешного применения простых методов электрометрии при поисках глубокозалегающих колчеданных месторождений

Вадим Михайлович САПОЖНИКОВ*

Уральский государственный горный университет, Россия, Екатеринбург

Актуальность работы определяется потребностью использования позитивного опыта поисков и разведки медноколчеданных руд в условиях, когда расширение сырьевой базы междурудной промышленности Урала возможно за счет обнаружения крупных скоплений руд на достаточно больших глубинах. Трудности поисков таких объектов связаны с их слабой проявленностью по всему комплексу геолого-геофизических свойств, и успех может быть получен при последовательном использовании серии косвенных признаков. Наиболее реально можно рассчитывать на выявление крупных рудных залежей при их пологом залегании. Главным объектом исследований должны являться потенциально рудоносные по геолого-геофизическим признакам палеовулканические постройки, а в их пределах – известные и новые рудные поля. На стадии изучения этих построек наиболее оправдано применение простых глубинных методов наземной и скважинной электрометрии.

Целью работы является демонстрация теоретических и практических предпосылок применения простых методов электрометрии, позволяющих последовательно выявлять признаки проявления главных рудоформирующих элементов рудоносных структур, по совокупности которых и можно обнаруживать отдельные рудные залежи и месторождение в целом. Рассматриваются примеры применения методов электропрофилирования, изучения векторов градиента электропроводности, метода мелкомасштабного заряда с выделением аномального поля, скважинной уравниваемой установки, геоэлектрического моделирования разрезов по данным электрокаротажа.

Результаты, полученные при применении простых методов электрометрии на конкретных южноуральских медноколчеданных месторождениях, позволяют продемонстрировать примеры получения поисково-разведочной информации о существовании рудоносных структур и проявлении их отдельных элементов.

Ключевые слова: рудное поле, рудоформирующие элементы рудоносных структур, скважинная электроразведка, аномалия.

Введение
Существует объективная необходимость увеличивать глубину поисковых работ на колчеданное рудное поле. Одним из факторов, позволяющих надеяться на успешное решение этой задачи, может стать обобщение опыта уже проведенных исследований в условиях, приближенных к тем, в которых предполагаются поиски. Естественно, что на больших глубинах интерес представляют крупные объекты, разработка которых окажется рентабельной.

Исходя из теоретических и практических предпосылок, наиболее реально можно рассчитывать на обнаружение относительно пологозалегающих рудных залежей. Признаки их присутствия проявлены обычно слабо, и поэтому вероятность того, что подобные образования еще не выявлены, вполне реальна. Наиболее перспективны поиски глубокозалегающих крупных колчеданных месторождений на Южном и Северном Урале, где мало развиты рудоносные зоны смятия.

Имея в виду положительный опыт поисковых работ на колчеданы, частично обобщенный в монографиях [1–5] и других публикациях, целесообразно обратить внимание на основные геофизические признаки искомым объектов, ориентировка на которые может оказаться полезной. Для этого полезно обратиться к некоторым геологическим и геофизическим моделям, позволяющим подчеркнуть предпосылки решения тех или иных поисковых задач.

Рудоформирующие элементы рудоносных структур

Сразу следует подчеркнуть, что главным объектом исследований должны стать не отдельные рудные тела, а как уже частично разведанные, так и еще не выявленные корневые рудные поля. Известно, что это системы генетически и пространственно связанных рудных и магматических тел, имеющих общие корни. Главные элементы этих сред: источники рудоносных флюидов, каналы для их перемещения, геологические, тектонофизические и петрофизические обстановки, в которых образуются рудные скопления. Очевидно, что проявлению этих рудоформирующих элементов в геофизических полях должно быть уделено основное внимание.

Колчеданные месторождения, как правило, располагаются в пределах палеовулканических построек (рис. 1, а, б). Это могут быть вулканокупольные структуры, в которых рудное поле занимает некоторый объем вулканической постройки. Рудоносны бывают также вулcano-тектонические депрессии, обрамленные вулканическими куполами основного или кислого состава. Наиболее часто колчеданные месторождения связаны с образованием кислых эффузивно-экструзивных построек.

Рудоформирующие элементы дифференцируются по физико-механическим характеристикам, а состав горных пород структурных элементов при этом отступает на второй план. Это относится как к рудоконтролирующим (долгоживущие глубинные разломы), рудоподводящим (приоткрытые участки глубинных разломов) и рудораспределяющим (системы трещин, оперяющие рудоподводящие разломы) каналам, так и к элементам структуры, оказывающим непосредственное влияние на формирование рудных скоплений. К последним относятся рудо локализирующие (ореолы метасоматитов, развивающихся по зонам дробления, телам брекчий и пластам пористых пород) и рудоограничивающие (непроницаемые пласты и тела малых интрузий, участки сжатия или смещения слоев, тела, создающие механические, тепловые, химические и другие типы барьеров). Принципиальная схема пространственного положения скрытого колчеданного оруденения показана на рис. 1, в.

Обращаясь к упрощенным моделям палеовулканической постройки (рис. 1, а, б), видим, что это сооружение представляет нагромождение разнообразных вулканических продуктов, местами перекрытых вулcanoгенно-осадочными породами. Часто постройка бывает разрушена, и породы ее основания обнаруживаются только на периферии палеовулкана. При проседании центральной части вулканов возникают вулcano-депрессивные постройки с крупными кальдерами, заполненными более молодыми вулканитами. На завершающей стадии развития вулcano-магматической

* vmsap@mail.ru

 <https://orcid.org/0000-0002-9665-5778>

системы в ранее сформированную среду внедряются тела малых интрузивных (субвулканических) тел и происходят инъекции активных газов и растворов с образованием ореолов гидротермально-метасоматически измененных и местами минерализованных вулканитов, а также рудных скоплений. Совокупность этих образований и формирует рудное поле, в структуре которого могут быть выделены главные рудоформирующие элементы.

Все рудоформирующие элементы отличаются аномальными физическими свойствами, в первую очередь по плотности и электропроводности. Сконцентрировав внимание на вулканогенных породах, отметим, что по значениям средней плотности для ряда из пород основного состава, кислого состава, метасоматически измененных и сплошных руд характерны соответственно средние значения 2, 8, 2, 64, 2,5 и 4,2 г/см³ [1]. Очевидно, что существуют благоприятные предпосылки для выделения и разделения приблизительно однородных и достаточно крупных тел или участков вулканических построек, сформированных этими породами по данным гравиразведки.

