

ГЕОЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ЗОЛОТОРУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ВЕРХНЕГО ПРИАМУРЬЯ

М.Ю. Носырев

*ФГБУН Институт тектоники и геофизики ДВО РАН, ул. Ким Ю Чена 65, г. Хабаровск, 680000;
e-mail: ns041ck@yandex.ru*

Поступила в редакцию 22 октября 2018 г.

Выполнен анализ электрических свойств горных пород и результатов съемок методом вызванной поляризации для трех месторождений золота Верхнего Приамурья: Бамского, Березитового, Покровского. Показана пространственная сопряженность минерализованных зон с контрастными границами по электрическому сопротивлению, картируемыми в пределах рудных полей. Обосновано предположение, что блоки пород с высоким сопротивлением обладают минимальной проницаемостью и могли выступать как экраны, оказывая влияние на гидродинамические особенности гидротермальной системы на этапах образования месторождений и, в конечном итоге, на формирование минерализации. Этот факт делает подобные геоэлектрические границы важным поисковым элементом, который должен выделяться при интерпретации данных электроразведки. Для съемок методом вызванной поляризации показана многозначность интерпретации аномалий поляризуемости в пределах золоторудных полей и отсутствие для ряда повышений этого параметра связи с золотоносностью. Предложены методы оценки аномалий поляризуемости.

Ключевые слова: золото, месторождение, электрическое сопротивление, поляризуемость, геофизическая аномалия, Приамурье.

ВВЕДЕНИЕ

Методы электроразведки широко используются при поисках и детальном изучении месторождений золота. Наиболее часто используемыми являются различные модификации метода сопротивлений и вызванной поляризации (ВП), несколько реже используется также метод естественного электрического поля.

Выделяемые по данным электроразведки элементы интерпретации достаточно традиционны. Это разломы, области развития отдельных типов пород, зоны сульфидной минерализации. Не отрицая важного поискового значения данных элементов, отметим, что иногда такая интерпретация не улавливает важные элементы распределения электрических параметров, с которыми может пространственно ассоциировать золоторудная минерализация. Кроме того, очень часто основным интерпретируемым параметром является поляризуемость, электрическое сопротивление при этом рассматривается много меньше, хотя также несет немало информации о потенциальной золотоносности изучаемых участков.

Рассмотрим это на примере нескольких золоторудных месторождений Верхнего Приамурья, имею-

щих гидротермальный генезис. В рассмотрение взяты месторождения Бамское и Березитовое, относящиеся к плутоногенному классу, и вулканогенное Покровское месторождение золота [19]. По мнению автора и с учетом имеющихся данных [1, 8–10, 19, 29], два первых объекта могут быть отнесены к мезотермальным золоторудным месторождениям, тогда как Покровское является типичным представителем эпитермального золото-серебряного месторождения. По соотношению сульфидов и кварца в рудах месторождений Покровское является убогосульфидным золото-кварцевым объектом, Бамское месторождение – золото-кварцевым малосульфидным, руды месторождения Березитовое являются золото-кварц-сульфидными [19, 29]. Расположение изученных месторождений показано на рис. 1.

По масштабу это крупные золоторудные объекты с относительно высокими содержаниями золота. Покровское месторождение на сегодняшний день практически отработано, месторождение Березитовое находится на завершающей стадии отработки, месторождение Бамское разведано и готово к началу добычи. Несмотря на это значимость данных объектов как определенных эталонов при поисках новых месторождений в Приамурье остается высокой.



Рис. 1. Схема расположения изученных золоторудных месторождений.

1 – Сибирская платформа; 2 – Центрально-Азиатский тектонический пояс; 3 – Монголо-Охотский орогенный пояс.

ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ОБЪЕКТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ

Бамское месторождение золота

Месторождение расположено в северной части Амурской области в 120 км к северо-западу от города Тынды и входит в Апсаканский золоторудный узел, который в региональном плане располагается в пределах Ларбинского блока Становой гранит-зеленокаменной области Алдано-Станового щита Сибирской платформы [1, 25]. Большая часть территории узла сложена мезозойскими гранитоидами. Существенно меньше в виде отдельных блоков размером до нескольких десятков км² встречаются архейские метаморфические породы, в различной степени мигматизированные. Золотое оруденение Бамского месторождения локализуется в гранитах Чубачинского интрузивного массива тукурингрского комплекса. Минерализованная зона месторождения протягивается почти на 3,5 км в субширотном направлении и включает около 20 рудных тел. Она получила название главной рудоносной зоны (ГРЗ). Ширина зоны выхода рудных тел на поверхность колеблется в интервале 200–500 м. Падение рудных тел – в южных румбах под углом в среднем 40°, в соответствии с крупным разломом, носящим название Чульбангринский надвиг и развитым по контакту гранитов и блока архейских метаморфических пород [1, 9, 12].

Рудные тела представлены в основном линейными зонами прожилково-сетчатого окварцевания с сульфидами в зонах березитизации, которые по паде-

нию и простиранию могут переходить в кварц-карбонатные жилы с сульфидами. Последние являются наиболее продуктивным типом руд на месторождении, составляют в рудных телах 10–20 % от общего объема. Их мощность изменяется от десятков сантиметров до 3–5 м и в единичных случаях до 10 м. Зоны прожилково-сетчатого окварцевания составляют основной объем рудных тел и характеризуются рядовыми содержаниями золота в первые граммы на тонну. Их мощность меняется от первых метров до десятков метров. Еще один тип рудных тел, имеющий подчиненное значение на месторождении, представлен минерализованными зонами дробления и брекчирования с глинистыми швами, с обломками кварца и березитизированными обломками гранитов и гнейсов.

Схематическое распределение кажущегося электрического сопротивления (КС) по данным дипольного электропрофилирования по сети 100×20 м с размером приемного диполя 20 м показано на рис. 2 А. Выходы на поверхность минерализованных зон месторождения располагаются в блоке с отчетливо пониженным уровнем электрического сопротивления (не более 2000 Ом·м) и в целом ГРЗ месторождения контролируется контрастной геоэлектрической границей с перепадом значений КС от 500–2000 Ом·м до 8000–10000 и более Ом·м. Минимальные значения сопротивления соответствуют зоне разлома, высокие значения КС отвечают блоку архейских пород. Зона развития рудных тел на поверхности располагается на удалении в несколько сот метров к северу от границы гранитов и метаморфических пород и характеризуется уровнем сопротивления 1000–2000 Ом·м. Минерализованная зона месторождения погружается на юг под высокоомный блок, и значительная часть рудных тел располагается под ним. Характерно, что в его пределах над рудными телами практически на всю изученную скважинами мощность (100–200 м) отсутствуют какие-либо гидротермальные изменения пород. Распределение электрического сопротивления на глубине по данным вертикального электрического зондирования (ВЭЗ) подтверждает этот вывод. В качестве примера приведен геоэлектрический разрез по данным ВЭЗ (инверсия автора программой ZondRes2D) по буровому профилю 13 (рис. 3). Здесь видны верхняя плохопроводящая часть разреза, мощность которой увеличивается к югу в соответствии с падением Чульбангринского надвига, и ее контрастная граница с нижележащими проводящими породами, представленными измененными гранитами. Рудные тела месторождения располагаются вблизи этой границы и погружаются на юг в соответствии с ее падением. Данный блок, по всей видимости, может рассматриваться как экран, ограничивавший проницаемую зону

