

УДК 553.411:550.83.02.

Особенности естественной электрической поляризации пород и руд золотосульфидного месторождения «Благодатное» (Енисейский кряж)

**Юрий В. Колмаков^{а*}, Анатолий М. Сазонов^б,
Елена В. Потехина^в, Сергей И. Леонтьев^б,
Платон А. Тишин^г, Игорь Ф. Гертнер^г, Татьяна В. Полева^б**

^а Томский политехнический университет,
634050 Россия, Томск, пр. Ленина, 30

^б Сибирский федеральный университет,
660041 Россия, Красноярск, пр. Свободный, 79

^в Филиал по Томской области ФГУ
“ТФИ по Сибирскому федеральному округу”,
634034 Россия, Томск, ул. Мокрушина, 9, стр. 16

^г Томский государственный университет,
634050 Россия, Томск, пр. Ленина, 36¹

Received 5.04.2008, received in revised form 28.04.2008, accepted 5.05.2008

Естественное электрическое поле золотосульфидного месторождения «Благодатное» имеет структуру слабовыраженного диполя. Потенциалы поляризации линейной минерализованной зоны изменяются от –260 мВ на фланге, не содержащем промышленных концентраций золота, до +30 мВ на ее южном, более продуктивном окончании. Природа этих аномалий устанавливается по минералогическому составу пород и руд, флюидным включениям в них, данным магниторазведки и гамма-спектрометрии, геоморфологического анализа. Электрохимические особенности месторождения определяются, главным образом, присутствием сульфидов и метасоматического графита. Предполагается косая поляризация золоторудной структуры, вызванная распределением графита, галенита и сфалерита. Это приводит к значительному перепаду электродных потенциалов в поляризующейся минерализованной зоне и, как следствие, к протеканию катодных и анодных процессов в ее верхней части. Аномалии, обусловленные развитием графита, соответствуют участкам месторождения, на которых достигалась максимальная восстановленность рудообразующих флюидов. Изменчивость их режима связана с вариациями Eh-потенциала, что могло быть одной из причин возникновения минералогической зональности и фактором, контролирующим отложение золота.

Ключевые слова: золотое оруденение, естественное электрическое поле, природа аномалий, геоэлектрохимическая зональность.

* Corresponding author E-mail address: fgu@mail.tomsknet.ru

¹ © Siberian Federal University. All rights reserved

Введение

Месторождения малосульфидного типа приобретают все большее значение в практике добычи коренного золота. Трудность их обнаружения связана с весьма слабо проявленными для визуальной диагностики гидротермально-метасоматическими изменениями самих руд и вмещающих пород. В то же время и те и другие создают возмущения в физических полях, которые могут служить индикаторами продуктивных зон. Обнаружение таких аномалий на фоне неизменных пород, в силу их значительных амплитуд, не представляется сложной задачей. Проблема заключается в прогнозе золотого оруденения среди множества выявленных возмущающих объектов. В связи с этим актуально рассмотрение особенностей структуры тех аномалий, в которых находят отражение геологические образования, генетически связанные с месторождением. Такие аномалии служат его неотъемлемыми характеристическими чертами и, следовательно, надежными признаками при локальном прогнозе по геофизическим полям.

На месторождении «Благодатное» авторами проведено изучение геофизических полей (магнитного, естественных электрических потенциалов, содержаний радиоактивных элементов), магнитной восприимчивости пород и руд, слагающих их минеральных ассоциаций и химических составов газовой-жидких флюидных включений. Было установлено, что по отношению к потенциалам поляризации вмещающих пород рудоносная минерализованная зона создает их приращения, отличающиеся между собой не только интенсивностью, но и знаками. Для обогащенных золотом участков характерны отрицательные и положительные приращения электрических потенциалов со средними и малыми амплитудами. Целью работы было выявление природы аномалий естественного электрического поля (ЕП) и причин столь неодинакового характера поляризации золотосодержащей минерализованной зоны.

Строение и состав рудной зоны

Месторождение «Благодатное» расположено в центральной части Енисейского кряжа, в бассейне левых притоков верхнего течения р. Енашимо. Оно приурочено к кристаллосланцам кординской свиты нижнего рифея и представляет собой серию кулисообразных зон рассеянной кварцево-жильной и сульфидной минерализации в сланцевой толще (рис. 1). Минерализованная зона сланцев занимает приграничную область стратифицированных литологических пачек $R_1kd_3^1$ и $R_1kd_3^2$, имеющих различные физико-механические свойства. Дифференциальные тектонические подвижки вдоль граничного между пачками дизъюнктива пологоволнистой морфологии привели к интенсивному локальному рассланцеванию пород, перекристаллизации, фрагментарному метасоматозу с образованием в разной степени графитизированных, серицитизированных, турмалинизированных, альбитизированных, хлоритизированных, карбонатизированных и сульфидизированных пород. Эти различия метасоматических пород тонко переслаиваются между собой и собраны в многостепенные складки волочения вплоть до плейчатости. Гидротермально-метасоматические изменения осуществлялись вдоль трещин рассланцевания пород и кливажа осевой плоскости складок. Сульфидизация происходила в три последовательных стадии с образованием следующих минеральных парагенезисов: пирит-пирротинового, пирит-пирротин-арсенопиритового и галенит-сфалерит-халькопиритового. Их пространственное распределение отражает зональное строение рудоносной структуры. В центральной части проявлена пирит-пирротин-арсенопиритовая минерализация. В краевых частях она сменяется пирит-