Наиболее дифференцированы вулканогенно-плутонические породы по электропроводности. Это связано с сильной зависимостью удельного сопротивления горных пород от пористости, сульфидной минерализации и состава подземных вод. Например, увеличение коэффициента пористости породы от 1 до 2 % и повышение минерализации присутствующей в порах воды в 2 раза (что происходит при слабом метасоматозе), практически не влияющие на другие физические свойства и почти незаметные визуально, приводят к уменьшению удельного сопротивления в 8 раз. Поэтому статистические исследования электропроводности на крупных колчеданных месторождениях Урала, по данным электрокаротажа, доказали существование предпосылок для детального картирования рудовмещающих горных пород с выявлением характерной зональности по данным электрометрии. На основе разделения пород на статистически однородные группы установлены их модальные значения по удельному сопротивлению в тысячах Ом × м [6, 7]. Для условно обозначенных по степени изменения (и.) групп пород типичны следующие значения: минерализованные и измененные (0,15), сильно измененные (0,37), средне измененные (1,1), слабо измененные (2,7), неизмененные (8). Показательны осредненные характеристики доли присутствия каждой группы пород в разведанных блоках крупных месторождений. Для перечисленных групп пород эти доли соответственно равны, %: 6, 7, 12, 26 и 46. Доля сплошных достаточно глубоко залегающих руд с удельным сопротивлением меньше 1 Ом × м оценивается величиной около 3 %. Следует подчеркнуть, что осреднение значений в выбранных для изучения интервалах поисково-разведочных скважин не проводилось и исходной моделью реальных геологических тел была двухкомпонентная среда, отражающая избирательность происходивших процессов рудогенеза [6].

Как видим, в пределах рудоносных вулканогенных структур, вмещающих известные колчеданные месторождения, существуют достаточно крупные образования со следами окolorудных изменений (в продуктивных поисковых массивах приблизительно 25 % объема) с аномальными свойствами по плотности и электропроводности. Они значительно превосходят по размерам рудные залежи и являются важным поисковым объектом как индикатор месторождений.

Для рудных полей характерна закономерная зональность. Она проявляется по ряду признаков: минералогических, геохимических, физико-механических и др. Существует зональность также по плотности и электропроводности, что следует учитывать при поисковых работах.

Модели, иллюстрирующие проявление рудоформирующих элементов в аномальных геофизических полях

В окрестностях рудных скоплений с максимальной плотностью вмещающие их породы обычно насыщены сульфидами и имеют хотя и меньшую, но все же повышенную плотность по сравнению с неизменной средой. Следовательно, эти образования усиливают положительную аномальную составляющую гравитационного поля Δg_a от рудных скоплений. Основную часть ореолов метасоматитов составляют породы с относительно пониженной плотностью. Они обуславливают появление обширных отрицательных аномалий силы тяжести, характерных для рудных полей. Сложный вид аномального поля Δg_a для ореола метасоматитов, вмещающих рудную залежь, продемонстрирован на упрощенной аналитической модели (рис. 2, а). Также сложный вид имеет аномальное поле в методе заряда, когда источник тока

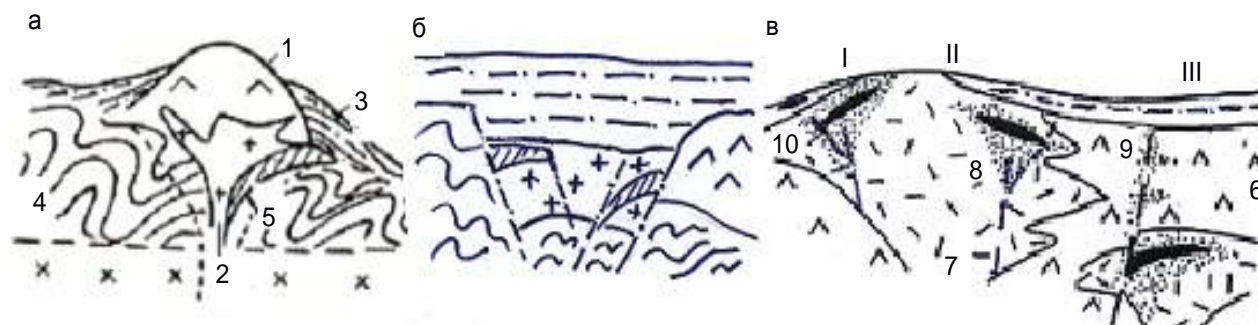


Рисунок 1. Модели вулканокупольной и вулкано-депрессийной рудоносной структур (а, б) и схема пространственного положения скрытых колчеданных месторождений (в) (по А. М. Дымкину, Г. А. Вострокнутову). 1 – вулканический массив преимущественно из пород основного состава; 2 – плутонические составляющие из пород кислого состава; 3 – вулканогенно-осадочные образования, синхронные вулканизму; 4 – вулканогенно-осадочный комплекс основания; 5 – рудные поля; 6 – породы безрудных комплексов; 7 – породы рудовмещающих комплексов; 8 – окolorудные эндогенные геохимические, минеральные и метасоматические ореолы; 9 – тектонические нарушения, играющие роль рудоподводящих каналов; 10 – рудные тела.

Figure 1. Models of the volcanic dome and volcanic depression ore-bearing structures (a, b) and the spatial pattern of hidden pyritic deposits (c) (according to A. M. Dymkin, G. A. Vostroknutov). 1 – volcanic massif mainly from rocks of the main composition; 2 – plutonic components from rocks of acidic composition; 3 – volcanic-sedimentary formations synchronous to volcanism; 4 – volcanic-sedimentary base complex; 5 – ore fields; 6 – rocks of barren complexes; 7 – rocks of ore-bearing complexes; 8 – endogenous endogenous geochemical, mineral and metasomatic halos; 9 – tectonic disturbances, playing the role of ore supply channels; 10 – ore bodies.

погружен в ореол метасоматитов с повышенной по сравнению с вмещающими породами электропроводностью. При субгоризонтальной кровле ореола на его границах наблюдаются максимумы аномального потенциала U_a , фиксируя которые в плане, можно оконтурить границы ореола. Если среди измененных пород существует пологозалегающая рудная залежь, она создаст знакопеременную (двухполюсную) аномалию, которая накладывается на аномалию от ореола, чем дополнительно усложняет суммарное поле. Модельный график U_a для такой структуры показан на рис. 2, а. В случае наклонного залегания ореола максимумом аномального поля от него отметится только приподнятая граница ореола (рис. 2, б). Отрицательная аномалия будет наблюдаться в районе источника тока и погруженной части ореола.

Сравнительно просто рудоносные ореолы околорудно измененных горных пород выявляются по измерениям вектора градиента электропроводности с помощью крестообразной пятиэлектродной установки (электрод А, эмитирующий постоянный ток J , и две пары приемных электродов MN ($MA = AN$)) [4]. Для определения направления наиболее резкого падения кажущегося сопротивления в зоне действия установки строят вектор по составляющим измеренных значений разности потенциалов ΔU_1 и ΔU_2 , координатные оси для которых направлены из А на электроды N_1 и N_2 . Значение вектора градиента электропроводности вычисляют по формуле

$$\delta r_k = 2\pi J - 1(\Delta U_1^2 + \Delta U_2^2)^{-1/2}.$$

Модельный пример выявления ореола метасоматитов (полусфер) и рудной залежи (круглый диск) по совокупности измерений векторов δr_k показан на рис. 2, г.