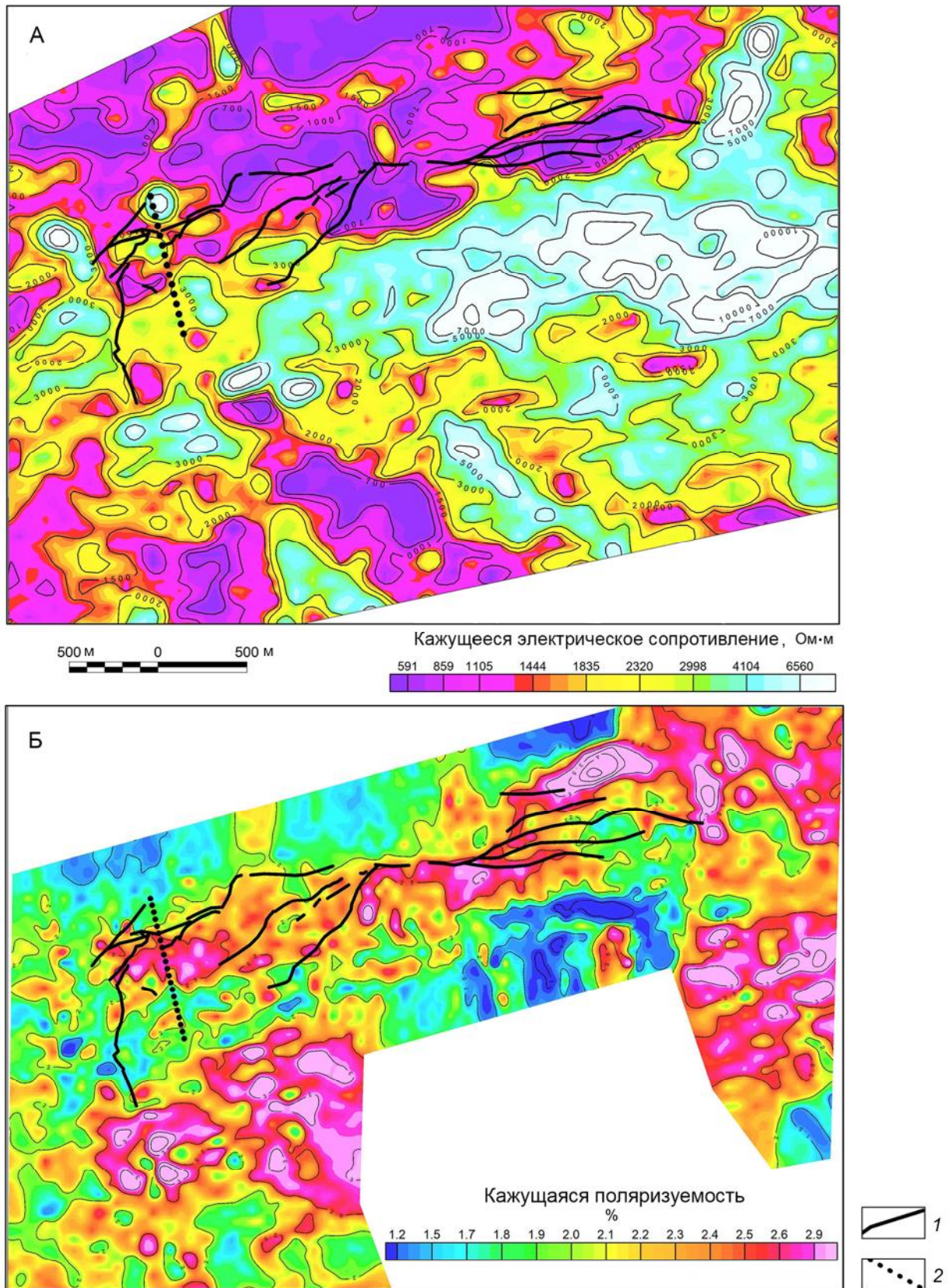


Рис. 2. Карта кажущегося электрического сопротивления (А), карта кажущейся поляризуемости (Б) Бамского месторождения золота, по [9].

1 – выходы рудных тел на поверхность; 2 – профиль ВЭЗ по буровой линии 13.

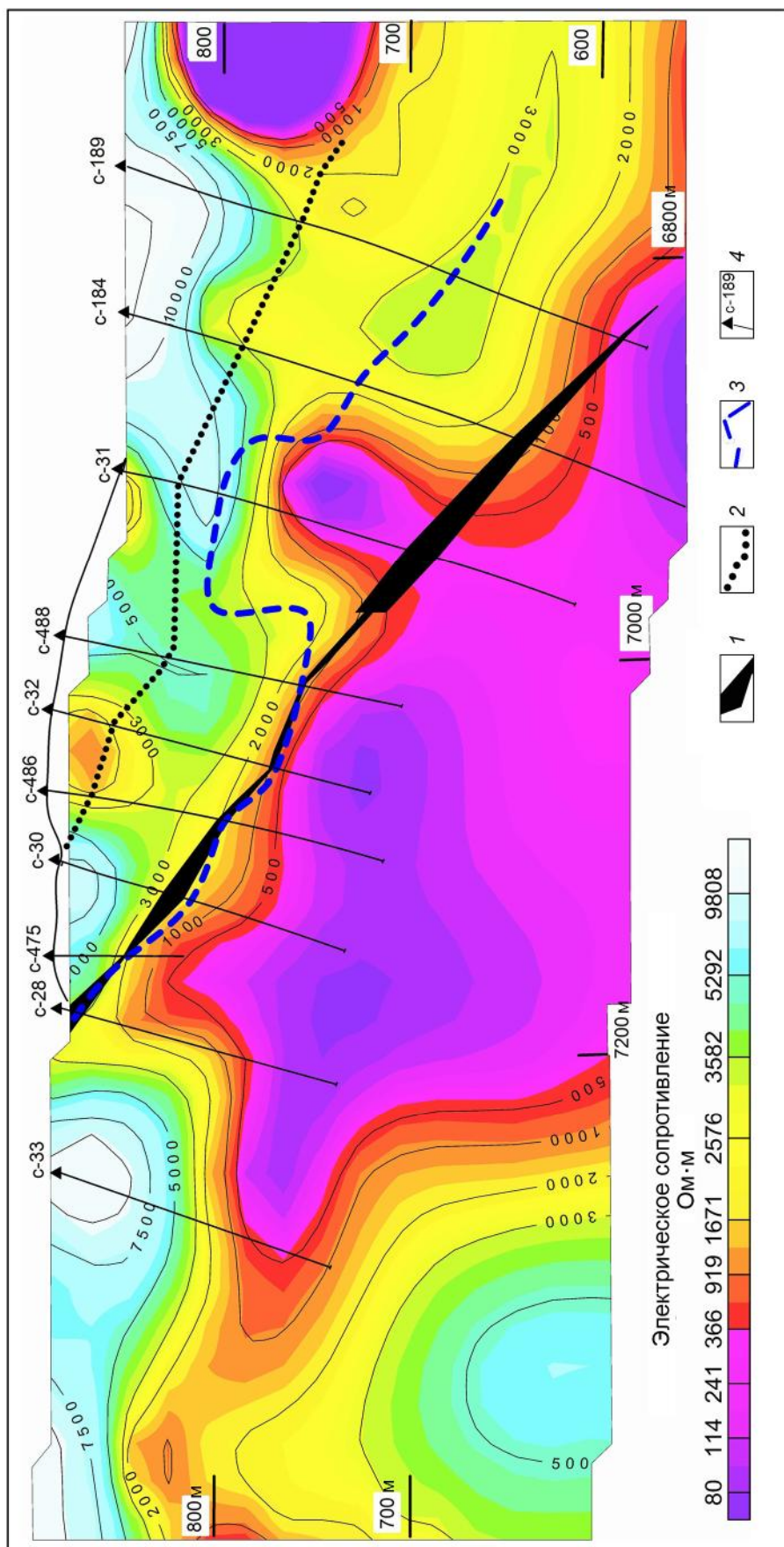


Рис. 3. Геоэлектрический разрез по буровой линии 13 Бамского месторождения. Построен автором по данным ООО ГРК «Апсакан» (2003 г.)

1 – рудное тело; 2 – нижняя граница распространения архейских метаморфических пород; 3 – нижняя граница интенсивного окварцевания; 4 – скважина и ее номер. Изолинии – в Ом·м.

разлома с сопутствующей ему трещиноватостью на этапе формирования месторождения. Рудные тела локализованы вдоль контрастной по электрическому сопротивлению границы пород.

Изучение поляризуемости района Бамского месторождения выполнено в модификации срединного градиента путем измерения фазового сдвига со станцией ВПФ по сети 100×10 м и с размером приемной линии 20 м (рис. 2 Б). Данная съемка проводилась позднее съемки методом сопротивлений и, к сожалению, на меньшей площади, что обусловило несовпадение контуров карт сопротивления и поляризуемости. Имеющиеся материалы позволяют сделать вывод, что как минерализованная зона Бамского месторождения в целом, так и отдельные рудные тела не фиксируются яркими аномалиями повышенной поляризуемости пород, что, в общем, соотносится с невысоким количеством сульфидов в рудных телах и метасоматитах месторождения. По данным изучения гидротермально измененных пород Бамского месторождения, общее количество сульфидов, представленных в основном пиритом, в березитизированных породах составляет 1–3 %. Содержание сульфидов в золотоносных образованиях по данным изучения 7 рудных тел составляет также 1–3 %, редко достигает 5–8 % и в исключительных случаях составляет 15 % (отдельные кварц-карбонат-сульфидные жилы). Сульфиды представлены в основном пиритом и халькопиритом, редко галенитом и сфалеритом (выборка автора по материалам ООО ГРК «Апсакан» за 1998–2003 годы).

По данным съемки незначительное повышение поляризуемости наблюдается над отдельными фрагментами минерализованной зоны, где рудные тела находятся на глубинах 30–50 метров, что отвечает, с одной стороны, отсутствию зоны окисления и, с другой – глубинности метода профилирования.

Вместе с тем на изученной площади наблюдается ряд более значительных повышений этого параметра, не имеющих отношения к золотоносности. Наиболее контрастная аномалия поляризуемости зафиксирована на северо-восточном фланге месторождения над штоком меловых гранодиоритов и связана с высокими концентрациями пирита. Сколь-либо значимых повышений золота в породах в контуре аномалии не наблюдается. Можно предположить, что образование пирита по времени было разобщено с главной стадией рудообразования и предшествовало ей. Подобного типа аномалии поляризуемости, с которыми не связана золотая минерализация, наблюдаются и юго-восточнее месторождения [13]. Еще один тип повышений поляризуемости связан с отдельными блоками

метаморфических пород. Связи с золотоносностью для этих аномалий также не установлено.