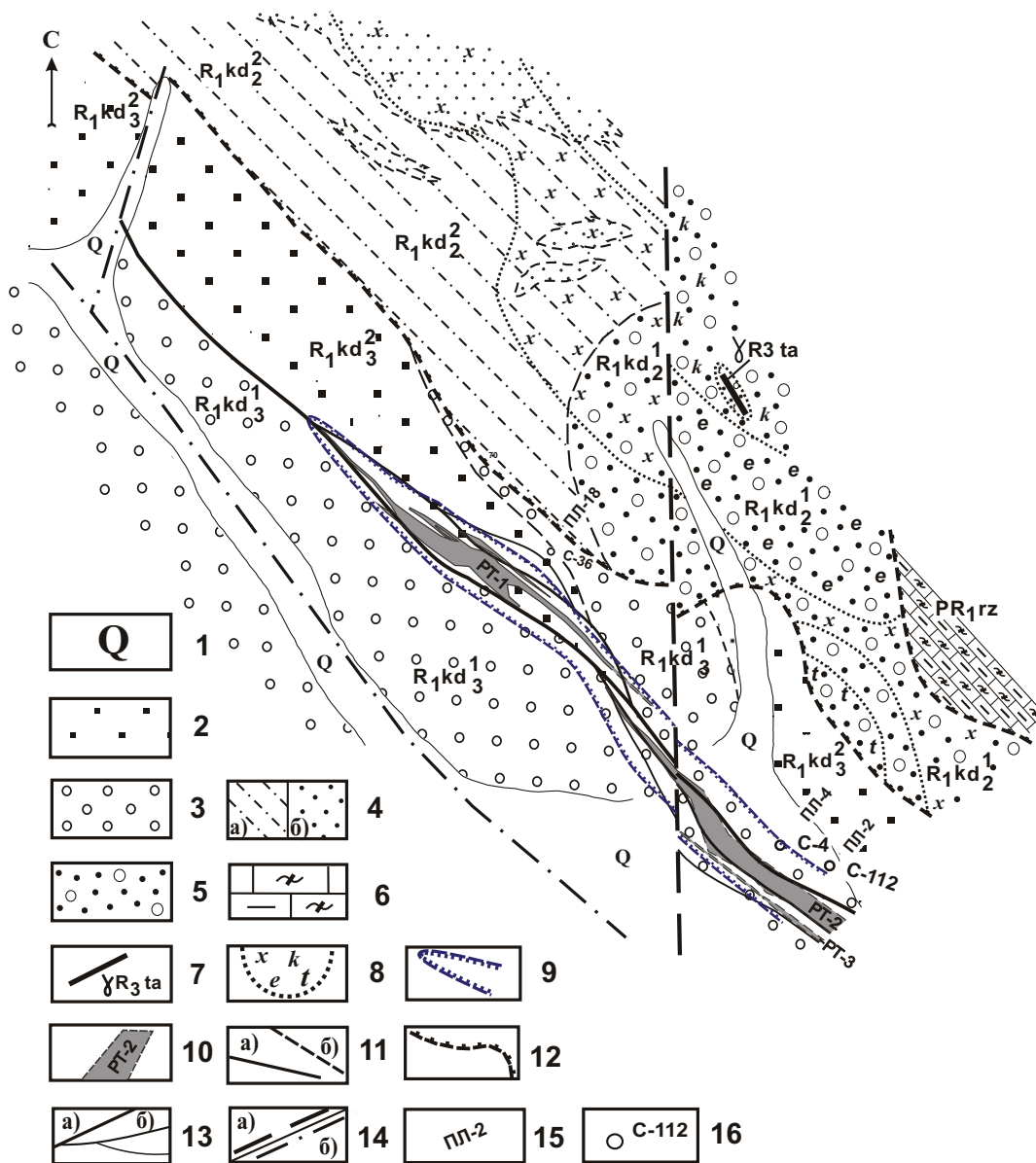


Рис. 1. Схема геологического строения месторождения «Благодатное» (составил: А.М. Сазонов): 1 - четвертичные отложения; 2 - верхнекординская подсвита. Верхняя пачка (R_1kd^3). Ритмично-слоистые кварцполевошпатовые сланцы; 3 - верхнекординская подсвита. Нижняя пачка (R_1kd^1). Пятнистые ставролитовые сланцы; 4 - среднекординская подсвита. Верхняя пачка (R_1kd^2): а) кварцитовидные сланцы; б) лейкократовые кварцитовидные сланцы; 5 - среднекординская подсвита. Нижняя пачка (R_1kd^2). Среднезернистые аркозовые металаеволиты с порфиробластами мусковита; 6 - рязановская свита (Pr_1rz). Кальциферы; 7 - дайки гранит-порфира. Татарско-аяхтинский комплекс; 8 - зоны метасоматически измененных пород и диафторитов: х - (хлорит + пирротин + пирит); е - (хлорит + актинолит + эпидот + сульфиды); к - (хлорит + эпидот + кальцит + пирротин); т - турмалина; 9 - контур рудоносной минерализованной зоны; 10 - рудные тела; 11 - геологические границы: а) достоверные; б) предполагаемые; 12 - надвиги предполагаемые; 13 - сбросо-сдвиги: а) главные; б) второстепенные; 14 - взбросы: а) предполагаемые; б) скрытые под вышележащими отложениями; 15 - поисковая линия и ее номер; 16 - скважина и ее номер

пирротиновой ассоциацией с уменьшением количества пирротина до полного исчезновения на периферии. Завершающий рудную минерализацию галенит-сфалерит-халькопиритовый парагенезис развивался локально, осложняя структуру общей зональности (рис. 2). Гидротермально-метасоматические преобразования пород проявлены неконтрастно. В качестве показателя интенсивности этих изменений может выступать только насыщенность сланцев вкрапленностью сульфидов, кварцевыми и кварц-карбонатными прожилками. По этому признаку от периферии к центру устанавливаются зоны, не несущие кварцевожильной минерализации, области с нитевидными кварц-карбонатными прожилками и участки развития сближенных жил. Обогащенные золотом участки, занимая центральное положение в данной минералогической неоднородности, объединяются в два линзовидных рудных тела [7, 13]. При этом 4/5 запасов металла сконцентрировано на южном фланге месторождения [12].