При геофизических исследованиях потенциально рудоносных структур следует использовать возможность картировать как индикаторы месторождений такие рудоформирующие элементы рудных полей, какими являются рудопроводящие и рудораспределяющие разрывные нарушения. Часто они имеют выход к дневной поверхности и проявляются как плоские проводники, уходящие на глубину. Признаком этих объектов являются линейные оси отрицательного аномального поля, полученного при обработке результатов съемки методом мелкомасштабного заряда (модельный пример для двух разломов на рис. 2, е), или на графиках градиента кажущегося сопротивления ρ_k метода комбинированного электропрофилеирования [8]. Интерпретация сложных графиков электропрофилеирования упрощается после вычисления градиента δr_k на отрезке, равном размеру установок, и отнесенного к началу отрезка. На модельном примере над вертикальным проводником наблюдается совпадение четких отрицательных аномалий δr_k , вычисленных для встречных установок AMN и MNB (рис. 2, д).

Опыт применения электротометрии при исследованиях рудоносных структур

Выявление перспективных на рудоносность палеовулканических построек по комплексу геолого-геофизических признаков подробно рассмотрено в ряде специальных публикаций [1, 9, 10], поэтому сосредоточим внимание на возможностях обнаружения в них рудных полей и месторождений методами электротометрии. Разработаны и в ряде случаев успешно применяются электроразведочные технологии, позволяющие получить данные о пространственном распределении удельного сопротивления, а также поляризуемости горных пород, по которым можно прогнозировать при-

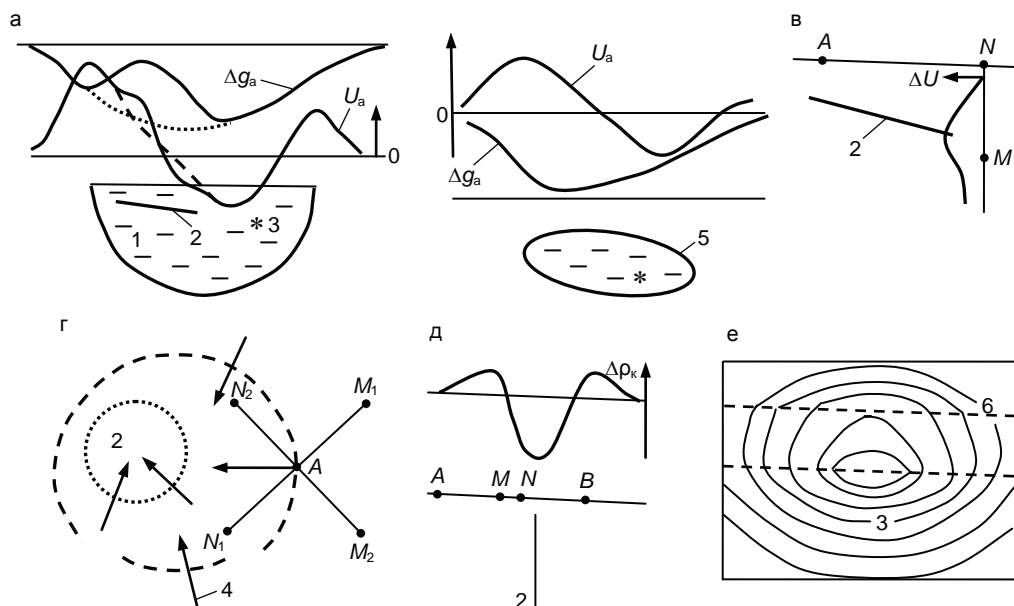


Рисунок 2. Модельные примеры проявления рудоформирующих элементов рудоносных структур (ореола метасоматитов, локальных тел – проводников, разрывных нарушений) в аномальных геофизических полях. 1 – полусфер (модель ореола); 2 – диск (модель рудного тела (а, б, в) или рудоподводящего канала (г)); 3 – источник тока; 4 – векторы градиента ρ_k ; 5 – эллипсоид (модель ореола), 6 – полуплоскости (модель глубинного разлома); для модели а; \cdots и $---$ – участки графиков аномального поля без влияния рудного тела.

Figure 2. Model examples of the occurrence of ore-forming elements of ore-bearing structures (halo of metasomatites, local conductive bodies, discontinuous disturbances) in abnormal geophysical fields. 1 – a hemisphere (halo model); 2 – disk (model of the ore body (a, b, c) or the ore supply channel (d)); 3 – current source; 4 – gradient vectors ρ_k ; 5 – ellipsoid (halo model), 6 – half-planes (deep fault model); for model a; \cdots And $---$ plots of the anomalous field graphs without the influence of the ore body.

существование на глубине рудных залежей [11–15]. Однако это достаточно трудоемкие исследования, требующие солидных временных и материальных затрат. Их применение оправдано на стадии разведки, когда стоит задача по определению масштабов оруденения, существование которого доказано результатами буровой разведки.

На этапе же поисковых работ, когда рудоперспективность изучаемых вулканических построек не оценена, предпочтения заслуживает применение простых, но достаточно глубинных методов электроразведки. В одном из таких методов выполняется определение вектора градиента электропроводности с крестообразной установкой (рис. 2, в), который дает характеристику неоднородности среды приблизительно в пределах полушара с центром в середине установки (А) и радиусом, равным полуразмеру установки ($MN/2$). Он может составлять сотни метров, что обеспечивает изучение крупного массива горных пород. Съемку допустимо проводить по редкой и нерегулярной сети для выявления на исследуемой площади главнейших геологических объектов, к которым относятся рудоформирующие элементы структур.

Ценный опыт получен при изучении территории, включающей месторождение Молодежное [4, 16]. Приведенный на рис. 3 план векторов, фиксирующих направления уменьшения удельного сопротивления и изолинии этого параметра, построен всего по 15 стоянкам установки. Однако он полностью согласуется с геолого-геофизическими данными детальной разведки рудного поля, так как имеет признаки присутствия субмеридиональной тектонической зоны смятия, игравшей роль рудоподводящего канала, опережающего диагонального разрывного нарушения со следами околорудных изменений и рудных тел.

На перспективных участках работы обычно начинаются с проходки скважин. Первые скважины могут не вскрыть рудные скопления. Однако по диаграммам методов электрокаротажа КС, ПС и МЭП можно заметить присутствие в разрезе пересечения околорудно-измененных пород: низкие сопротивления по КС, минерализацию по МЭП и признаки рудной залежи по аномальному полю ПС. Для выявления направлений, в которых следует продолжать поиски, целесообразно выполнить измерения по скважине разности потенциала ΔU с помощью уравновешенной установки. Модельный пример ее применения приведен на рис. 2, в. В качестве производственного примера на рис. 4 представлены результаты методов электрометрии по безрудной скважине, пробуренной на периферии Узельгинского колчеданного месторождения [16].