Березитовое месторождение золота

Березитовое золото-полиметаллическое месторождение расположено в Могочинском блоке Селенга-Станового орогенного пояса в составе Центрально-Азиатского тектонического пояса [15, 25]. Большая часть рудного поля сложена протерозойскими гранитами и гранодиоритами. В южной части в виде ксенолитов в раме массива гранитоидов картируются блоки амфиболовых габбро, имеющие размер до первых квадратных километров. Мезозойские магматические образования представлены дайками гранит-порфиров, гранодиорит-порфиров и explosивными брекчиями трубок взрыва риолитового состава [15]. Рудное тело Березитового месторождения представляет собой линзовидное тело explosивных брекчий мощностью 100–160 м, длиной 800 м, падающее на запад под углом 70–75°. Оно сложено хлорит-кварц-серицитовыми, кварц-серицитовыми, серицит-кварцевыми и серицит-кварц-полевошпатовыми метасоматитами, залегающими среди биотит-роговообманковых порфировидных гранодиоритов и гнейсовидных гранитов. С севера и юга тело рудовмещающих метасоматитов ограничено разломами широтного простирания. Руды месторождения содержат до 40 % сульфидов, главные из которых представлены пиритом, галенитом, сфалеритом, пирротинном, халькопиритом, арсенипиритом, станнином [9, 12, 19].

Для пород и метасоматитов месторождения в 1977–1981 гг. изучались электрическое сопротивление и поляризуемость. Эти данные были собраны из отчетов ПГО «Дальгеология» (авторы Аникин В.А., Баранский В.В., Копылов М.И.), обобщены и переработаны автором [12]. В этой же работе выполнен их детальный анализ. Здесь же представлены эти данные лишь в виде обобщенной диаграммы (рис. 4) и отмечены некоторые принципиальные моменты.

Основная информация об электрическом сопротивлении пород была получена по данным каротажа скважин, расположенных в пределах и по периферии месторождения, где практически все породы в той или иной мере затронуты гидротермально-метасоматическими изменениями. Поэтому, очевидно, гранодиориты, определяемые как неизменные, имеют просто наименьшую степень преобразования. Это объясняет относительно низкое значение электрического сопротивления «неизменных» гранодиоритов (около 2000 Ом·м) и его близость к сопротивлению пород, диагностированных как гидротермально измененные, но без существенного окварцевания (хлоритизация, кварц-серицитовые изменения). Для габбро,

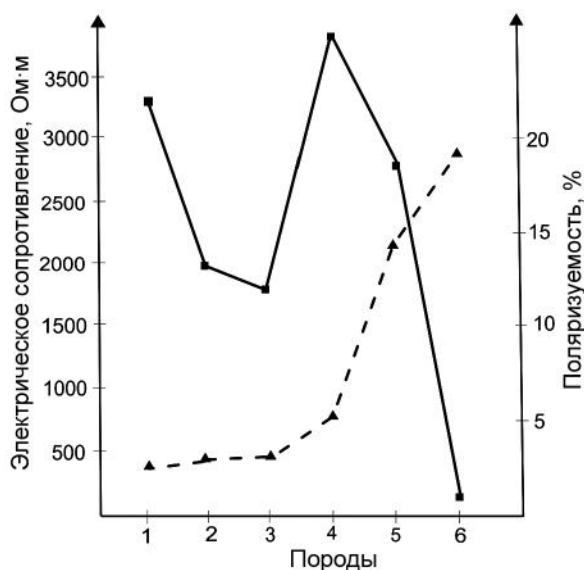


Рис. 4. Распределение геоэлектрических параметров для пород Березитового золоторудного месторождения.

Сплошная линия – кажущееся электрическое сопротивление, штриховая линия – поляризуемость.

Типы пород: 1 – неизменные гранодиориты, граниты вне пределов Березитового месторождения; 2 – неизменные гранодиориты в пределах месторождения; 3 – гидротермально измененный гранодиорит (пропилитизация); 4 – гранодиорит интенсивно окварцованный, сульфидизированный; 5 – метасоматит с сульфидами; 6 – сульфидная руда.

массивы которого расположены в нескольких километрах южнее, сопротивление составляет уже около 10 000 Ом·м. По данным автора подобные граниты и гранодиориты на соседних площадях имеют сопротивление не менее 5000 Ом·м. Необходимо подчеркнуть также существенное увеличение электрического сопротивления окварцованных пород и значительное его снижение для рудоносных образований относительно нормального фона вмещающих гранодиоритов.

По поляризуемости отчетливо видно ее нарастание для сульфидизированных гидротермально измененных пород и руд.

Кажущееся электрическое сопротивление, полученное по данным съемки методом срединного градиента в пределах рудного поля, значительно дифференцировано (рис. 5). Выделяются крупные блоки размерами в квадратные километры с различным его уровнем: от (2000–3000) Ом·м до 20000 Ом·м и более, хотя состав пород при этом остается неизменным. Месторождение находится в одном из наиболее высокоомных блоков, где сопротивление поднимается до 25 000 Ом·м. Его размер составляет примерно 3×2.5 км. Само же рудное тело месторождения Березитовое и окружающие его рудоносные кварц-серпичитовые метасоматиты отмечаются на этом высоком

фоне контрастной линейной зоной относительно пониженного электрического сопротивления (1000–3000) Ом·м. Она имеет протяженность до 1.5 км, ширину – 100–300 м. Собственно рудное тело внутри этой зоны характеризуется минимальными значениями кажущегося электрического сопротивления до 200 Ом·м. Высокое сопротивление гранитов вокруг месторождения связано с их окварцеванием, более ранним относительно времени формирования рудного тела месторождения. Гранитоиды, имеющие столь высокое электрическое сопротивление, должны, очевидно, характеризоваться минимальными значениями пористости и проницаемости [14] и могли выступать на этапе рудообразования в качестве экрана для гидротермальных растворов, что, в свою очередь, обусловило эффект стягивания растворов в узкую проницаемую зону и, в конечном итоге, формирование там высоких концентраций металлов [5].

Характерно, что те же граниты и гранодиориты к востоку и юго-востоку от месторождения на большой площади в несколько десятков квадратных километров характеризуются достаточно низким средним уровнем электрического сопротивления около 3000 Ом·м. Здесь также не наблюдается контрастных зон перепада уровня этого параметра, как на месторождении. Несколько детально изученных на этой площади участков со схожими с месторождением геологической обстановкой, гидротермальными изменениями пород и геохимическими ореолами (рис. 5) также характеризуются наличием понижений кажущегося электрического сопротивления. Но, в отличие от месторождения, они выделяются в целом на достаточно низком фоне (первые тысячи Ом·м), и контрастных границ по электрическому сопротивлению там не отмечается. По результатам изучения все эти участки являются, по сути, зонами рассеянной минерализации и не несут промышленно значимого оруденения. Это связано, по мнению автора, с отсутствием концентрирующей роли экрана, что соответствующим образом выражается в распределении электрического сопротивления.

Поляризуемость пород Березитового рудного поля полностью определяется количеством находящихся в них сульфидных минералов. Поэтому породы, в общем, могут быть разделены на две группы: разновидности, не содержащие сульфидов, которые характеризуются фоновыми значениями поляризуемости не более 3–4 %, и в различной степени сульфидизированные породы, для которых значения этого параметра лежат в пределах от 5 % и до 60 %. Наиболее высокие значения поляризуемости имеют интенсивно сульфидизированные гранодиориты, рудоносные метасоматиты и собственно руды. При этом необходимо отметить, что сульфидная минерализация,

