

УДК 549.082.537.553.4(571.6)

ТЕРМО-ЭДС СУЛЬФИДОВ: ВОЗМОЖНОСТИ МЕТОДА И ЗНАЧЕНИЕ ДЛЯ МИНЕРАЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ (на примере изучения пирита и арсенопирита золоторудных месторождений восточного и южного обрамления Сибирского кратона)

*Горячев Н. А.^{1,2}, Мишунин В. И.¹, Горячева Е. М.¹,
Соцкая О. Т.¹, Тарасова Ю. И.², Будяк А. Е.²*

*¹ФГБУН Северо-Восточный комплексный научно-исследовательский институт
им. Н. А. Шило ДВО РАН, г. Магадан
E-mail: goryachev@neisri.ru*

²Институт геохимии им. А. П. Виноградова СО РАН, г. Иркутск

На примере изучения ТЭДС пирротина, пирита и арсенопирита золоторудных месторождений Яно-Колымского орогенного пояса и Бодайбинского синклинория, с использованием локального метода определения в аншлифах, показано, что данный параметр для пирита и арсенопирита является важным генетическим признаком происхождения этих минералов. Термоэлектрические свойства пирита и арсенопирита могут быть использованы для оценки не только температуры их образования, но и температурных параметров их метаморфизма, а также для характеристики генераций этих минералов. Разработка локальных методов измерения ТЭДС способствует возможности применения их для генетических построений, особенно при изучении золотого сульфидно-вкрапленного и жильно-прожилкового оруденения в структурах разновозрастных орогенных поясов.

Ключевые слова: термоэлектрические свойства пирротина, пирита и арсенопирита, орогенные месторождения золота, Яно-Колымский пояс, Бодайбинский синклинорий Саяно-Байкальского пояса.

DOI: 10.34078/1814-0998-2022-3-41-55

Введение. Изучение электрических свойств пирита и арсенопирита имеет длительную историю, начавшуюся еще в довоенное время (Фаворов и др., 1972). Наиболее полный обзор факторов, определяющих эти свойства, и прежде всего термоэлектродвижущей силы (ТЭДС), приведен в упомянутой выше работе. В середине 50-х гг. прошлого века исследования термоэлектрических свойств пирита и арсенопирита проводились уже в России, Германии, США, Японии. Однако в 70-е гг. наибольшую активность проявили советские исследователи (Горбатов, 1957; Розова, 1970; Стеценко, Куделя, 1974; Красников и др., 1975, 1983; Никулин и др., 1976; Пшеничкин и др., 1976а,б; Сейфуллин, 1978; Ревякин, Ревякина, 1978; Савицкий и др., 1980; Рабинович и др., 1981; и многие другие). В стране сложилось несколько центров изучения термоэлектрических свойств рудных минералов (Москва – ВИМС, ЦНИГРИ; Львов, Новосибирск, Томск, Чита). Основные исследования были сосредоточены

на прогнозно-поисковой составляющей изучения термоэлектрических свойств в основном пирита, галенита и арсенопирита. В максимальной степени это представлено в работе (Красников и др., 1983), в которой также показана сложная зависимость коэффициента ТЭДС от температуры образования пирита и арсенопирита. Следует отметить, что сотрудники ЗабНИИ МГ СССР (Фаворов и др., 1972; Красников и др., 1975, 1983; Сейфуллин, 1978) максимально продвинулись в исследованиях электрических свойств рудных минералов, поскольку они подробно рассматривали и генетическую сторону проблемы, используя данные ТЭДС, в сочетании с материалами по пространственным и временным взаимоотношениям минеральных ассоциаций. Именно они показали важное значение метода для изучения зональности на основе минералогического картирования большого количества месторождений практически всех генетических и промышленных типов. Однако продолжения исследований, особенно локального метода измерения термоэлектрических сил, на фоне увеличения роли локальных методов исследования в минералогии,

не получилось, вероятно, из-за того, что фундаментальная (генетическая) сторона проблемы интерпретации этих свойств отошла на второй план по сравнению с поисково-оценочной. В результате в последующие годы произошел заметный спад интереса к данной теме. Здесь следует отметить крупное обобщение, посвященное типоморфизму пиритов золоторудных месторождений (Коробейников и др., 1993), в котором заметное место уделено термоэлектрическим свойствам этого минерала, с дальнейшим обоснованием зависимости знака и значения коэффициента ТЭДС пирита от температуры его образования. В данной работе на большом количестве примеров были развиты представления об индикаторной роли такого параметра и типа проводимости для выявления зональности рудных тел и месторождений, а также смены типа проводимости с глубиной образования. В последующие годы исследования ТЭДС проводились в основном в Сибири (Романов, 2008, 2011, 2017; Вагина, Рудмин, 2010; Пшеничкин и др., 2015; Пшеничкин, Гаврилов, 2018, 2019; Тарасова и др., 2022), за редким исключением (Кулешевич, Белашев, 1998; Гамянин и др., 2003; Теут, Куленова, 2013).