На диаграмме КС (рис. 4, б) выделяются два интервала пород с аномально повышенной электропроводностью, но наиболее интересна широкая отрицательная аномалия поля ПС, которая может классифицироваться как проявление влияния рудного тела. Для демонстрации возможностей выявления направления на объект, с которым связаны аномалии электрокаротажа, выполнены измерения по скважине с уравновешенной установкой при нескольких ориентациях токовой установки АВ на дневной поверхности. Значительная положительная аномалия на глубине была получена при ориентировке токового электрода А на СЗ, З и ЮЗ, а минимальные для С (кривые 1 и 2 на рис. 4, б). Построенная по аномальным значениям ΔU для глубины 435 м полярная диаграмма отражает рудоперспективные направления, что

подтвердили результаты оконтуривания рудной залежи V (рис. 4, а, в) в окрестностях исследуемой скважины.

Еще более показательны результаты электрометрии на одном из широтных профилей Узельгинского месторождения с двухгоризонтной рудоносностью (рис. 5). Согласно данным наземной электрометрии, на этом профиле отмечены признаки глубинных проводников. Наиболее отчетливо они проявились на графике редко применяемой двухэлектродной установки АМ, глубинность которой приблизительно равна $2AM$. Сложный вид графиков кажущегося сопротивления ρ_k установок комбинированного электропрофилирования связан с меньшей в 2 раза глубиной исследования (приблизительно величина размера установок), наибольшей чувствительностью к вертикальным проводникам и наличием над верхним рудным телом неизмененных высокоомных пород. При вычислении градиента ρ_k вид графиков упрощается и на нем заметны две отрицательные аномалии от проводников. Локальная аномалия связана, согласно данным детальной разведки, с субвертикальным рудоподводящим разрывным нарушением, хорошо проявленным в рельефе руслом реки Узельга. Другая аномалия, как видно из геоэлектрического разреза, объясняется существованием надрудной зоны измененных пород западнее верхнего рудного тела. Показательно, что обе аномалии от проводников совпали с геохимическими аномалиями, которые являются признаками оруденения на глубине, но фиксируют участки надрудных пород с повышенной проницаемостью иногда в стороне от рудных тел. Такое совпадение электроразведочных и геохимических аномалий может служить основанием для проведения детальных поисковых работ.

На примере разведочного профиля (рис. 5) можно продемонстрировать возможность правильно сорие-

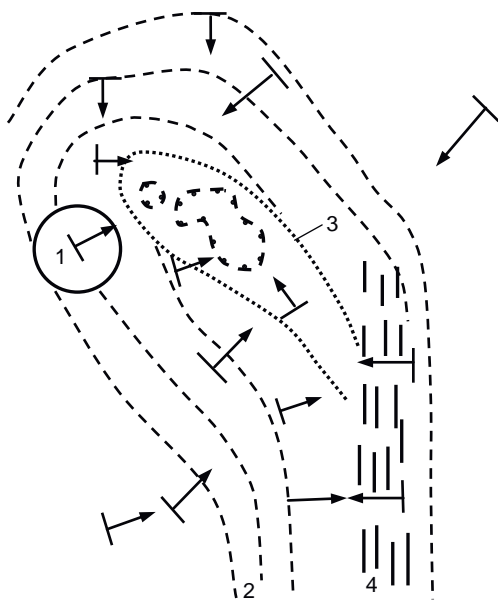


Рисунок 3. План векторов градиента электропроводности на территории, включающей месторождение Молодежное. 1 – векторы градиента электропроводности с размером, соответствующим радиусу площади исследования крестообразной установкой; 2 – условные изолинии ρ_k (нормальные векторы); 3 – контуры ореола околорудно-измененных пород, включающего рудные залежи; 4 – тектоническая зона смятия.

Figure 3. The scheme of the vectors of the conductivity gradient in the territory, including the Molodezhnoye deposit. 1 – vectors of the gradient of electrical conductivity with a size corresponding to the radius of the research area of the cruciform installation; 2 – conditional contours ρ_k (normal vectors); 3 – contours of the halo of ore-modified rocks, including ore deposits; 4 – tectonic zone of collapse.

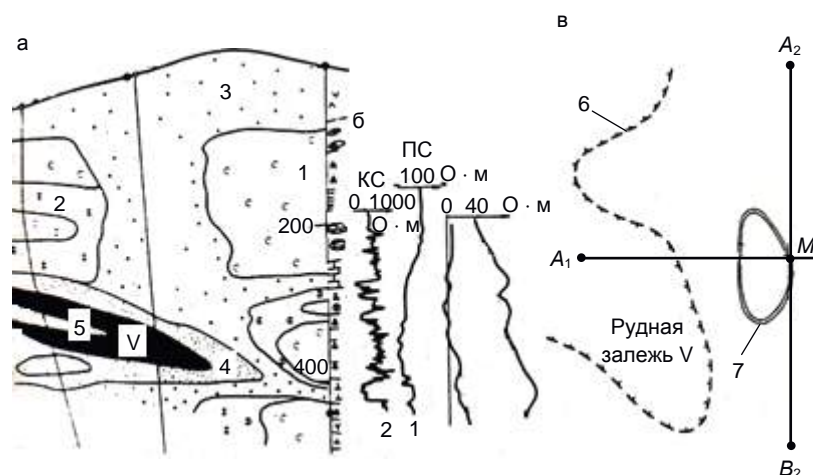


Рисунок 4. Геоэлектрический разрез (а), диаграммы электрометрии по безрудной скважине (б) и полярная диаграмма аномального поля (в), построенная по измерениям с уравновешенной установкой на Узельгинском месторождении. 1–4 – породы, классифицированные по величине электропроводности как околорудно-измененные слабо-, средне-, сильно-, с сульфидной минерализацией соответственно; 5 – руды, 6 – частичный контур рудной залежи в плане, 7 – полярная диаграмма; A_1 , A_2 , B_1 , B_2 – положение токовых электродов в плане.

Figure 4. Geoelectric section (a), electrometry diagrams for a barren well (b) and a polar diagram of an anomalous field (c), constructed from measurements with a balanced installation at the Uzelginsky field. 1–4 – rocks classified according to the value of electrical conductivity as ore-modified slightly, medium, strongly, with sulfide mineralization, respectively; 5 – ore, 6 – partial contour of the ore deposit in the plan, 7 – polar diagram; A_1 , A_2 , B_1 , B_2 – the position of the current electrodes in the plan.