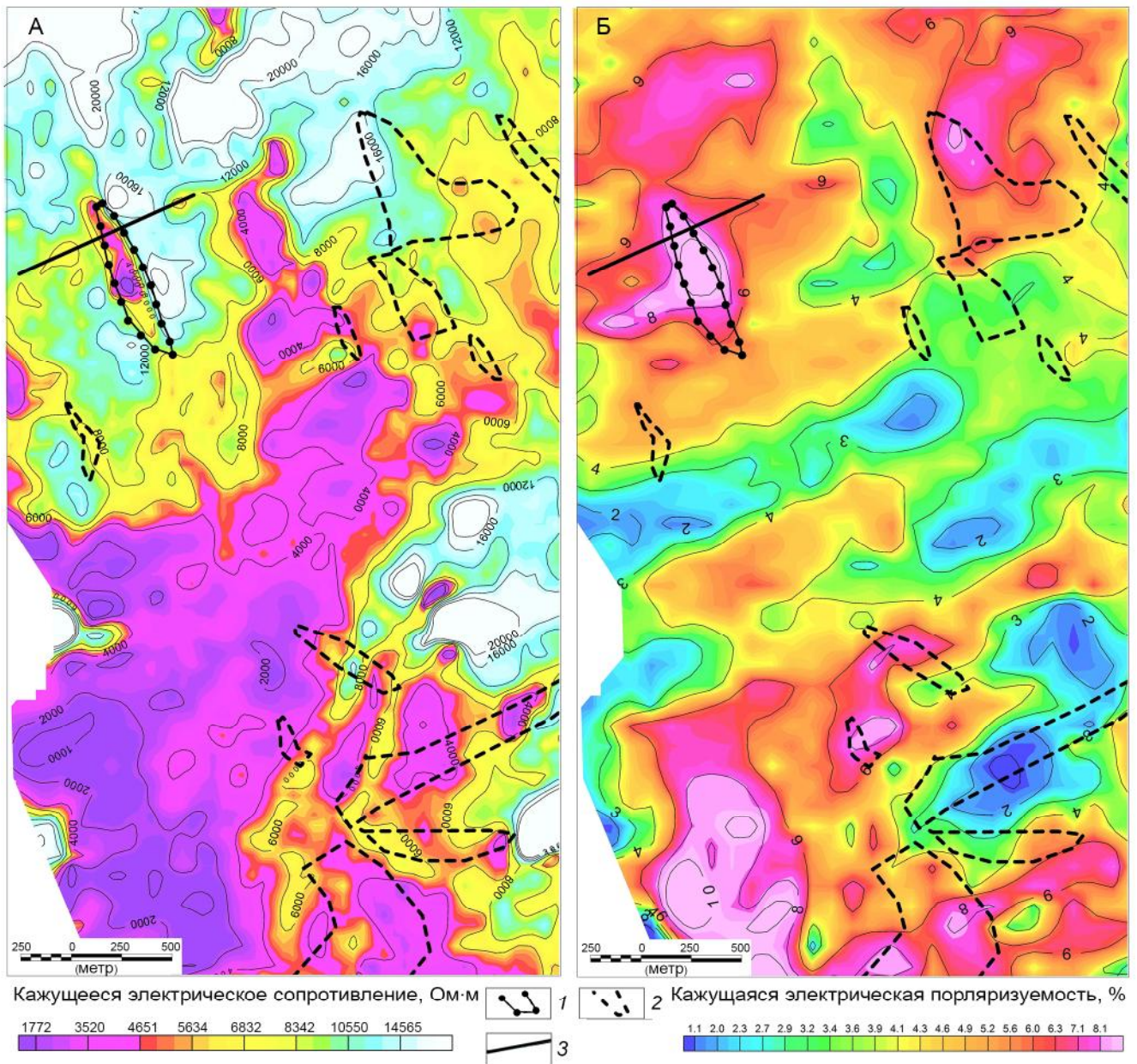


Рис. 5. Карты кажущегося электрического сопротивления (А) и кажущейся поляризуемости (Б) Березитового рудного поля. Построены автором по материалам Геофизической экспедиции ПГО «Дальгеология» (1981г).

1 – контур рудоносных метасоматитов Березитового месторождения; 2 – границы прочих минерализованных зон; 3 – линия геоэлектрического разреза через Березитовое месторождение по данным ВЭЗ-ВП.

наблюдаемая в породах, отвечает двум ассоциациям: преимущественно пиритовая, иногда с пирротинном, характерная для гранодиоритов по периферии рудного тела, интенсивность которой увеличивается при приближении к рудным телам, и сульфидная минерализация рудоносных метасоматитов, в которой присутствуют галенит, сфалерит, халькопирит, станнин, увеличивается количество пирротина [12, 29]. Сульфидная минерализация первой группы характеризует

дорудную стадию гидротермально-метасоматических изменений, объем интенсивно сульфидизированных гранодиоритов существенно превышает объем собственно рудного тела и является, по сути, областью интенсивной дорудной проработки пород. Сульфидные минералы второй группы отвечают рудному этапу гидротермальных изменений. Таким образом, повышенной поляризуемостью обладают как вмещающие сульфидизированные гранодиориты (изменения до-

рудного этапа), так и сульфидизированные кварц-серицитовые метасоматиты, включая собственно рудные тела.

По данным съемки методом вызванной поляризации в модификации срединного градиента Березитовому месторождению соответствует аномалия поляризуемости интенсивностью до 12 %, а над узкими сульфидными жилами и до 40 % (рис. 5). По данным профильных наблюдений по методу вызванной поляризации в модификации вертикального электрического зондирования (ВЭЗ-ВП) данная аномалия уверенно прослеживается на глубину, и ее центральная наиболее интенсивная часть соответствует рудному телу (рис. 6). Но в целом аномалия по размеру превышает его и охватывает прилегающие области, где развита почти исключительно пиритовая минерализация.

Отметим, что к югу от месторождения фиксируются аномалии поляризуемости, не имеющие отношения к золото-полиметаллической минерализации и связанные с телами габбро (рис. 5).

Таким образом, из рассмотрения поляризуемости по Березитовому рудному полю можно сделать некоторые выводы:

1. Руды и метасоматиты месторождения содержат большое количество сульфидных минералов, достаточное, чтобы рудное тело напрямую выделялось значительным повышением поляризуемости.

2. Повышением поляризуемости выделяется как продуктивная сульфидная минерализация, так и области сульфидизации дорудного этапа, не несущие золотой минерализации.

3. В пределах рудного поля имеются аномалии поляризуемости, связанные с определенными типами горных пород и не имеющие отношения к наложенным гидротермальным изменениям.

Покровское месторождение золота

Покровское месторождение расположено в северной краевой части Аргуно-Мамынского массива в пределах Умлеканской подзоны Дахинганского позднеюрско-раннемелового вулканического пояса [25]. Месторождение находится в Сергеевской вулканотектонической структуре и связано с проявлением процессов раннемелового вулканизма. Основные рудные тела месторождения локализируются в субгоризонтальной зоне трещиноватости внутри пластины раннемеловых гранитов вблизи жерла палеовулкана, выполненного дацитовой экструзией, от которой на расстояние до нескольких километров отходят силлы дацитов. Наиболее продуктивные рудные тела месторождения ограничивались снизу силлом дацитов небольшой мощности. Верхние части рудных тел эпизодически выходили на поверхность. Для место-

рождения характерно широкое проявление процессов аргиллизации и окварцевания. Собственно рудные тела представляли собой интенсивно окварцованные и карбонатизированные породы вплоть до собственно кварцевых и кварц-карбонатных жил. Рудные тела характеризовались небольшим количеством сульфидов, количество рудных минералов составляло в среднем 0.5–1 % [8, 12, 29].

Для Покровского месторождения по данным работ Геофизической экспедиции ПГО «Дальгеология» за 1979–1984 годы имеется информация об электрических параметрах горных пород (авторы отчетов Аникин В.А., Русаков Н.И). Сведения об электрическом сопротивлении были получены на основании данных электрокаротажа скважин и параметрических ВЭЗ на скважинах, о поляризуемости – на основании измерения образцов. Эти данные были сведены и переобработаны автором в работе [12].

Обобщенные данные об электрических свойствах пород района Покровского месторождения приведены в таблице.

Надо отметить, что для нескольких сульфидизированных образцов была зафиксирована поляризуемость 5–11.5 %.

Электрическое сопротивление пород отличается в целом низкими значениями, что связано с тем, что эти данные получены по скважинам, которые пробурены практически в пределах месторождения, где говорить о неизменных породах затруднительно. Как и в предыдущем случае, более правильным будет считать их наименее измененными породами, определяющими фон рудного поля. Данные автора по аналогичным вулканикам за пределами Покровского рудного поля свидетельствуют, что электрическое сопротивление действительно неизменных пород может быть оценено в несколько раз выше, что особенно касается лавовых и субвулканических разновидностей [12].

Также необходимо отметить, снижение сопротивления за счет трещиноватости пород: по данным каротажа кажущееся электрическое сопротивление гранитов, в минимальной степени затронутых гидротермальными изменениями, составляет в среднем 1000 Ом·м, а для аналогичных трещиноватых гранитов оно снижается до 156 Ом·м. Точно так же сопротивление интенсивно трещиноватых кварц-карбонатных жил снижается до 300 Ом·м.

Но даже при общем пониженном фоне электрического сопротивления достаточно отчетливо просматриваются основные закономерности, необходимые для понимания физических полей месторождения. Практически важно многократное повышение электрического сопротивления для окварцованных разно-