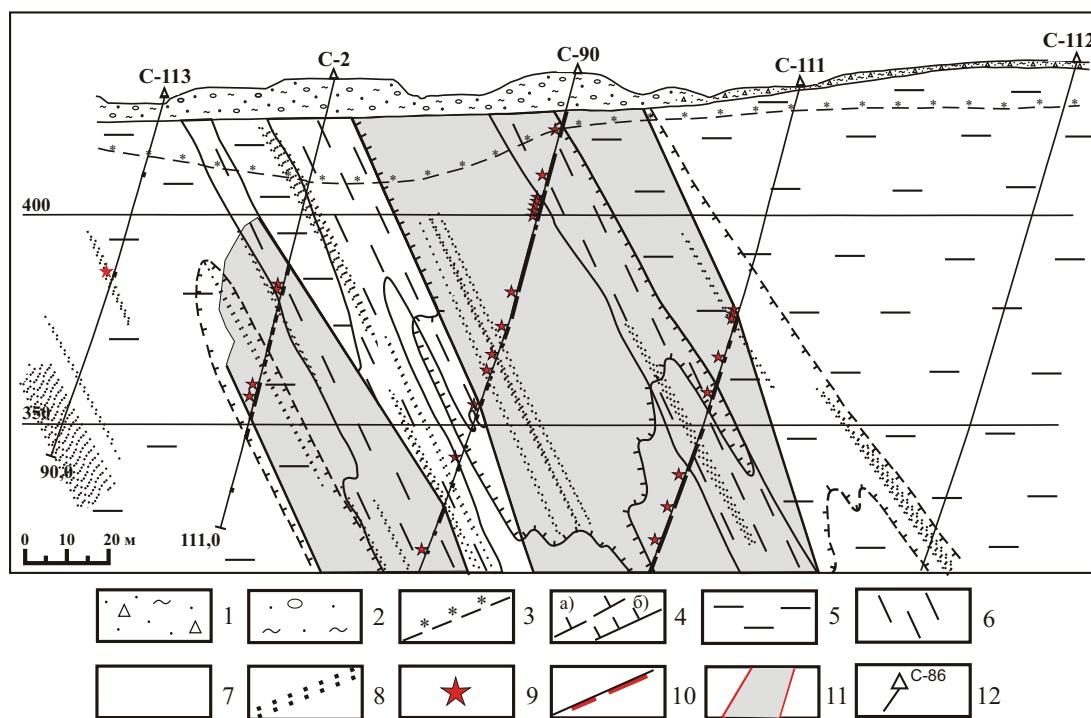


Рис. 2. Распределение гидротермально-метасоматических ассоциаций в сечении 2-й поисковой линии: 1 - рыхлые делювиальные отложения; 2 - техногенные отложения; 3 - граница зоны приповерхностного выщелачивания сульфидов; 4 - 9 - участки распространения гидротермально-метасоматической минерализации во вмещающих породах: 4 - а) сближенных нитевидных кварц-карбонатных прожилков с редкими кварцевыми жилами и жилками, б) сближенных кварцевых жил, жилков и прожилков; 5 - пиритовой; 6 - пирит-пирротиновой; 7 - арсенипиритовой ассоциации (арсенипирит + леллингит + пирит + пирротин); 8 - галенит-сфалерит-халькопиритовой; 9 - видимого золота; 10 - рудные интервалы с содержаниями Au > 1,0 г/т; 11 - границы рудного тела; 12 - скважина и её номер

Природа аномалий ЕП

Структуре естественного электрического поля месторождения свойственно сочетание аномалий, резко отличающихся друг от друга по масштабам проявления и морфологии (рис. 3). Аномалия регионального характера прослеживается от центра участка на север и продолжается за его пределами. Ее изученная часть представлена повышенными градиентами потенциалов, кото-

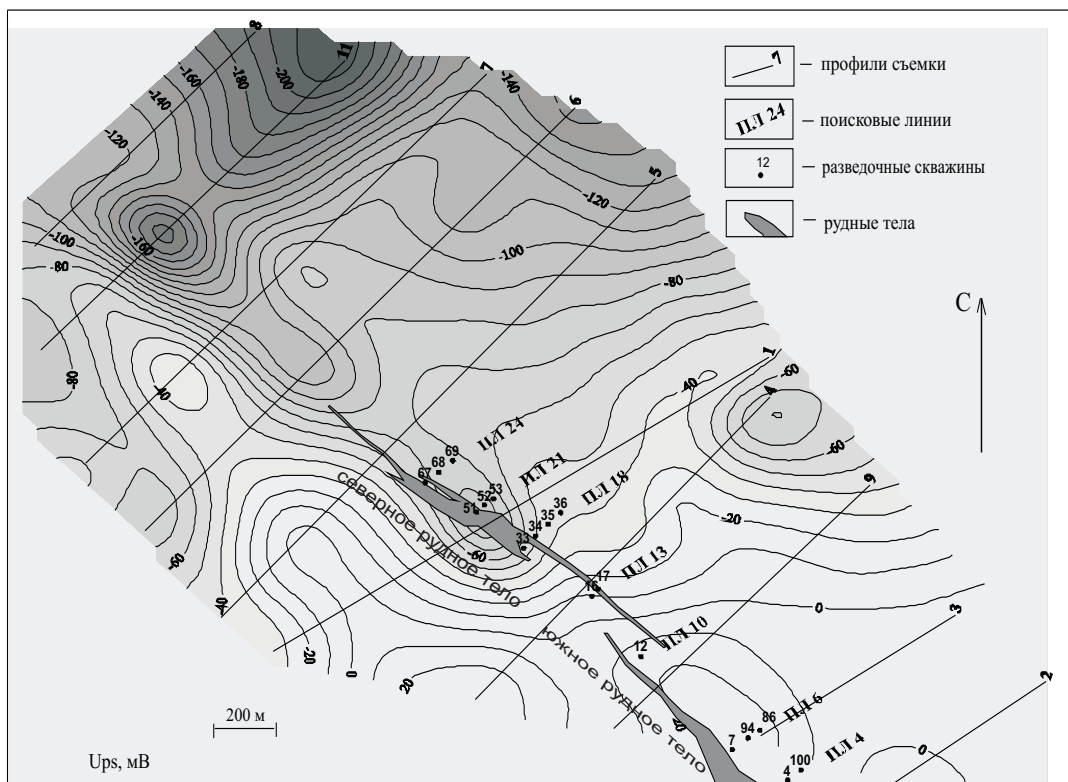


Рис. 3. План естественного электрического поля месторождения «Благodatное»

рые в указанном направлении изменяются от +10 до -300 мВ. На этом фрагменте регионального понижения потенциалов ЕП выделяются локальные линейные возмущения секущего характера с поперечными размерами не более 300 м. В совокупности локальные аномалии отражают золотосодержащую минерализованную зону. Выяснению их природы во многом способствует сопоставление с магнитной неоднородностью рудоносной структуры. Породы и руды ее большей части включают сульфидные ассоциации с пирротинном, придающим им повышенную магнитную восприимчивость ($100 \dots 1000 \cdot 10^{-5}$ ед. СИ) в сравнении с неизменными и пиритизированными породами, восприимчивость которых не превышает $40 \cdot 10^{-5}$ ед. СИ [1]. Это обстоятельство позволяет диагностировать распространение рудной минерализации по магнитному полю.