тировать такие поиски с применением скважинной электроразведки. В безрудной скважине на границе рудного поля были выполнены измерения разности потенциалов с уравновешенной установкой для разносов $AN = NB$, равных 300 и 600 м. При расположении токового электрода А в сторону рудной части разреза были получены положительные аномалии на глубине, соответствующей залеганию близлежащих рудных тел (рис. 5, г). Аномалия от нижнего рудного горизонта проявилась только при большом разносе. Модельный пример на рис. 2, в является теоретической иллюстрацией к практическим аномальным кривым.

Следует подчеркнуть, что данные скважинной электроразведки, полученные в первых поисковых скважинах, способствовали открытию Узельгинского месторождения. Представленные же результаты электрометрии были получены на завершающей стадии разведки месторождения при проведении опытных работ с целью совершенствования методики поисковой скважинной электроразведки.

На Узельгинском и некоторых других месторождениях были построены геоэлектрические разрезы по данным электрокаротажа. Они помогают продемонстрировать закономерности пространственного распределения электропроводности в пределах рудных полей. Это позволяет более объективно оценивать возможности наземной и скважинной электроразведки для выявления глубокозалегающих рудных месторождений по зонально проявленным околорудным ореолам с повышенной электропроводностью. Одновременно удается получить дополнительную информацию, проливающую свет на историю формирования изученных объектов.

На примере рассматриваемых геологического и геоэлектрического разрезов (рис. 5) видно, что рудообразование протекало в два этапа. Вначале на контакте двух разновозрастных субвулканических тел кислого состава, игравшего роль рудоподводящего канала, под непроницаемым слоем известняков сформировалось верхнее рудное тело. Последующие активные флюиды привели к образованию надрудных геоэлектрических зон, фиксируемых методами электрометрии. Впоследствии, благодаря внедрению в отмеченный канал тела взрывчатых брикетов, образовалась ловушка с экраном для рудоносных растворов второго этапа рудообразования, в которой и сформировалось нижнее рудное тело. На уровне изученного разреза рудное поле представляет достаточно крупный блок с неравномерным распределением руд и околорудно-измененных пород с повышенной электропроводностью, перекрытых и ограниченных по латерали неизменными высокоомными породами. Обнаружить такой объект можно только с помощью методов, обладающих большой глубиной. Как было отмечено ранее, на отдельных участках следы глубинного оруденения можно обнаружить по косвенным признакам.

При оценке перспективности вулканических построек на рудоносность важной задачей является оконтуривание массива горных пород с признаками рудного поля. Как показал опыт разведки Подольского месторождения, эффективно проведение мелкомасштабной съемки методом заряда с вычислением аномальной составляющей потенциала U_a . Потенциальная установка, применяемая в методе заряда, обеспечивает достаточно большую глубину исследований этим методом с выявлением основных рудоформирующих элементов рудоносных структур. Интерпретация плана изолиний и графиков U_a позволяет выявить границы скрытых проводников, которые в первую очередь связаны с ореолами метасоматитов, а в благоприятных случаях с рудными залежами, а также рудоподводящими каналами.

Подольское месторождение сформировалось в пределах существенно разрушенной вулканической постройки. Под мощной (400–500 м) толщей вулканогенно-осадочных пород обнаружена структура в виде брахиантиклинали, центральной частью которой сформирована породами кислого состава, а породы основного состава выявлены на периферии постройки (рис. 6, а) [5, 16]. Центральную часть структуры составляют серии субвулканических пород, отличающиеся

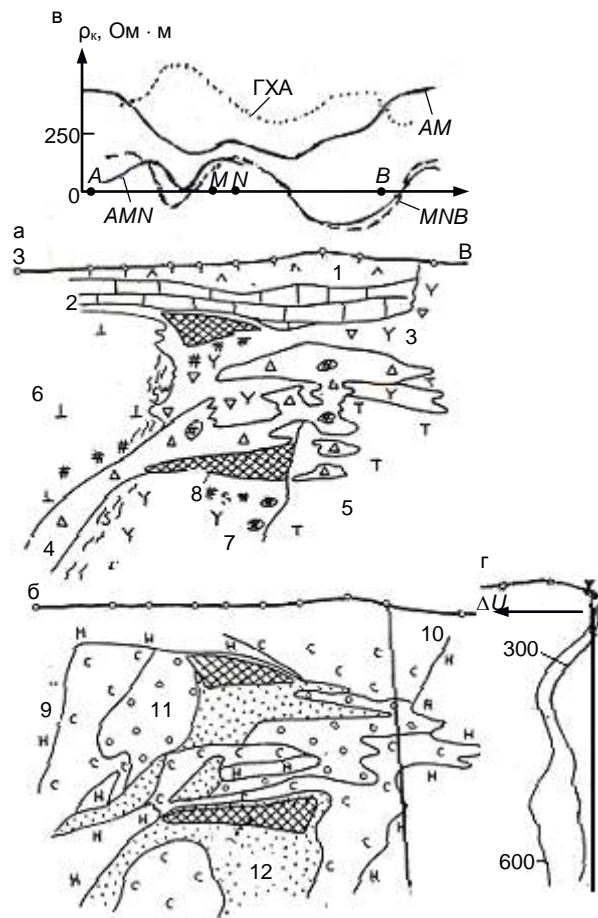


Рисунок 5. Результаты наземной (в) и скважинной (г) электротметрии на широтном разведочном профиле, для которого построены геологический (а) (по Г. В. Петрову) и геоэлектрический (б) разрезы. 1 – диабазы; 2 – известняки; 3 – дацитовые порфириды, местами брекчированные; 4 – взрывчатые брекчии; 5 – липаритовые порфиры; 6 – андезит-дацитовые порфириды; 7 – серицитизация, окварцевание, сульфидизация; 8 – руды; 9–12 – породы, классифицированные по величине электропроводности как неизменные, окислительно-измененные слабо-, средне-, сильно измененные соответственно; ГХА – геохимические аномалии.

Figure 5. The results of ground (c) and borehole (d) electrometry on a latitudinal exploration profile for which geological (a) (according to G. V. Petrov) and geoelectric (b) sections were constructed. 1 – diabase; 2 – limestones; 3 – dacitic porphyrites, brecciated in places; 4 – explosive breccias; 5 – liparite porphyry; 6 – andesite-dacite porphyrites; 7 – sericitization, silicification, sulfidization; 8 – ore; 9–12 – rocks classified by conductivity as unchanged, ore-modified slightly, medium, strongly altered, respectively; GHA – geochemical anomalies.

составом, морфологией и возрастом. Месторождение представляет собой совокупность сближенных рудных залежей, сформировавшихся под субвулканическим силлообразным телом, наиболее молодым из субвулкаников и сыгравшим роль экрана для рудных растворов. Под рудными скоплениями фиксируется сульфидная минерализация и уходящая на глубину зона метасоматитов. Важную роль в их формировании и рудообразовании сыграло тектоническое нарушение, показанное на рис. 6, а.