В результате накопленного исследовательского материала можно сказать, что установленная связь ТЭДС пирита и арсенопирита с температурой образования их парагенезисов (Коробейников и др., 1993) имеет сложную зависимость, связанную со скачкообразным изменением в области «р-п» перехода (Красников и др., 1983) и определяемую вариациями парциального давления серы при образовании минералов (Фаворов и др., 1972). Близкая картина получена и для зависимости рассматриваемого параметра от количества примесей в сульфидах (Коробейников и др., 1993; Кулешевич, Белашев, 1998), а на примере пирита Николаевского колчеданного месторождения (Теут, Куленова, 2013), подчеркивающая еще и примесную природу проводимости этого минерала. Так, высокие концентрации Co и Ni характерны для «п-пирита», а Ag для «р-пирита». В общей форме факторы, отвечающие за проводимость пирита и арсенопирита, рассмотрены в работе (Фаворов и др., 1972), в которой показана типоморфность примеси As для пирита «р-типа» электропроводимости. Здесь показательны наши современные данные по типоморфности As (среднее 1912 г/т) для пирита «р-типа» третьей генерации в сравнении с пиритом «п-типа» четвертой генерации (191 г/т) месторождения Угахан (Тарасова и др., 2022). К сожалению, такие исследования были проведены до современной эпохи локальных методов анализа состава минералов и не получили развития дальше, что ограничило их востребованность

в генетических построениях. На наш взгляд, это и привело к тому, что интересные в прогнозно-поисковом назначении методические подходы применения ТЭДС (Красников и др., 1983; Коробейников и др., 1993), несмотря на приборные разработки (Красников и др., 1983), постепенно сошли на нет.

Однако с позиции минералогии электрические свойства минералов являются одними из важных их атрибутов и могут служить для генетических построений, особенно в ситуациях, когда традиционные методы исчерпаны. Поэтому авторы, занимаясь типоморфизмом пирита и арсенопирита – главных рудных минералов месторождений золота, пришли к необходимости привлечения электрических свойств как для более полной характеристики этих минералов, так и для оценки возможности применения их в генетических построениях, особенно для прожилково-вкрапленных руд и зон рассеянной сульфидизации, распространенных в структурах разновозрастных орогенных поясов. Исходя из вышеизложенного, мы пришли к выводу о необходимости использования локального метода измерения ТЭДС, позволяющего в наибольшей степени учитывать неоднородности минеральных фаз и их кристаллов. В предлагаемой статье на примере изучения сульфидов ряда золоторудных объектов и зон региональной пиритизации рудных зон Северо-Востока Азии и Бодайбинского синклинория в Байкало-Патомском нагорье приведены первые результаты нашего исследования.

Аппаратура и методика исследования. Термоэлектрическая движущая сила полупроводника определяется двумя слагаемыми, каждое из которых соответствует вкладу, вносимому электронами и «дырками», которые имеют противоположные знаки. В случае электронного полупроводника «п-типа» на горячем конце возникает положительный объемный заряд, поскольку электроны диффундируют от горячего конца к холодному. В случае дырочного полупроводника «р-типа» знак ТЭДС обратный. Для определения типа проводимости образца минерала используется ТЭДС термопары медь – образец минерала, возникающая при нагреве находящегося на поверхности образца «горячего» электрода или при касании нагретым до определенной температуры «горячим» электродом поверхности образца. При этом «холодный» электрод также находится на поверхности образца. Для измерения и контроля температуры «горячего» и «холодного» электродов используются термопары хромель – алюмель (ТХА), установленные непосредственно на электродах.

На рис. 1 показан созданный нами на основе опубликованных данных (Розова, 1970; Красни-