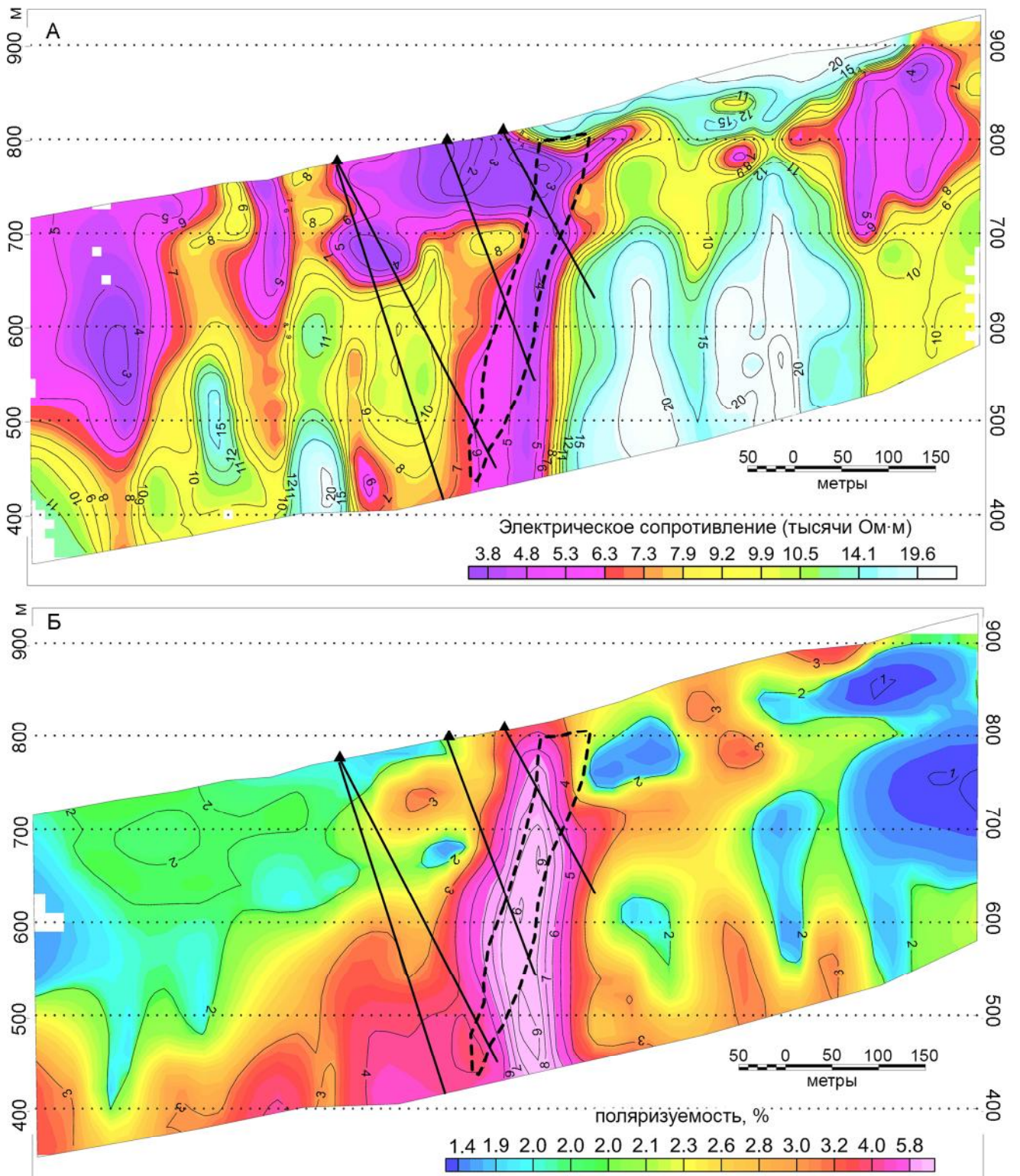


Рис. 6. Геоэлектрические разрезы через северную часть Березитового месторождения золота по данным ВЭЗ-ВП. По материалам Геофизической экспедиции ПГО «Дальгеология» за 1978–81 гг. (авторы Аникин В. А., Баранский В. В.). А – кажущееся электрическое сопротивление; Б – кажущаяся поляризуемость. Штриховая линия – контур рудного тела. Треугольники с линиями – буровые скважины.

Таблица. Средние значения электрического сопротивления и поляризуемости для пород Покровского месторождения золота.

Породы	Электрическое сопротивление, среднее значение, Ом·м	Поляризуемость, %
Неизмененные породы		
Вулканогенные покровные образования (лавы и туфы смешанного состава)	103	1.97
Субвулканические образования	223	
Осадочные породы	385	2.4
Сергеевский гранит	1000	2.25
Гидротермально измененные породы		
Аргиллизированные породы	Нет достаточных данных, но характерно существенное уменьшение электрического сопротивления, так для гранитов оно лежит в интервале 16–75 Ом·м	Нет достаточных данных, но в целом значения близки к фоновым, так для каолинизированных гранитов значение составляет 1.9
Окварцованные породы		
Риолиты гидротермально измененные	нет данных	2.8
Андезито-дациты гидротермально-измененные	нет данных	2.2
Андезиты окварцованные	425	нет данных
Андезиты с вкрапленностью сульфидов	нет данных	2.3
Интенсивно окварцованная вулканогенная порода	876	1.2
Граниты окварцованные	1200	нет данных
Гранит с вкрапленностью сульфидов	нет данных	2.7
Брекчии на кварцевом цементе	660	нет данных
Кварц трещиноватый	300	нет данных
Мерзлые породы	Более 1000	

видностей пород и относительно высокое сопротивление гранитов Сергеевского массива. Также надо определенно отметить, что поляризуемость пород в целом остается достаточно низкой для всех разновидностей и отдельные образцы с высокими ее значениями являются исключением.

Состав рудных тел и их повышенное электрическое сопротивление определяют соответствующее проявление месторождения в результатах наземной электроразведки. Распределение кажущегося электрического сопротивления в пределах месторождения для разных разносов симметричной установки показано на рис. 7. Интенсивные повышения сопротивления над неглубоко залегающими частями рудных тел на разносе АВ = 100 м достаточно очевидны, определяются их кварцевым и кварц-карбонатным составом и не нуждаются в дополнительных комментариях. Также надо отметить, что часть повышений связана с мерзлотой, развитой по долинам ручьев.

Более важно, по мнению автора, то, что при увеличении разносов характер распределения сопротивления меняется, появляется четко выраженная граница субширотной ориентировки, разделяющая два блока с различным уровнем электрического сопротивле-

ния (высокое – в северном блоке, низкое – в южном) и прослеживающаяся на несколько километров в обе стороны от месторождения. Особенно контрастно она проявляется на разносе АВ = 1000 м. Основные рудные тела месторождения локализируются над данной геоэлектрической границей. Исчезает она только на разносах АВ = 6000 м, что соответствует глубине около 1.5 км. Данная граница фиксирует субвертикальный контакт двух блоков с различными электрическим сопротивлением и физико-механическими свойствами пород, в частности проницаемостью. Блок с относительно повышенным сопротивлением отвечает пластине гранитов Сергеевского массива. К югу от данной границы расположен Сергеевский палеовулкан. Можно предположить, что на рассматриваемом участке данная геоэлектрическая граница являлась важным элементом, определявшим гидродинамические особенности действовавшей гидротермальной системы, выполняя функцию барьера, ограничивавшего латеральное распространение гидротермальных растворов, способствуя их концентрации на этой границе, с последующим перемещением вверх и дальнейшей разгрузкой по вышележащим пологим проницаемым зонам.

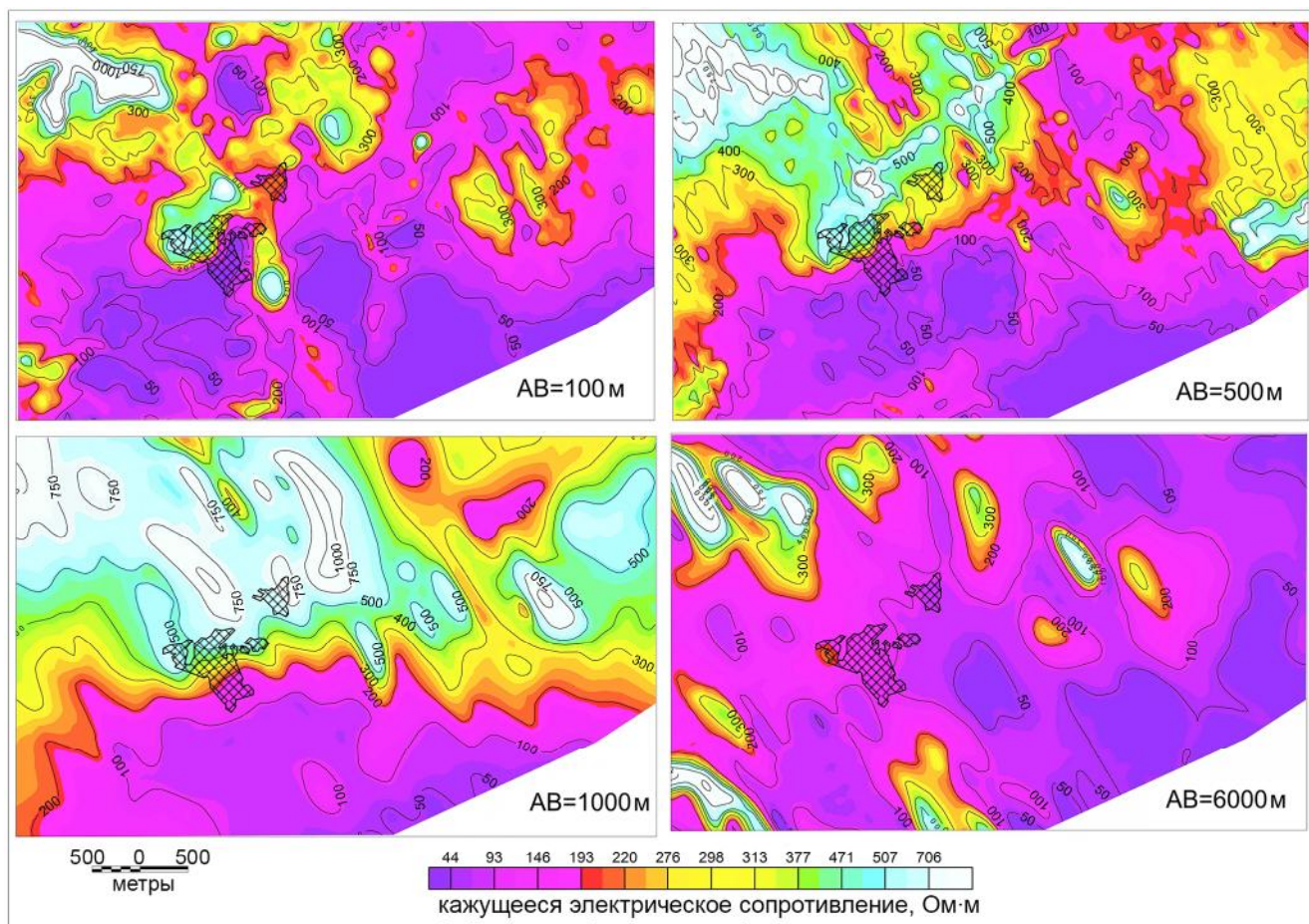


Рис. 7. Карты кажущегося электрического сопротивления района Покровского месторождения золота для разных размеров питающей линии.