По амплитудам, полярностям и пространственным соотношениям с магнитными образованиями были выделены три разновидности ЕП-аномалий. Первая и вторая разновидности прослеживаются только над минерализованной зоной; аномалии третьей разновидности - еще и над вмещающими породами.

Первая разновидность включает в себя аномалии отрицательных потенциалов до -130 мВ. Им свойственны пространственная совмещенность с магнитными аномалиями и обратная корреляция структур: минимумам более высоких порядков соответствуют магнитные максимумы и наоборот (рис. 4). Тесное взаимодействие с магнитными аномалиями, обусловленными рудной минерализацией, позволяет предполагать ту же природу и для аномалий ЕП. При этом их амплитуды ведут себя неодинаково. Приращение магнитной индукции возрастает от 160 нТл на про-

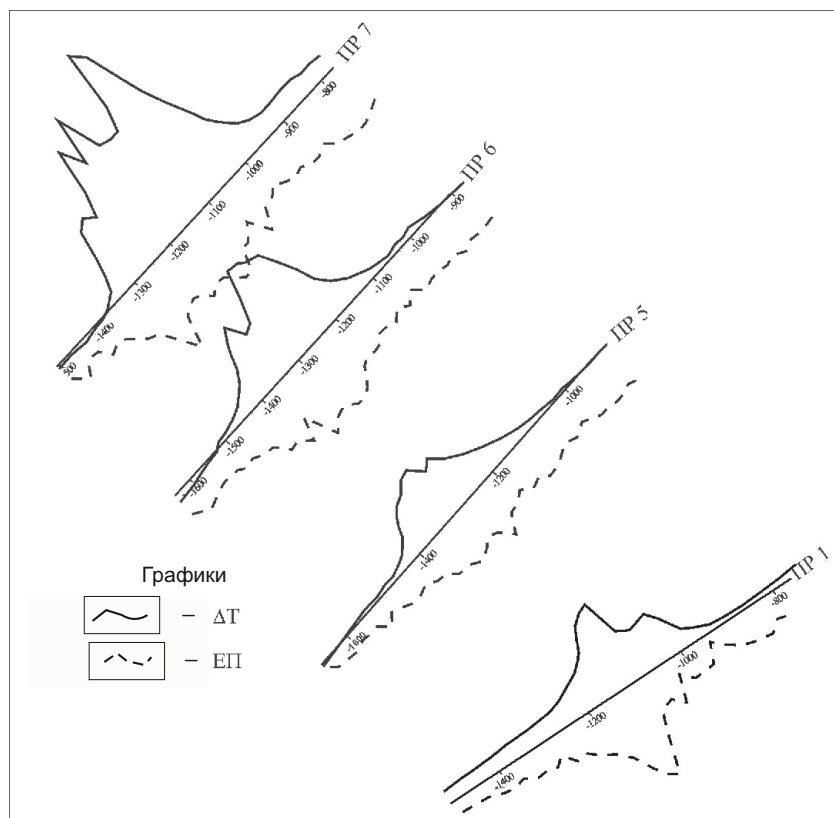


Рис. 4. Аномалии магнитной индукции (ΔT) и потенциалов ЕП, обусловленные сульфидной минерализацией

филе 1 до 500 нТл – на профиле 7, а величины потенциалов ЕП на всем интервале практически не меняются. Это может быть вызвано возрастанием доли пирротина в сульфидных парагенезисах при неизменном их суммарном количестве. В табл. 1 приведены данные по экспериментальным определениям электродных потенциалов некоторых сульфидов. Среди главных рудных минералов – пирита, пирротина, арсенопирита, халькопирита – последние три имеют близкие значения электродных потенциалов; несколько большими потенциалами обладает пирит. Изменение соотношения названных сульфидов при сохранении их общего содержания практически не скажется на характере естественной электрической поляризации руд, но очень повлияет на их магнитную восприимчивость в случае увеличения доли пирротина.

Вторая разновидность представлена аномалией на южном фланге минерализованной зоны. Потенциалы поляризации в ней достигают +30 мВ относительно вмещающих пород. Приуроченность к магнитным образованиям, возможно, и здесь указывает на связь аномалии поляризации с сульфидами.

В третью разновидность ЕП-аномалий объединены два самых глубоких минимума в поле естественных электрических потенциалов. Один принадлежит региональному понижению над вмещающими породами; второй – локальный – прослеживается над северо-западным окончанием минерализованной зоны. Экстремальные значения потенциалов в них достигают -230 и

Таблица 1. Электродные потенциалы сульфидов (по Свешникову Г.Б., 1967) [9]

Минерал	Электродный потенциал (В) минерала по отношению к водородному электроду в нормальном растворе хлористого калия
Марказит	+0,56
Пирит	+0,46; +0,48; +0,42; +0,41; + 0,48; +0,46
Халькопирит	+0,42; +0,38; +0,33
Арсенопирит	+0,35
Пирротин	+0,30; +0,34; +0,255
Галенит	+0,25; +0,14; +0,25; +0,29; +0,15; +0,14
Сфалерит	+0,12

-260 мВ. От предыдущих аномалий, кроме амплитуды, они отличаются тем, что создаются немагнитными телами, следовательно, их природа не связана с рудными ассоциациями.

Подробный обзор естественных электрических полей на рудных месторождениях дается в работах [5, 9, 10, 11]. Результаты этих работ по вопросам природы аномалий могут быть сведены к следующим положениям. Основными возмущающими объектами являются графитизированные породы и сульфидные руды. Аномальный эффект от первых значительно выше, чем от вторых. Увеличение мощности зоны окисления усугубляет это различие. Химически инертный графит в зоне окисления практически не утрачивает электронной проводимости, сохраняет способность поляризоваться и остается хорошим проводником для естественных электрических токов. Окисление сульфидных руд приводит к возрастанию сопротивления и перемещению верхнего полюса поляризации на глубину, что снижает интенсивность аномалии ЕП над сульфидным телом.