Из геофизических признаков этой рудоносной структуры отметим обширную и протяженную площадную субмеридиональную положительную аномалию поля силы тяжести, связанную с грядой вулканических построек, одной из которых является и Подольский палеовулкан. В пределах этой гряды обнаружено несколько рудопроявлений. В районе же Подольского месторождения отмечена более локальная отрицательная аномалия, которую можно связывать с областью рудного поля. Над главными рудными залежами месторождения в гравитационном поле выделена еще более локальная положительная аномалия, присутствие которой заметно на графике Δg по продольному профилю (рис. 4, а). Она отражает влияние плотных рудных масс.

Достаточно информативным оказалось аномальное поле заряда в безрудную скважину 1 (рис. 6, в), вычисленное путем исключения из измеренного поля (рис. 6, б) нормальной составляющей для модели двухслойной среды. Так, на плане изолиний U_a линий положительных аномалий A_1 отмечаются границы рудного поля, в пределах которого электропроводность горных пород в несколько раз выше, чем за его пределами. Теоретическая предпосылка для обоснования такого вывода продемонстрирована на модельном примере (рис. 2, а), а результаты электрокаротажа подтверждают повышение по электропроводности пород в пределах контура аномалии A_1 . Присутствие оруденения проявлено слабо, и только на уровне дальней от заряда границе отмечается локальное повышение на графике U_a (рис. 6, а). Дополнительное усложнение в график аномального поля вносит тектоническое нарушение, классифицируемое как рудоподводящий канал. Показательно, что при положении источника тока на дневной поверхности в районе восточной границы рудных скоплений зафиксирована четкая отрицательная аномалия, от плоского проводника, уходящего на глубину, характерная для разрывного нарушения, выходящего к дневной поверхности. На плане аномального поля заряда хорошо заметно присутствие отрицательной линейной аномалии A_2 с ответвлением в сторону выделяемого рудного поля. Вероятно, так в плане фиксируется рудоподводящий канал.

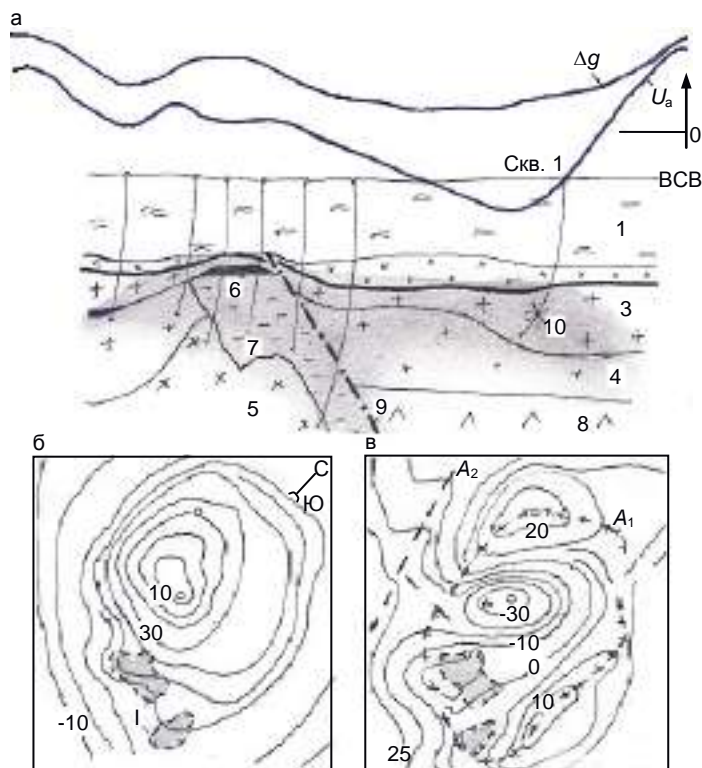


Рисунок 6. Графики геофизических полей Δg и U_a по продольному профилю месторождения Подольское (геологический разрез по И. Б. Серавкину и А. М. Косареву) (а), планы изолиний измеренного потенциала (б) и аномального потенциала U_a (в) поля заряда с контурами рудных залежей [2]. 1 – вулканогенно-осадочные породы; 2 – вулканокласты; 3–5 – серии разновозрастных субвулканитов кислого состава; 6 – колчеданные руды; 7 – метасоматиты; 8 – породы основного состава; 9 – разрывное нарушение; 10 – заряд; серый фон – область повышения электропроводности пород; A_1, A_2 – оси положительных и отрицательных аномалий соответственно.
Figure 6. Graphs of the geophysical fields Δg and U_a along the longitudinal profile of the Podolskoye field (geological section according to I. B. Seravkin and A. M. Kosarev) (a), schemes of isolines of the measured potential (b) and anomalous potential U_a (c) charge fields with the contours of ore deposits [2]. 1 – volcanic-sedimentary rocks; 2 – volcanoclasts; 3–5 – series of acidic subvolcanics of different ages; 6 – pyrite ores; 7 – metasomatites; 8 – rocks of the main composition; 9 – discontinuous violation; 10 – charge; gray background – an area of increasing the electrical conductivity of rocks; A_1, A_2 are the axes of positive and negative anomalies, respectively.