AB – разнос питающих электродов симметричной четырехэлектродной установки. По [4]. Заштрихованный контур – проекция на поверхность золоторудных тел.

На рис. 8 показано распределение кажущейся поляризуемости в районе месторождения по данным наземной съемки методом срединного градиента. Данная сводная карта составлена автором по результатам многочисленных съемок 1978–1984 годов, выполненных Геофизической экспедицией ПГО «Дальгеология». Необходимо совершенно определенно сказать, что рудные тела Покровского месторождения не отображаются какими-либо повышениями кажущейся поляризуемости, что обусловлено малой концентрацией сульфидов как в них, так и в гидротермально измененных породах. Это же подтверждается и фоновыми значениями поляризуемости по образцам. Только на северо-восточном фланге месторождения отмечаются несколько слабых повышений небольшого размера, которые могут быть связаны с минерализованными зонами.

Максимальные же значения поляризуемости до 5–8 % на изученной площади связаны с юрскими

осадочными породами (высокая пористость, сульфидизация, прослои углистых алевролитов) и не имеют отношения к золоторудной минерализации. Вмещающий месторождение блок гранитов смотрится на этом фоне в целом пониженными значениями поляризуемости (не более 3–4 %).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Рассмотренные материалы показывают, что, несмотря на разнообразие месторождений с точки зрения их геологических особенностей, условий рудообразования, вмещающих пород и наложенных гидротермальных изменений, распределение электрических параметров в их пределах имеет ряд общих черт, что связано с единым гидротермальным генезисом объектов и подобием локализации месторождений с точки зрения физико-механических свойств пород.

Электрическое сопротивление пород является важным петрофизическим параметром, характе-

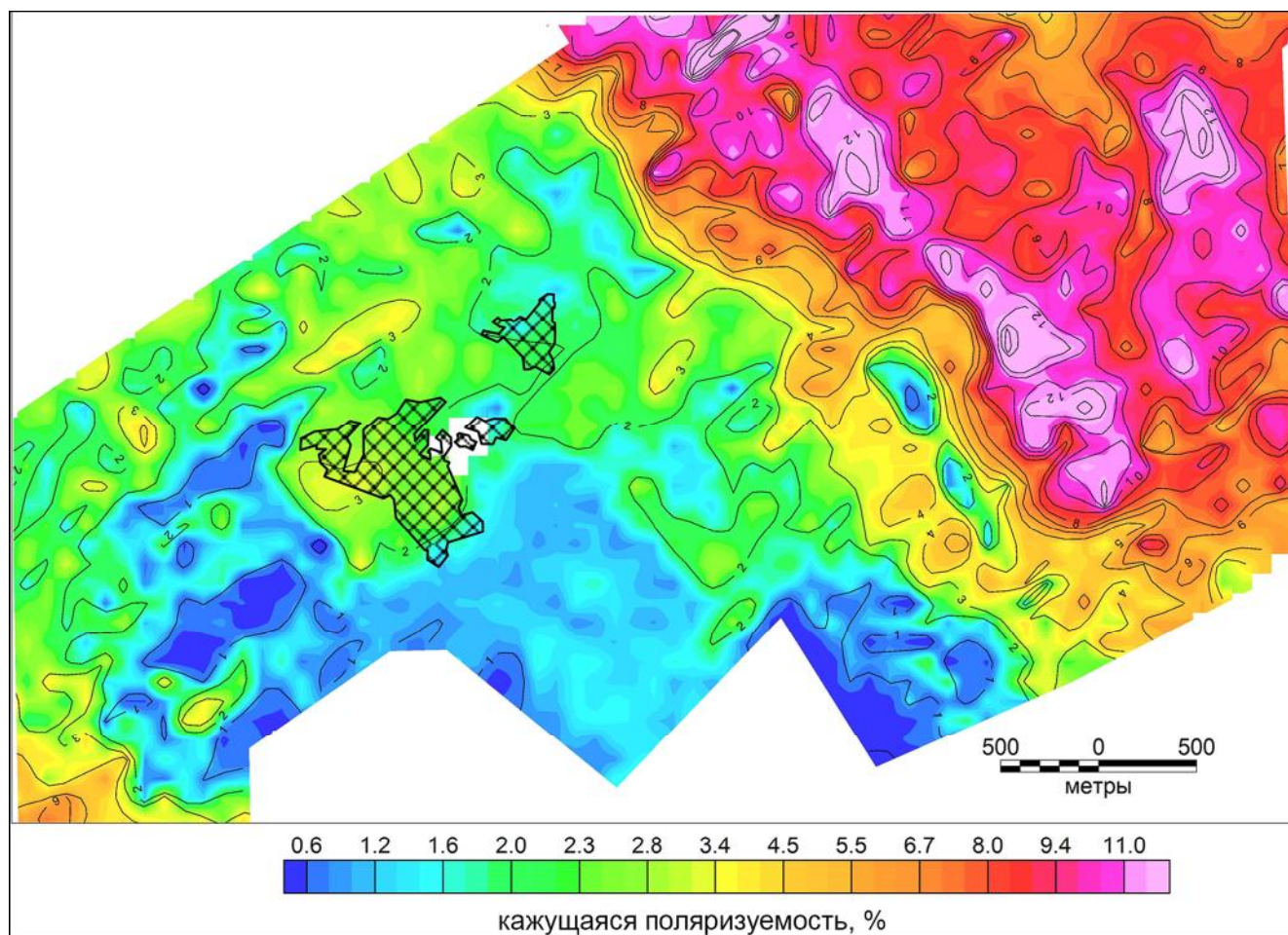


Рис. 8. Карта кажущейся поляризуемости района Покровского месторождения. Составлена автором по результатам съемок Геофизической экспедиции ПГО «Дальгеология» за 1978–84 гг. Заштрихованный контур – проекция на поверхность золоторудных тел.

ризирующим в значительной степени их пористость и проницаемость [14]. Оно зависит от ряда факторов. Во-первых, это группа структурных факторов, определяемых пустотностью изучаемого объема горных пород, обусловленной системами трещин различных размеров и пористостью пород, во-вторых – общая влагонасыщенность изучаемого разреза. Непосредственное влияние сульфидов на электропроводность может наблюдаться при их концентрации в породе более 20–30 %, и для подавляющего большинства золоторудных месторождений неактуально.

Важно также то, что данные по электрическому сопротивлению есть практически для всех потенциально рудоносных площадей, где выполнялись поиски коренного золота, тогда как данные по поляризуемости встречаются гораздо реже.

Для минерализованных зон месторождений характерно сонахождение с контрастными геоэлектрическими границами пород, контактами высокоомных и низкоомных блоков. При этом сами рудные тела в

зависимости от типа гидротермальных изменений могут проявляться и как локальные повышения сопротивления, и как понижения, или обладать промежуточным уровнем сопротивления.

Данную позицию месторождений можно трактовать как их приуроченность к областям резкой смены физико-механических свойств пород, в частности пористости и проницаемости, к определенным физико-механическим барьерам, которые оказывали действие на гидродинамические особенности палеогидротермальной системы, циркуляцию гидротермальных рудообразующих растворов и локализацию оруденения. Вопросы гидродинамики гидротермальных растворов для подобных ситуаций достаточно детально разобраны и смоделированы в работе [5]. Результаты изучения показывают, что участки резкого изменения проницаемости разреза обуславливают гидродинамическую перестройку течения. В частности, один из основных выводов сводится к тому, что локальные проницаемые участки экранирующей поверхности обладают эффек-

том стягивания гидротермальных растворов с большей площади, способствуют их концентрации в таких участках, определяя, в конечном итоге, количество перенесенного раствора и отложенного металла.

Подобными плохо проницаемыми барьерами могут быть не только тела пород определенного типа, но и участки пород, которые приобрели данные свойства в результате наложения гидротермальных изменений на этапах, предшествующих рудоотложению. Возможно, что там, где отсутствуют относительно плохо проводящие блоки-экраны, высока вероятность наличия зон рассеянной минерализации при наличии даже интенсивных гидротермальных изменений пород. Им в этом случае будут отвечать области пониженного электрического сопротивления.

Таким образом, можно предложить следующую интерпретацию рассмотренных неоднородностей. Контрастная граница по электрическому сопротивлению – наличие блоков пород с высоким электрическим сопротивлением – участки пород с низкой проницаемостью (экраны) – их влияние на гидродинамику палеогидротермальной системы на этапе рудообразования – концентрация гидротермальных растворов или в трещинных структурах, или под плохо проницаемым экраном – повышенное отложение металла – формирование концентраций полезного компонента, отвечающих месторождению.