Во вмещающих породах на месторождении отсутствует углеродистое вещество осадочного происхождения, хотя кординской и подстилающей ее пенченгинской свитам свойственны углеродсодержащие отложения. В работе [8] говорится об имеющихся тонкопрожилковых, трещинных и гнездовых обособлениях графита в кристаллических сланцах минерализованной зоны. Формирование этих обособлений отнесено к предрудной метаморфогенной стадии преобразований вмещающей толщи. Их появление связывается с восстановлением углекислоты. В качестве причины возникновения восстановительного режима называется происходившая в зоне смятия массовая мусковитизация сланцев – реакция, при которой связывается большое количество ОН и, как следствие этого, снижается давление кислорода, что приводит к инверсии окислительной обстановки флюидной системы в восстановительную.

Особенности состава гидротермальных растворов оценены по материалам исследования флюидных включений в жильном кварце (табл. 2). Среди включений выявлены первичные, первично-вторичные и вторичные. По химическому составу отмечены водно-солевые, водно-углекислотные, углекислотные, водно-метановые и метановые. Результаты исследований частично опубликованы [14]. Первичные и первично-вторичные водно-солевые включения гомогенизируются в температурном интервале от 220 до 350 °С, соленость раствора в них составляет от 12,5 до 23,0 мас. % (NaCl-экв.). Первичные и первично-вторичные включения имеют преимущественно водно-углекислотный и углекислотный состав (углекислоты от 47 до 94,0 мол. %, азота – от 5,0 до 51,5 мол. % и метана до 2,0 мол. %). Температура полной гомогенизации составляет 220...280 °С. Вторичные двужидкие водно-метановые и метановые включения приурочены

к микротрещинам, секущим кварцевый агрегат. Температура гомогенизации метановых включений в жидкую фазу составляет интервал от минус 78,5 до минус 96,6 °С, а при гомогенизации в газовую фазу – от минус 80,4 до минус 93,8 °С. В составе метановых включений преобладает метан (49,0...98,5 мол. %), присутствуют азот (2,4...43,0 мол. %) и углекислота (до 11,0 мол. %). В кварце, где обнаружены восстановленные флюиды, отмечается графит.

Таблица 2. Химический состав индивидуальных флюидных включений в кварцах

№ п/п	Номер образца (включения)	Тип включений	T _{гом.} , °С	Содержание, моль %		
				CO ₂	CH ₄	N ₂
1	СБ-111/59,3-1/1	Ж _{H₂O} +Ж _{CO₂}	+8,0	78,0	2,0	20,0
2	СБ-111/59,3-1/2	Ж _{H₂O} +Ж _{CO₂}	+10,0	76,0	2,0	22,0
3	СБ-111/60,8-6/1	Ж _{H₂O} +Ж _{CO₂}	+13,0	94,0	1,0	5,0
4	СБ-111/60,8-6/2	Ж _{H₂O} +Ж _{CO₂}	+19,0	88,0	2,0	10,0
5	СБ-111/76,5	Ж _{CH₄+N₂+CO₂}	-90,0	8,0	49,0	43,0
6	СБ-111/90,3	Ж _{CH₄+N₂+CO₂}	-82,0	10,5	80,0	9,5
7	СБ-111/90,3-3/1	Ж _{CO₂+N₂+CH₄}	-6,5	81,5	1,0	17,5
8	СБ-111/90,3-3/2	Ж _{CO₂+N₂+CH₄}	-9,5	74,5	2,5	23,0
9	СБ-111/120,6-г/1	Ж _{CO₂+N₂+CH₄}	-8,0	85,0	1,5	13,5
10	СБ-111/120,6-а	Ж _{CH₄+N₂+CO₂}	-79,0	10,5	76,0	13,5
11	СБ-111/120,6-б/1	Ж _{CH₄+N₂}	-78,5	0,0	87,5	12,5
12	СБ-111/120,6-б/2	Г _{CH₄}	-86,5	0,5	98,5	1,0
13	СБ-111/120,6-в	Ж _{CH₄+CO₂+N₂}	-78,5	11,0	86,5	2,5
14	СБ-111/129,5-1/1	Ж _{CO₂+N₂+CH₄}	-29,5	52,0	1,0	47,0
15	СБ-111/129,5-1/2	Ж _{CO₂+N₂+CH₄}	-52,5	47,0	1,5	51,5
16	СБ-111/129,5-7/1	Ж _{CH₄+N₂+CO₂}	-83,0	4,5	86,0	13,5
17	СБ-111/129,5-7/2	Г _{CH₄}	-84,0	0,5	98,0	1,5

Примечание. Анализы выполнены в лаборатории термобарогеохимии Института геологии и минералогии СО РАН, г. Новосибирск. Аналитик Н.А. Гибшер

Высокие содержания восстановленных газов (CH₄, H₂, N₂) в закрытых порах углеродсодержащих пород отмечают и в углеродистых метасоматитах [6, 15], и в стратиформных разновидностях этих пород [3]. В первом случае авторы связывают восстановленные флюиды с мантийным источником и предлагают породы, подвергшиеся их воздействию с образованием различных форм самородного углерода – графита, шунгита и др., выделить в самостоятельную формацию эндогенных «черных сланцев». Во втором – образование метана и его гомологов, водорода и азота объясняют метаморфическим преобразованием осадочного органического вещества, а также влиянием на него метасоматических растворов и динамических усилий в зонах разломов. Следовательно, флюиды не мантийного, а корового происхождения, просачиваясь сквозь породы с осадочным органическим веществом, могли приобрести восстановительный характер. По-видимому, метасоматическую графитизацию следует отнести к одному из случаев конвергенции геологических процессов с принципиально различными источниками углерода. Предпо-

лагается, что образование элементарного углерода могло происходить как непосредственно из газовой фазы, так и при взаимодействии восстановленного флюида с вмещающими породами. В качестве одного из механизмов образования графита из газовой фазы может выступать реакция разложения окиси углерода на графит и CO_2 , известная под названием реакции Будуара. Условия протекания этой реакции подробно изложены в работе [2]. Для образования графита в результате взаимодействия восстановленных флюидов с вмещающими породами считается благоприятным вхождение в состав минералов, включающих в себя гидроксильную группу. По отношению к восстановленным флюидам эти минералы неравновесны из-за содержащейся в их составе воды [6]. В результате реакции образуется графит и происходит дегидратация вмещающих пород, приводящая к увеличению потенциала кислорода во флюиде и тем самым приближающая его к равновесному с гидроксилсодержащими минералами состоянию. При всем многообразии предлагаемых механизмов метасоматической графитизации выводы всех исследователей сходятся в том, что протекает она в условиях резко восстановительного характера флюидной системы.