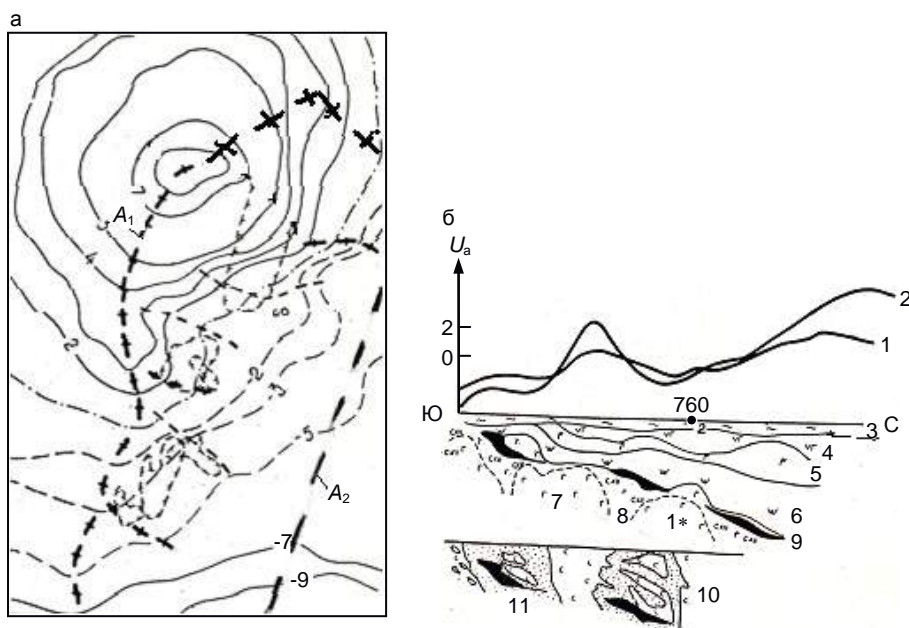


Рисунок 7. План изолиний аномального потенциала поля заряда 1 с выделенными линиями осей и проекциями рудных залежей (а), графики аномального потенциала поля зарядов 1 и 2 над геологическим (по И. Б. Серавкину) и геоэлектрическим разрезами (б) месторождения Юбилейное. 1, 2 – заряды; 3 – осадочные отложения; 4, 5 – слои пород основного состава; 6 – кислые вулканиты; 7 – породы основания вулкана; 8 – метасоматиты; 9 – рудные тела; 10 – слабоизмененные и высокоомные породы; 11 – околорудно-измененные породы с повышенной электропроводностью.
Figure 7. Scheme of isolines of the anomalous potential of the charge field 1 with the marked axis lines and projections of the ore deposits (a), graphs of the anomalous potential of the charge field 1 and 2 over the geological (according to I. B. Seravkin) and geoelectric sections (b) of the Yubileynoye deposit. 1, 2 – charges; 3 – sedimentary deposits; 4, 5 – layers of rocks of the main composition; 6 – acidic volcanics; 7 – rocks of the base of the volcano; 8 – metasomatites; 9 – ore bodies; 10 – slightly modified and high resistance rocks; 11 – ore-modified rocks with increased electrical conductivity.

Из приводимых геофизических материалов по Подольскому месторождению видно, что в совокупности характерные аномалии гравиметрии и электроразведки дают основания заметить признаки рудоносности вулканической постройки, более углубленное изучение которой привело к обнаружению промышленных руд. Опытные работы на том же Подольском рудном поле доказали существование такой возможности по данным зондирования методом переходных процессов при удачном расположении петли, например, с учетом аномалий, обнаруженных более простыми методами.

Не всегда применение мелкомасштабного заряда позволяет полностью оконтурить границы рудного поля. Например, в районе месторождения Юбилейное, сформировавшегося в моноклиальной части палеовулкана на основании из пород основного состава, рудоносная толща метасоматитов погружается на юго-восток [5, 16]. Поэтому в аномальном поле заряда, помещенного в скважину 760, положительной аномалией A_1 отметились только северная и западная границы рудного поля (рис. 7, а). Обширную отрицательную аномалию A_2 можно связывать с крупным глубинным разломом, от которого нормально к нему протянулись рудоподводящие разрывные нарушения, обеспечившие поступления рудоносных растворов в места формирования рудных скоплений. Как заметно по плану аномального поля заряда (рис. 7, а), над рудными залежами месторождения наблюдаются локальные знакопеременные аномалии, отражающие двухполосную структуру аномального поля, характерную для локальных проводников. Модельные примеры, представленные на рис. 2, а, б, помогают признать правильными эти выводы.

Появлению локальных аномалий над рудными залежами способствовали геоэлектрические надрудные зоны повышенной электропроводности. Существование таких зон, продемонстрированное на продольном геолого-геофизическом разрезе (рис. 7, б), характерно для многих рудопроявлений и иногда обнаруживается наземными методами электроразведки. В рассматриваемом примере блоковая геоэлектрическая структура на продольном профиле проявляется локальными знакопеременными аномалиями и в поле заряда, расположенного на дневной поверхности. Правильный прогноз положения северной границы рудного поля способствовал обнаружению самой глубокозалегающей рудной залежи VI.

Выводы

Углубление теоретических основ скважинной электроразведки и накопленный опыт ее применения на южноуральских колчеданных месторождениях позволяют говорить о существовании благоприятных предпосылок для продолжения поисков глубокозалегающих рудных месторождений на перспективных территориях в пределах известных и потенциально перспективных рудоносных структур. Приводимые в работе модельные и практические примеры применения для этих целей комплекса методов полевой и скважинной электротометрии являются иллюстрацией возможностей получения положительных результатов решения проблемы поисков глубокозалегающих колчеданных месторождений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Виноградов А. М. Геополья и колчеданы Южного Урала. Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2016. 364 с.
2. Электроразведка рудных полей методом заряда. Л.: Недра, 1984. 216 с.
3. Кормильцев В. В., Семенов В. Д. Электроразведка методом заряда. М.: Недра, 1987. 218 с.
4. Сапожников В. М., Шевченко В. Г. Теория и методика электроразведки в градиентных средах. Л.: Недра, 1992. 135 с.
5. Поиски скрытого колчеданного оруденения на Урале. М.: Наука, 1983. 126 с.
6. Сапожников В. М. Использование диаграмм каротажа для петрофизического картирования рудовмещающих горных пород // Методика поисков и разведки глубокозалегающих рудных месторождений. Свердловск: Изд-во УПИ, 1977. Вып. 1. С. 11–19.
7. Дьяконов Б. П., Кононенко И. И., Сапожников В. М., Кашкаров А. А. Геоэлектрическое строение рудных полей Урала и сопредельных площадей // Электромагнитные методы при исследовании земных недр. Свердловск: Изд-во УНЦ АН СССР, 1983. С. 41–55.
8. Сапожников В. М., Ермолаев К. М. Скважинная электроразведка разрывных нарушений в рудных полях. // Изв. УГГУ. 2017. Вып. 1(45). С. 32–35.
9. Виноградов А. М., Малышев А. И. Факторы и критерии прогноза, направление и методика поисков крупных медноколчеданных месторождений на Урале // Литосфера. 2014. № 5. С. 90–109.
10. Ivanov K. S., Puchkov V. N., Fyodorov Yu. N., Erokhin Yu. V., Pogromskaya O. E. Tectonics of the Urals and adjacent part of the West-Siberian platform basement: Main features of geology and development // Journal of Asian Earth Sciences. 2013. Vol. 72. P. 12–24. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2013.02.029>
11. Storz H., Storz W., Jacobs F. Electrical resistivity tomography to investigate geological structures of the earth's upper crust // Geophysical Prospecting. 2000. Vol. 48, issue 3. P. 455–471. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2478.2000.00196.x>
12. Wisen R., Auken E., Dahlin T. Combination of 1D laterally constrained inversion and 2D smooth inversion of resistivity data with a priori data from boreholes // Near Surface Geophysics. 2005. Vol. 3, issue 2. P. 71–79. <https://doi.org/10.3997/1873-0604.2005002>
13. Бобачев А. А., Яковлев А. Г., Яковлев Д. В. Электротомография – высокоразрешающая электроразведка на постоянном токе // Инженерная геология. 2007. № 3. С. 31–35.
14. Apostolopoulos G. Combined Schlumberger and dipole-dipole array for hydrogeologic applications // Geophysics. 2008. Vol. 73, issue 5. P. F187–F195. <https://doi.org/10.1190/1.2950032>
15. Arzhantseva I. A., Andreyev M. A., Akulenko S. A., Kats M. J., Modin I. N. Geophysical Investigations on Por-Bajin Island, Tuva (Russia) // 8th Intern. Conf. on Archaeological Prospection (9–12 sept.). Paris, 2009. 4 p.
16. Прокин В. А., Нечухин В. М., Сопко П. Ф. и др. Медноколчеданные месторождения Урала. Геологические условия размещения. Свердловск: УНЦ АН СССР, 1985. 288 с.