Надо сказать, что подобное распределение электрического сопротивления, вероятно, характерно для многих месторождений гидротермального генезиса. Так автором ранее детально изучались петрофизические характеристики гидротермальных урановых месторождений в вулканогенных структурах юга Буреинского массива [11]. В этой работе было показано, что богатые урановорудные тела наиболее продуктивного уровня локализации в нижней части экстрезий афировых риолитов имеют место только там, где над ними наблюдаются блоки плотных, с высоким электрическим сопротивлением пород, которые обладают явно выраженными экранирующими свойствами. На участках, где подобные плохо проводящие породы отсутствуют, даже при самой высокой степени гидротермального изменения пород встречаются только аномальные ореолы урана с максимальными содержаниями до первых сотых процента. В работе было показано, что подобные области плотных плохо проводящих пород образуются в процессе остывания вулканогенных тел на расстоянии около 100 м от подошвы и являются элементом их первичной петрофизической зональности.

Таким образом, отметим еще раз, что важным интерпретационным элементом данных электрического сопротивления при поисках гидротермальных

месторождений золота должны быть контрастные геоэлектрические границы и области аномально высоких значений сопротивления. Они в одних случаях могут быть связаны с контактами различных пород, в других – определяться наложенными гидротермально-метасоматическими изменениями пород и тектонической нарушенностью отдельных блоков. Морфологические особенности и элементы залегания данных границ могут быть самыми разнообразными, поэтому важно изучение их на глубину дополнительными методами электроразведки. Также надо учитывать, что минерализованными могут быть только отдельные фрагменты этих границ протяженностью в сотни метров, тогда как геохимические ореолы и гидротермально измененные породы бывают развиты гораздо шире. Продуктивная минерализация может отстоять от этих границ на первые сотни метров. В зависимости от типа минерализации рудоносные участки могут дополнительно отмечаться повышениями поляризуемости.

Также надо отметить, что при интерпретации данных методов сопротивлений и особенно профилирования нужно ясно представлять влияние природных условий на состояние пород в верхней части разреза, в первую очередь существенное увеличение электрического сопротивления под влиянием мерзлоты, широко развитой в северных районах Приамурья.

В связи с интерпретацией данных поляризуемости также необходимо отметить ряд важных аспектов, которые определяют в конечном итоге эффективность проводимых съемок.

Очевидно, что существует ряд золоторудных месторождений, где минерализованные зоны содержат минимальное количество сульфидных минералов и использование съемки методом вызванной поляризации (ВП) малоэффективно. Речь в первую очередь идет об эпитептермальных месторождениях золота в вулканогенных структурах. Но при этом существует ряд внешних факторов, которые снижают возможность выделения аномалий поляризуемости. Основным из них является наличие зоны окисления. Однако в условиях Приамурского региона она, как правило, невелика, составляет метры-первые десятки метров и даже для стандартных съемок методом срединного градиента или симметричного профилирования не является большой помехой для выявления сульфидизированных тел.

Наличие в пределах изучаемых площадей геологических образований, изначально обладающих высокой поляризуемостью, обуславливает появление «ложных» с точки зрения поисков золоторудной минерализации аномалий. В условиях Верхнего Приамурья можно отметить три главные группы подобных аномалиеобразующих пород. Во-первых, это некоторые разновидности метаморфических по-

род Становой гранит-зеленокаменной области, в той или иной мере насыщенных углеродом. Аномалии поляризуемости, связанные с ними, могут достигать значений в десятки процентов и быть помехой при выделении областей сульфидизации. Во-вторых, довольно часто высокая поляризуемость характеризует базит-гипербазитовые интрузии в различных структурных обстановках, что связано с повышенным содержанием в них магнетита и в ряде случаев сингенетической сульфидной минерализацией. В-третьих, высокая поляризуемость характерна для некоторых разновидностей палеозойских и особенно мезозойских осадочных образований, обладающих высокой пористостью и содержащих прослой углефицированных пород. На фоне кристаллических пород многие осадочные образования будут обладать относительно повышенными ее значениями. Соответственно даже при поисках месторождений золота с типом руд, насыщенных сульфидами и создающих контрастные повышения поляризуемости, надо учитывать возможное наличие непродуктивных аномалий.

Также важен вопрос соотношения областей сульфидизации пород с продуктивной золотой минерализацией. Он, по сути, является одним из ключевых при интерпретации результатов съемок методом ВП. Имеющиеся данные показывают, что в пределах рудных полей возможно наличие ореолов сульфидной минерализации, с которыми не связана золотая минерализация и которые сформированы на дорудных стадиях гидротермального процесса. С этой точки зрения данные аномалии не представляют прямого поискового интереса.

Таким образом, аномалии поляризуемости, полученные при съемках методами ВП нуждаются в предварительной оценке и разбраковке для выбора первоочередных под заверочные работы. Очевидным путем решения этого вопроса является анализ имеющейся геологической и геохимической информации. Но, рассматривая вопросы неоднозначности интерпретации аномалий поляризуемости, необходимо также подчеркнуть, что существует ряд геофизических и геоэлектрохимических методов, которые могут достаточно эффективно быть использованы для оценки и заверки природы аномалий поляризуемости.

В первую очередь необходимо отметить метод ранних стадий вызванной поляризации (РСВП). При работах данным методом кроме кажущихся электрического сопротивления и поляризуемости вычисляется величина Sk , называемая приведенной скоростью нарастания вызванной поляризации (ВП) и измеряемая в $мс^{-1}$ [7]. Данный параметр дает возможность достаточно уверенно разделять аномалии поляризуемости сульфидной и углисто-графитистой природы.

Также в ряде случаев возможно разделение сульфидной минерализации на пиритовую и полиминеральную сульфидную, характерную для минерализованных зон [3, 7, 20, 23].

Во-вторых, в последние годы стало широко применяться изучение временных или частотных характеристик ВП, что получило название спектральная модификация метода ВП. Эти измерения позволяют оценивать текстурно-структурные особенности пород, содержащих электропроводящие минералы, а также выделять породы, различающиеся степенью гидротермальных изменений. Анализ временных или частотных характеристик ВП в ряде случаев позволяет существенно повысить достоверность геологической интерпретации результатов электроразведки методом ВП, а в некоторых случаях получить новую информацию о текстурно-структурных особенностях пород [6, 24, 26].

Также существует целая группа электрохимических методов, которые могут быть использованы при заверке аномалий поляризуемости. Они связаны с изучением геохимических ореолов рассеяния, образующихся за счет восходящей струйной миграции элементов, находящихся в подвижных ионных формах и аккумулируемых в почве. Эти методы обеспечивают повышенную глубинность изучения и соответствие элементного состава наложенных ореолов вещественному составу руд [16, 17, 28].

В первую очередь среди них нужно отметить метод частичного извлечения металла (ЧИМ) [17]. Наиболее удачные примеры применения данного метода известны для месторождений никеля, меди, олова, полиметаллов. При поисках месторождений золота метод применялся в меньшей мере, однако есть примеры его успешного использования на территории Дальнего Востока и для этого металла [7, 17, 18, 21, 23]. Это позволяет рекомендовать его в комплекс поисковых работ как необходимый элемент оценки аномалий поляризуемости.

Из других геоэлектрохимических методов для оценки аномалий ВП при поисках месторождений золота могут быть рекомендованы термомагнитный геохимический метод (ТМГМ), основанный на изучении закономерностей распределения химических элементов, связанных с гидроксидами железа и марганца в почвах [4, 27], и метод диффузионного извлечения (МДИ), основанный на электрохимическом извлечении электроподвижных форм нахождения элементов в земле под действием природных диффузионно-адсорбционных потенциалов [16, 18, 22, 23, 28].

Также надо подчеркнуть, что, как и в случае с электрическим сопротивлением, важно прослежива-

ние аномалий поляризуемости на глубину, изучение их морфологических особенностей и соотношения с геологическими границами в разрезе. Для этого достаточно пересечь аномалию несколькими профилями электротомографии [2] с любой установкой, обеспечивающей необходимую глубину и детальность изучения разреза. Это тем более актуально, что в последнее десятилетие электротомография прочно вошла в комплекс электроразведочных работ на Дальнем Востоке.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Широкое использование электроразведки методом вызванной поляризации при поисках месторождений золота определило необходимость еще раз рассмотреть проявление известных месторождений золота Приамурья в результатах съемок методом сопротивлений и ВП и оценить подход к интерпретации результатов съемок.

Также необходимо еще раз подчеркнуть важность тщательной интерпретации электрического сопротивления. Проведенный анализ показывает, что при поисках гидротермальных месторождений золота важным интерпретационным элементом должны являться контрастные границы в распределении электрического сопротивления, которые могут быть интерпретированы как области резкой смены физико-механических свойств пород, потенциально благоприятные для рудокализации. Это не отменяет выделения других геологических элементов интерпретации, но может существенно дополнить информацию при выделении перспективных обстановок для концентрации дальнейших поисковых работ.