Поскольку состав газовой-жидких включений в рудах месторождения «Благодатное» в некоторых пробах совпадает с составами включений из углеродистых метасоматитов других регионов, можно предположить, что на отдельных участках минерализованной зоны достигалась такая восстановленность флюида, какая необходима для образования графита согласно приведенным выше реакциям. Следует добавить, что аномалии ЕП, природа которых, вероятно, связана с графитовой минерализацией, принадлежат породам, находящимся в зоне влияния разрывного нарушения, поперечного рудовмещающей структуре. Ассоциации андалузита, мусковита и

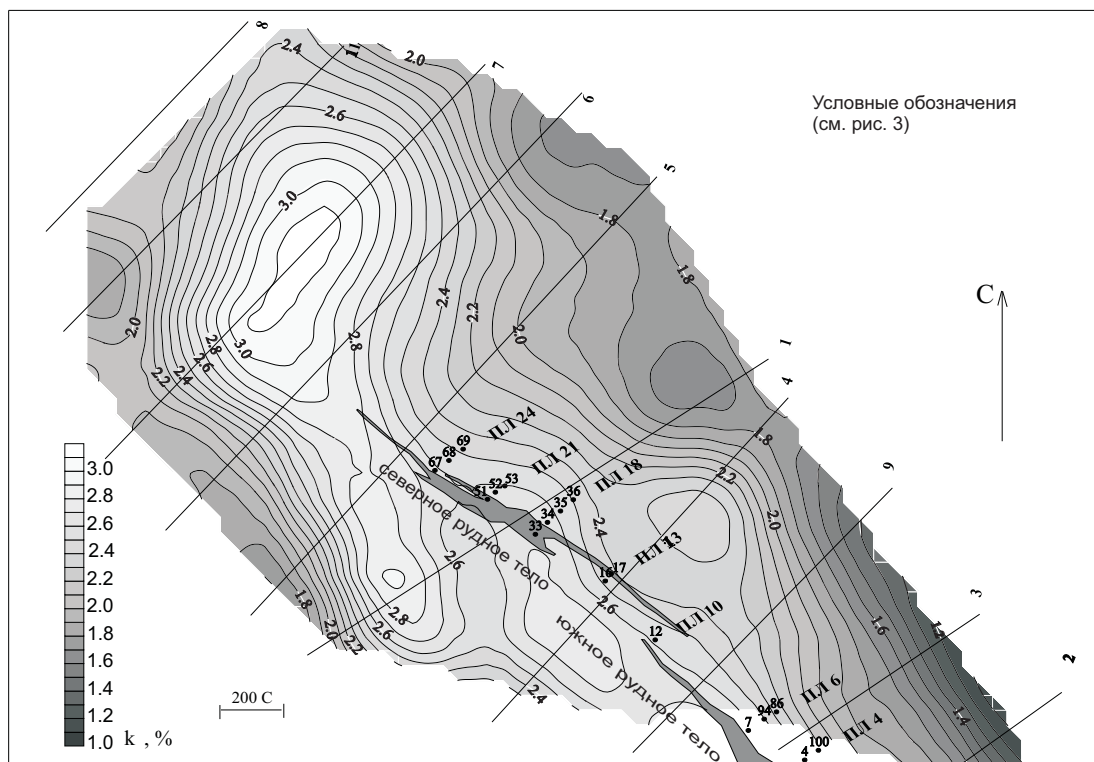


Рис. 5. План содержаний калия

кварца в сланцах, содержащих графит [7], позволяют предположить, что образование графита происходило в восстановительной обстановке параллельно с замещением мусковита андалузитом и выносом калия по реакции: $2\text{KAl}_2[\text{AlSi}_3\text{O}_{10}](\text{OH})_2$ (каолинит) + $2\text{CO} = 3\text{Al}_2\text{SiO}_5$ (андалузит) + C (графит) + 3SiO_2 (кварц) + $\text{K}_2\text{O} + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$. Реакция носит гипотетический характер и показывает, что прогрессивный процесс дегидратации пород может протекать, наряду с повышением температуры, и в результате воздействия флюида, неравновесного с водой. Графитизированные породы, создающие наиболее интенсивные аномалии ЕП, разобщены с породами, в которых накапливался калий (рис. 5). В последних, как и в рудных телах, широко проявлена обратная регрессивная реакция образования мусковита.

Причины неоднородной поляризации золоторудной структуры

Всю минерализованную зону, включая рудные тела и безрудные участки, в аспекте проблемы образования аномалий в естественном электрическом поле следует рассматривать как единый природный макрогальванический элемент. Его работа и индивидуальные особенности являются результатом функционирования сложной многофакторной системы геоэлектрохимических процессов. Создание более интенсивных отрицательных аномалий графитизированными породами в сравнении с сульфидизированными служит их характеристической чертой. Это положение согласуется с многочисленными примерами, приводимыми в геофизической литературе, и не требует дополнительного обсуждения. Для выяснения причины различного проявления в естественном электрическом поле пород, подверженных оруденению, рассмотрим факторы, способные повлиять на характер их поляризации. К ним относятся: геоморфологические условия на месторождении, структура руд и зональность вещественного состава, толщина их окисленной приповерхностной части.

Руды представлены сланцами с маломощными линзовидными кварцевыми и нитевидными кварц-карбонатными прожилками и убогой сульфидной вкрапленностью. Структура однотипна на всем месторождении, поэтому маловероятно, что она становится причиной неоднородной поляризации рудного блока.