Статья принята в редакцию 14 мая 2019 г.

Conditions for successful application of simple electrometry methods in searching for deep-seated pyrite deposits

Vadim Mikhailovich SAPOZHNIKOV*

Ural State Mining University, Ekaterinburg, Russia

Relevance of the work is determined by the need to use the positive experience of prospecting and exploration for copper pyrite ores in conditions when the expansion of the raw material base of the copper ore industry of the Urals is possible by detecting large accumulations of ores at sufficiently large depth. Difficulties in searching for such objects are associated with their weak occurrence over the entire complex of geological and geophysical properties, and a successful result can be obtained by using a series of indirect indicators. Substantially, one can identify large ore deposits when they are shallow. The main object of research should be paleovolcanic structures that are potentially ore-bearing by geological and geophysical features, and within them - well-known and new ore fields. At the stage of studying these structures, it is most justified to use simple in-depth methods of surface and downhole electrometry.

Purpose of the work is to demonstrate the theoretical and practical conditions for the application of simple electrometry methods, which make it possible to consistently identify signs of occurrence of the main ore-forming elements of ore-bearing structures, from the totality of which it is possible to detect individual ore deposits and the deposit as a whole. Examples of the application of electric profiling methods, studying the vectors of the electric conductivity gradient, the small-scale charge method with the allocation of an anomalous field, a well-balanced installation, and geoelectric section modelling based on electric logging data are considered.

Results obtained by applying simple electrometry methods to specific South Ural copper pyrites deposits allow us to show examples of obtaining exploration information about the existence of ore-bearing structures and the occurrence of their individual elements.

Keywords: ore field, ore-forming elements of ore-bearing structures, borehole electrical exploration, anomaly

REFERENCES

1. Vinogradov A. M. 2016, *Geopolya i kolchedany Yuzhnogo Urala* [Geofields and pyrites of the Southern Urals], Ekaterinburg, 364 p.
2. 1984, *Elektrorazvedka rudnykh poley metodom zaryada* [Electric exploration of ore fields by the charge method], 216 p.
3. Kormil'tsev V. V., Semenov V. D. 1987, *Elektrorazvedka metodom zaryada* [Electrical exploration by the charge method], Moscow, 218 p.
4. Sapozhnikov V. M., Shevchenko V. G. 1992, *Teoriya i metodika elektrorazvedki v gradiyentnykh sredakh* [Theory and technique of electrical exploration in gradient media], 135 p.
5. 1983, *Poiski skrytogo kolchedannogo orudneniya na Urale* [The search for hidden pyrite mineralization in the Urals], 126 p.
6. Sapozhnikov V. M. 1977, *Ispol'zovaniye diagramm karotazha dlya petrofizicheskogo kartirovaniya rudovmeshchayushchikh gornykh porod* [Use of logging diagrams for petrophysical mapping of ore-bearing rocks]. Methods of prospecting and exploration of deep-lying ore deposits. Sverdlovsk, vol. 1, pp. 11–19.
7. D'yakov B. P., Kononenko I. I., Sapozhnikov V. M., Kashkarov A. A. 1983, *Geoelektricheskoye stroyeniye rudnykh poley Urala i sopredel'nykh ploshchadey* [Geoelectric structure of the ore fields of the Urals and adjacent areas]. Electromagnetic methods in the study of the earth's interior, Sverdlovsk, P. 41–55.
8. Sapozhnikov V. M., Ermolaev K. M. 2017, Borehole electrical exploration of explosive faults in ore fields. *Izvestiya Ural'skogo gosudarstvennogo gornogo universiteta* [News of the Ural State Mining University], vol. 1(45), pp. 32–35. (In Russ.)
9. Vinogradov A. M., Malyshev A. I. 2014, Factors and forecast criteria, direction and methodology of searches for large copper-pyrite deposits in the Urals. *Litosfera* [Lithosphere], no. 5, pp. 90–109. (In Russ.)
10. Ivanov K. S., Puchkov V. N., Fyodorov Yu. N., Erokhin Yu. V., Pogromskaya O. E. 2013, Tectonics of the Urals and adjacent part of the West-Siberian platform basement: Main features of geology and development. *Journal of Asian Earth Sciences*, vol. 72, pp. 12–24. <https://doi.org/10.1016/j.jseae.2013.02.029>
11. Storz H., Storz W., Jacobs F. 2000, Electrical resistivity tomography to investigate geological structures of the earth's upper crust. *Geophysical Prospecting*, vol. 48, issue 3, pp. 455–471. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2478.2000.00196.x>
12. Wisen R., Auken E., Dahlin T. 2005, Combination of 1D laterally constrained inversion and 2D smooth inversion of resistivity data with a priori data from boreholes. *Near Surface Geophysics*, vol. 3, issue 2, pp. 71–79. <https://doi.org/10.3997/1873-0604.2005002>
13. Bobachev A. A., Yakovlev A. G., Yakovlev D. V. 2007, Electrotomography is high-resolution direct current electric exploration. *Inzhenernaya geologiya* [Engineering Geology World], no. 3, pp. 31–35. (In Russ.)
14. Apostolopoulos G. 2008, Combined Schlumberger and dipole-dipole array for hydrogeologic applications. *Geophysics*, vol. 73, issue 5, pp. F187–F195. <https://doi.org/10.1190/1.2950032>
15. Arzhantseva I. A., Andreyev M. A., Akulenko S. A., Kats M. J., Modin I. N. 2009, Geophysical Investigations on Por-Bajin Island, Tuva (Russia). 8th Intern. Conf. on Archaeological Prospection (9–12 sept.). Paris, 4 p.
16. Prokin V. A., Necheukhin V. M., Sopko P. F. et al. 1985, *Mednokolchedannyye mestorozhdeniya Urala. Geologicheskiye usloviya razmeshcheniya* [Copper pyrite deposits of the Urals. Geological conditions of placing], Sverdlovsk, 288 p.

The article was received on May 14, 2019

* vmsap@mail.ru

 <https://orcid.org/0000-0002-9665-5778>