Для месторождений золота, в которых рудные тела содержат сульфидную минерализацию, аномалии поляризуемости являются важным поисковым фактором и должны быть объектом для детальных поисковых работ. Однако рассмотренные данные показывают неоднозначность интерпретации аномалий поляризуемости как с точки зрения аномалиеобразующих источников, так и с точки зрения соотношения сульфидной минерализации с продуктивной золотой. Этот факт обуславливает необходимость дополнительного анализа и оценки аномалий поляризуемости путем постановки геоэлектрхимических методов для выявления их природы.

Безусловно, каждое месторождение индивидуально, в том числе и с точки зрения его геоэлектрических характеристик. Однако автор одновременно с показом особенностей отдельных объектов стремился найти общие черты в распределении физических параметров, присущие месторождениям как предста-

вителям объектов одного гидротермального класса, и наметить общие пути использования данных метода вызванной поляризации при поисках месторождений золота на слабо изученных площадях.

Автор надеется, что рассмотренный материал будет способствовать более квалифицированной интерпретации электроразведки в пределах рудных полей и в целом повышению эффективности использования геофизических методов при поисках гидротермальных месторождений в Приамурье.

Автор выражает благодарность Б. Л. Столову, сделавшему ряд ценных замечаний, способствовавших улучшению настоящей работы.

Работа выполнена в рамках плана НИР Института тектоники и геофизики ДВО РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бамское золоторудное месторождение (геология, минералогия, геохимия) / В.А. Степанов, В.Е. Стриха, А.А. Черемисин и др. // Труды АмурКНИИ. Вып. 1. Владивосток: Дальнаука, 1998. 209 с.
2. Бобачев А.А., Горбунов А.А., Модин И.Н., Шевнин В.А. Электротомография методом сопротивлений и вызванной поляризации // Приборы и системы разведочной геофизики. 2006. № 2. С. 14–17.
3. Валяев В.П. Совершенствование методики, способов интерпретации и исследование геологической информативности ранней стадии вызванной поляризации (на примере сульфидных месторождений киргизского Тянь-Шаня): Дис. ... канд. геол.-минер. наук. Иркутск, 1990.
4. Ворошилов Н.А., Ворошилова Л.Н. Применение термоманнитного геохимического метода (ТМГМ) при поисках рудных месторождений. Методы интерпретации результатов литохимических поисков. М.: Наука, 1987. С. 135–141.
5. Геологическая среда и структурные условия гидротермального рудообразования. М.: Наука, 1982. 220 с.
6. Гурин Г.В., Ильин Ю.Т., Тарасов А.В., Титов К.В. Спектральная характеристика вызванной поляризации вкрапленных руд // Вестн. СПбУ. Сер. 7, геология, география. № 1. С. 14–30.
7. Карасев А.П., Птицин А.Б., Юдицкий Е.Ю. Быстрые переходные процессы вызванной поляризации. Новосибирск: Наука, 2005. 281 с.
8. Мельников А.В., Степанов В.А. Рудно-россыпные узлы южной части Приамурской золотоносной провинции. Благовещенск: Изд-во АмГУ, 2013. 220 с.
9. Мельников А.В., Степанов В.А. Рудно-россыпные узлы Приамурской золотоносной провинции. Ч. 2. Центральная часть провинции. Благовещенск: Изд-во АмГУ, 2014. 298 с.
10. Мельников А.В., Степанов В.А. Рудно-россыпные узлы Приамурской золотоносной провинции. Ч. 3. Северная часть провинции. Благовещенск: Изд-во АмГУ, 2015. 254 с.
11. Носырев М.Ю. Петрофизическая зональность гидротермальных месторождений в вулкано-тектонических структурах юга Буреинского массива (на примере Каменушинской вулкано-тектонической структуры): Дис. ... канд. геол.-минер. наук. Хабаровск: ИТиГ ДВО РАН, 1993. 132 с.
12. Носырев М.Ю., Варнавский А.В., Громаковский И.Ю. и др.

- Отчет о научно-исследовательских работах «Прогнозная оценка территории Амурской области на рудное золото путем исследования геофизическими методами глубинного строения золоторудных районов и разработки физико-геологических моделей золоторудных месторождений». Отчет за 1995–2000 г.г. Благовещенск: ФГУГП «Амургеология», 2000. 319 с.
13. Носырев М.Ю. Геофизические характеристики Бамского золоторудного месторождения (Верхнее Приамурье) и их использование при прогнозировании и поисках месторождений золота // Тихоокеан. геология. 2016. Т. 35, № 6. С. 69–80.
 14. Петрофизика: Справочник в трех книгах. Кн. первая. Горные породы и полезные ископаемые. М.: Недра, 1982. 391 с.
 15. Петрук Н.Н., Шилова М.Н., Козлов С.А. и др. Государственная геологическая карта Российской Федерации. 1:1 000 000. Третье поколение. Лист N-51 (Сковородино). Объясн. зап. СПб, 2008.
 16. Применение геоэлектрохимических методов для поисков золота на Олимпиаденском месторождении. Презентация. <http://www.myshared.ru/slide/1271405/>
 17. Рысс Ю.А. Геоэлектрохимические методы разведки. (Введение в геоэлектрохимию). Л.: Недра, 1983. 255 с.
 18. Скрепинский С.Б. Комплекс геофизических методов для поисков месторождений золота в Юго-Восточной Якутии в условиях вечной мерзлоты: Автореф. дис. ... канд. геол.-минер. наук. Л., 1990. 22 с.
 19. Степанов В.А., Мельников А.В., Вах А.С. и др. Приамурская золоторудная провинция. Благовещенск: АмГУ, НИГТЦ ДВО РАН, 2008. 231 с.
 20. Столов Б.Л. Оценка информативности методов естественного электрического поля и вызванной поляризации при изучении рудоносных структур Приморья: Дис. ... канд. геол.-минер. наук. Владивосток, 1997.
 21. Столов Б.Л., Шкабарня Н.Г. Состояние и перспективы развития рудной геофизики в Приморье // Вестн. ДВО РАН. 2001. № 2. С. 47–63.
 22. Столов Б.Л., Самченко А.М. Оценка эффективности метода частичного извлечения металлов (ЧИМ) при поисках месторождений золота: Вологдинские чтения. Владивосток: ДВФУ. 2007. Вып. 67. С. 49–56.
 23. Столов Б.Л. Оценочные геофизические методы и их роль при поисково-разведочных работах в Приморье: Вологдинские чтения. Владивосток: ДВФУ. 2008. № 8. С. 14–21.
 24. Тарасов А.В., Гурин Г.В., Каминский А.Е., Мухаммадиев Б.Н. Спектральная характеристика вызванной поляризации рудной зоны месторождения Сухой Лог // Применение современных электроразведочных технологий при поисках месторождений полезных ископаемых: Сб. Тез. XII Международ. геофиз. науч.-практ. семинара (Санкт-Петербург, 18–19 марта 2015 г.). СПб., 2015. С. 46–49.
 25. Тектоника, глубинное строение, металлогения области сочленения Центрально-Азиатского и Тихоокеанского поясов: Объясн. зап. Тектонической карте. 1:1 500 000 / Под ред. Л.П. Карсакова, Ч. Чжао, М.В. Горошко. Владивосток-Хабаровск: ДВО РАН, 2005. 264 с.
 26. Титов К.В. CR-SIP. Комплексное сопротивление (CR) или спектральная вызванная поляризация (SIP-СВП). Презентация. <http://present5.com/cr-sip-kompleksnoe-soprotivlenie-cr-ili-spektralnaya>.
 27. Фертиков А.И., Бакшеева И.И., Бурдакова Е.А., Плотникова А.А. Модификация термомагнитного геохимического метода за счет магнитно-коллоидной обработки проб // Горн. информ.-аналит. бюлл. (науч.-технический журн.). М.: ООО «Горная книга», 2015. № 6. С. 300–306.
 28. Штокаленко М.Б., Алексеев С.Г., Ворошилов Н.А., Сенчина Н.П., Шаткевич С.Ю. Обоснование применения геоэлектрических методов при поисках глубокозалегающих рудных месторождений // Разведка и охрана недр. 2018. № 6. С. 25–29.
 29. Эйриш Л.В. Металлогения золота Приамурья. Владивосток: Дальнаука, 2002. 189 с.

*Рекомендована к печати В.Б. Каплуном
после доработки 21.02.2019 г.
принята к публикации 24.05.2019 г.*

M. Yu. Nosyrev

Goelectrical characteristics of gold ore deposits of the Upper Priamurye region

The results of measurements of electrical properties of rocks and the induced polarization survey have been analyzed for three gold ore deposits including BAM, Berezitovoye and Pokrovka in the Upper Priamurye region. The spatial correlation is shown between mineralization zones and contrasting resistivity boundaries mapped within the gold ore fields. The view that the blocks of high-resistivity rocks have a minimum permeability and therefore they could act as screens affecting the hydrodynamic features of the hydrothermal system at the stages of deposit formation and, actually, at the stages of mineralization formation is justified. This makes such geoelectrical boundaries important element for exploration, which should be accounted for during the electric prospecting data interpretation. The induced polarization survey established a diverse interpretation of polarizability anomalies within gold ore fields and the lack of correlation between a range of increased values of the induced polarization and gold ore mineralization. The methods for polarizability anomaly evaluation are proposed.

Key words: gold, deposit, electric resistivity, polarizability, geophysical anomaly, Priamurye.