Геоморфологические условия выхода минерализованной зоны на дневную поверхность неодинаковы. Она пересекает гору Благодатную. Ее рудный фланг заканчивается в долине реки Енашимо, а безрудная часть – на противоположной стороне горы, в долине ручья Оловянного. Граница между продуктивным и безрудным блоком проходит по гребню положительной формы рельефа ближе к вершине. Перепад высот минерализованной зоны на дневной поверхности составляет 100 м. Ее фланги в долинах водотоков обводнены больше, чем центральная часть. Различная обводненность выхода рудного тела может быть одной из причин его косоугольной поляризации [9]. Косоугольная поляризация происходит в случаях, когда в верхней части рудного тела протекают не только катодные процессы, но и анодные и появляется горизонтальный компонент электродвижущей силы. При этом отрицательные потенциалы соответствуют ее менее обводненному участку (катоде), а на заболоченном участке (аноде) может создаваться положительная аномалия. Предполагая, что косоугольная поляризация минерализованной зоны - результат изменения гидрогеологической обстановки ее выхода на дневную поверхность, логично было бы ожидать одинакового отражения ее флангов в поле ЕП. На самом деле в долине реки Енашимо зона прослеживается по малоамплитудной положительной аномалии, а в долине ручья Оловянного потенциалы достига-

ют самых низких отрицательных значений. Следовательно, если косая поляризация существует, она не объясняется неоднородностью гидрогеологических и геоморфологических условий.

На электрические и электрохимические свойства рудовмещающей структуры влияют особенности распределения главных минералов рудоносных метасоматитов. В продуктивной части к ним относятся кварц, карбонаты и сульфиды. С возрастанием содержания диэлектриков повышается сопротивление поляризующегося тела, что приводит к увеличению падения потенциала поляризации внутри него и уменьшению - во вмещающих породах, на поверхности которых измеряются потенциалы ЕП [11]. Минералы с электронной проводимостью отвечают за саму поляризацию и, в зависимости от их качественного состава, за величины электродных потенциалов. Распространенность гидротермального кварца и карбонатов показана в табл. 3. Породы и руды с кварц-карбонатным материалом на севере составляют 61,8 % (ПЛ: 24; 21; 18), на юге – 52,9 % (ПЛ:6; 4).

Таблица 3. Объемная доля вмещающих пород и рудоносных метасоматитов в сечениях опорных поисковых линий (%)

Поисковая линия	Вмещающие неминерализованные сланцы	Метасоматиты сульфидизированные	
		с кварцевыми жилами и прожилками	с нитевидными кварц-карбонатными прожилками
24	38,3	0,3	61,4
21	39,6	23,1	37,3
18	36,7	40,7	22,6
13	52,9	-	47,1
10	10,9	-	89,1
6	53,1	16,1	30,8
4	41	24,5	34,5

Из этих данных следует, что распределение высокоомных гидротермальных включений не является основной причиной зональности потенциалов ЕП над золотоносным участком, иначе следовало бы ожидать обратную картину. В работе [4] приводятся количественные данные по рудной минерализации на месторождении. На севере продуктивного блока общее содержание сульфидов составляет в среднем 3,6 %, на его южном фланге - 6,6 %. При большей минерализации южного фланга аномальный эффект от него меньше, чем от северного рудного тела. Косая поляризация может возникнуть в результате зонального распределения электронных проводников с различными электродными потенциалами. В этом случае катодом будет зона, сложенная минералами с более высокими электродными потенциалами, анодные реакции будут идти на участке локализации минералов с низкими значениями этого параметра [9]. В табл. 4 приведены количественные данные по проявлению самой поздней рудной ассоциации - галенит-сфалерит-халькопиритовой. С учетом того, что общая сульфидизация в южном рудном теле превышает в два раза таковую в северном, превосходство развития заключительного парагенезиса на участке поисковых линий 6 и 4 можно оценить примерно в 5 – 7 раз. Электродные потенциалы сфалерита и галенита (см. табл. 1) значительно ниже потенциалов пирита, пирротина и арсенопирита.

Таблица 4. Объемная доля сфалеритовой ассоциации от общего количества сульфидов (%)

Поисковая линия	24	21	18	13	10	6	4
Доля сфалеритовой ассоциации	4,2	4,1	4,9	0,7	10,6	10,6	14,4

В свете рассматриваемой проблемы главным аномальным образованием безрудной части, является графит – минерал, способный создавать наибольшие, в сравнении с любыми сульфидами, потенциалы естественной поляризации. Таким образом, геоэлектрохимическая неоднородность минерализованной зоны выражается в увеличении роли сфалерита и галенита в составе руд южного тела и графитизации в ее северо-западном окончании. Такая зональность вещественного состава могла послужить причиной кривой поляризации минерализованной зоны.

Предположение кривой поляризации согласуется с латеральной изменчивостью мощности зоны окисления. Максимально, до 30 м, она развита в южном рудном теле - анодной части горизонтального компонента косо поляризованного гальванического элемента. Здесь накладываются процессы прямого окисления поверхностными водами и окисления от функционирования гальванического элемента. В северном рудном теле мощность зоны разрушения первичных сульфидов не превышает 12 м. Иначе говоря, действие косо поляризованного элемента привело к большей сохранности северного рудного тела за счет южного.

Таким образом, проведенные исследования позволили сделать следующие выводы.

Естественная электрическая поляризация минерализованной зоны обусловлена наличием в ее составе сульфидов и графита. Ее кривой поляризацией вызвана неоднородность потенциалов ЕП от рудного тела. Главная причина этого – существование геоэлектрохимической зональности, проявленной в результате графитизации северного фланга месторождения и увеличения доли сфалерита и галенита на его южном окончании.

Аномалии ЕП, связанные с графитовой минерализацией, отражают те участки рудовмещающей структуры, на которых в период эволюции флюидной системы достигалась наибольшая восстановленность растворов. Изменчивость флюидного режима в связи с вариациями Eh-потенциалов могла быть одним из факторов появления зональности сульфидной минерализации на месторождении и отложения золота.

Список литературы

1. Колмаков Ю.В. Петромагнитная и минералогическая неоднородности и золотоносность рудной зоны месторождения «Благodatного» / Ю.В. Колмаков, А.М. Сазонов, А.Ю. Пинсон, Е.В. Потехина, И.Ф. Гертнер, П.А. Тишин // Известия ТПУ. - 2006. - Т. 309. - № 2. - С. 46-53.
2. Коржинский Д.С. Избранные труды. Петрология метаморфизма / Д.С. Коржинский. - М.: Наука, 1993. -256 с.
3. Сульфидные месторождения цветных металлов в сланцевых толщах / О.А. Осетров. - М.: Недра, 1978. - 207 с.
4. Полева Т.В. Особенности распределения кристалломорфологии и состава пирита золоторудного месторождения «Благodatного» в Енисейском кряже / Т.В. Полева, А.М. Сазонов, А.Я. Пшеничкин // Петрология магматических и метаморфических комплексов: матер. Всеросс. научн. конф. - Томск, 2005. - Т. 2. - С. 282-288.

5. Рысс Ю.С. Геоэлектрoхимические методы разведки / Ю.С. Рысс. - Л.: Недра, 1983. - 255 с.
6. Савельева В.Б. Углеродистые тектониты Оспинско-Китойского гипербазитового массива (Восточный Саян) / В.Б. Савельева, Н.Г. Звонкова, Ю.В. Аникина // Геология и геофизика. - 1998. - Т.39. - № 5. - С. 598-610.
7. Сазонов А.М. Месторождение «Благодатное» вкрапленных золотосульфидных руд (Енисейский кряж) / А.М. Сазонов, Е.А. Звягина, С.И. Леонтьев, Л.П. Костененко, Т.В. Полева, Л.И. Свиридов, П.А. Тишин, И.Ф. Гертнер // Магматические, метасоматические формации и связанное с ними оруденение: матер. научн. конф. - Ташкент, 2005. - С. 321-325.
8. Сазонов А.М. Генезис золотоносных руд горы Благодатной / А.М. Сазонов, Е.А. Звягина, С.И. Леонтьев, Л.П. Костененко, Т.В. Полева, Л.И. Свиридов, П.А. Тишин, И.Ф. Гертнер // Состояние и проблемы геологического изучения недр и развития минерально-сырьевой базы Красноярского края: Матер. докладов научно-практической конф., посвященной 60-летию Красноярской геологии (1943-2003 гг.). - Красноярск, 2003. - С. 247-249.
9. Свешников Г.Б. Электрохимические процессы на сульфидных месторождениях / Г.Б. Свешников. - Л.: Изд-во Ленинградского ун-та, 1967. - 159 с.
10. Сейфуллин Р.С. Эффективность поиска и разведки рудных месторождений / Р.С. Сейфуллин, Е.В. Кирик. - Львов, Изд-во ЛГУ, 1983. - 144 с.
11. Семенов А.С. Электроразведка методом естественного электрического поля / А.С. Семенов. - Л.: Недра, 1974. - 388 с.
12. Совмен В.К. Золоторудное месторождение «Благодатное» – новое крупное разведанное месторождение в Красноярском крае / В.К. Совмен, Ю.М. Страгис, Л.П. Кровякова, С.И. Савушкина // Разведка и охрана недр. - 2006. - № 8. - С. 28-32.
13. Тишин П.А. Структурная эволюция метаморфогенной золотосульфидной минерализации на примере месторождения «Благодатного» / П.А. Тишин, И.Ф. Гертнер, А.М. Сазонов, Е.А. Звягина, Ю.В. Колмаков, С.И. Леонтьев // Петрология магматических и метаморфических комплексов: матер. Всеросс. научн. конф. - Томск, 2004. - С. 283-289.
14. Томиленко А.А. Флюидные включения в золотокварцевых жилах рудопроявления «Благодатного» (Енисейский кряж, Россия) / А.А. Томиленко, Н.А. Гибшер // Золото Сибири: геохимия, технология, экономика: материалы IV международного симпозиума. – Красноярск: КНИИГиМС, 2006. - С. 30-31
15. Томсон И.Н. Условия образования эндогенных “черных сланцев” в Приморье / И.Н. Томсон, О.П. Полякова, В.П. Полохов, В.А. Нивин // Геология рудных месторождений. - 1993. - Т. 35, № 4. - С. 344-351.

Characteristic Features of Natural Electric Polarization of Rocks and Ores at Gold-sulphide Blagodatnoye Deposit (the Yenisey Mountain Ridge)

**Yuriy V. Kolmakov^a, Anatoliy M. Sazonov^b,
Elena V. Potehina^c, Sergey I. Leontjev^b,
Platon A. Tishin^d, Igor F. Gertner^d and Tatiana V. Poleva^b**

^a Tomsk Polytechnic University,
30 Lenina pr., Tomsk, 634050 Russia

^b Siberian Federal University,
79 Svobodny, Krasnoyarsk, 660041 Russia

^c Territorial Information Fund of Siberian federal district,
Tomsk region branch,

9 building 1 Mokrushina str., Tomsk, 634034 Russia

^d Tomsk State University,
36 Lenina pr., Tomsk, 634034 Russia

Natural electric field at the deposit has a structure of linear low doublet. Polarization potentials of extended mineralized zone range from -260 mV on the flank, which doesn't contain commercial gold concentrations, to +30 mV on the opposite productive flank. The nature of anomalies is determined on the basis of magnetic survey and gamma-spectrometry results, analysis of geomorphologic conditions at the deposit and study of embedded fluid and mineralogical rock and ore composition. Electrochemical activity of rocks and ores depends on the content of metasomatic graphite and sulphide in their composition. The question concerning the convergence of geologic processes causing metasomatic graphitization is posed. It is assumed that gold ore structure oblique polarization causes heterogeneous reflection of sulphidation block in the natural electric field. It occurs mainly due to geo-electrochemical zonality of a structure with graphite appearance on the one flank and the increase of galenite-sphalerite paragenesis content in the productive strata on the other flank. This leads to considerable drop of electrode potentials of the polarizing body and, consequently, urges cathode and anode processes in its upper part. Anomalies caused by graphite are related to mineralized zone fragments. Maximum solution recovery was reached in these fragments during fluid system function. Fluid regime variability in relation to Eh-potentials could be one of the main reasons of ore mineralization zonality in the deposit and a favourable condition for gold concentration.

Key words: gold ore concentration, natural electric field, nature of anomalies, geo-electrochemical zonality.