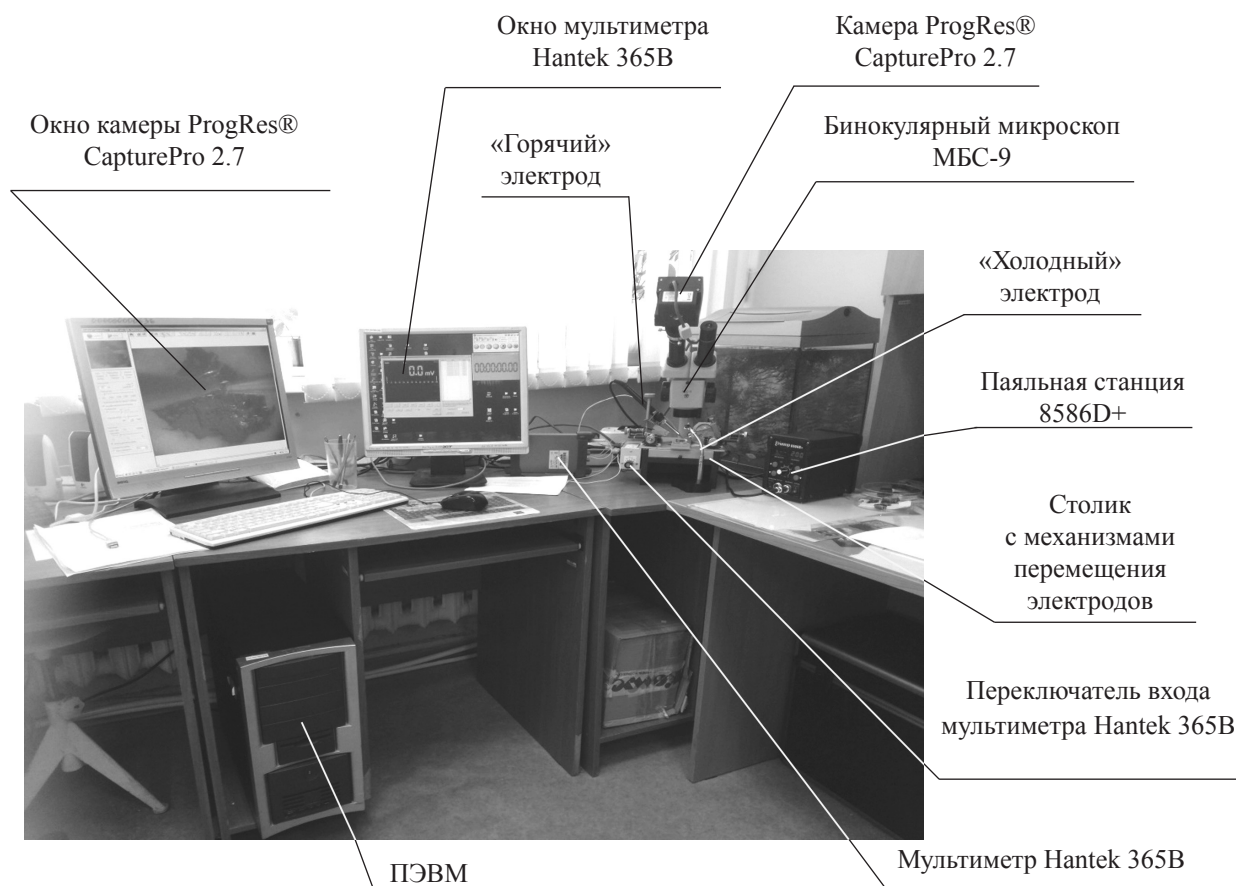


Рис. 1. Общий вид измерительного комплекса

Fig. 1. General view of the measuring system

ков и др., 1983) измерительный приборный комплекс. Он включает в себя оптическую часть (биноккулярный микроскоп МБС-9), механическую часть (столик для образцов с механизмами подъема-опускания и перемещения по двум горизонтальным осям «горячего» и «холодного» электродов, установленный на основании биноклярного микроскопа МБС-9 (далее – «столик»)) (рис. 2); электронную часть и комплект приспособлений (пресс ПМР-1, клеевой пистолет, светодиодный светильник, переходник камеры Motisam, переходник к окуляру биноклярного микроскопа МБС-9, термометр, образец сплава «Константан» на медной подложке). Электронная часть состоит из: (1) обрабатывающего блока – компьютера с ОС Windows XP, двумя мониторами, клавиатурой и «мышью»; (2) измерительного блока – мультиметр Hantek 365B, с переключателем входа мультиметра; (3) фиксирующей видеокамеры ProgRes® CapturePro 2.7; (4) нагревательного блока – паяльная станция 8586D+ с «горячим» и «холодным» электродами и термометрической системой, с хромель-алюмелевыми термопарами (ТХА) «горячего» и «холодного» электрода. Общая блок-схема приведена на рис. 3.

Этот комплекс позволяет работать с аншлифами руд при увеличениях до 40 крат. Минимальное расстояние между электродами 0.2 мм, обычно измерения проводятся при расстояниях 0.2–0.5 мм. Выбор в качестве базы микроскопа МБС-9 принят из-за большой сложности достижения стабильной разницы температур холодного и горячего электродов при работе с микроскопом более высокого уровня, вследствие сильного влияния температурного поля горячего электрода. Измерения выполнялись в полированных аншлифах. В каждом образце было выполнено в основном от 5 до 25 замеров агрегатов и кристаллов пирита при разнице температур электродов +180 °С. Многократное измерение галенита и пирита одних и тех же образцов показало разброс ошибок для коэффициента ТЭДС от ± 2 до ± 9 мкВ/°С, в зависимости от количества замеров. Результаты в таблицах приведены в милливольтгах и в мкВ/°С, с дальнейшим обсуждением в тексте и сопоставлением данных именно по коэффициенту ТЭДС. Мы придерживаемся такого подхода, поскольку разными исследователями (Щека, Калмыкова, 1966; Пшеничкин и др., 1976а,б) была установлена прямая зависимость ТЭДС минералов в милливольтгах от температу-

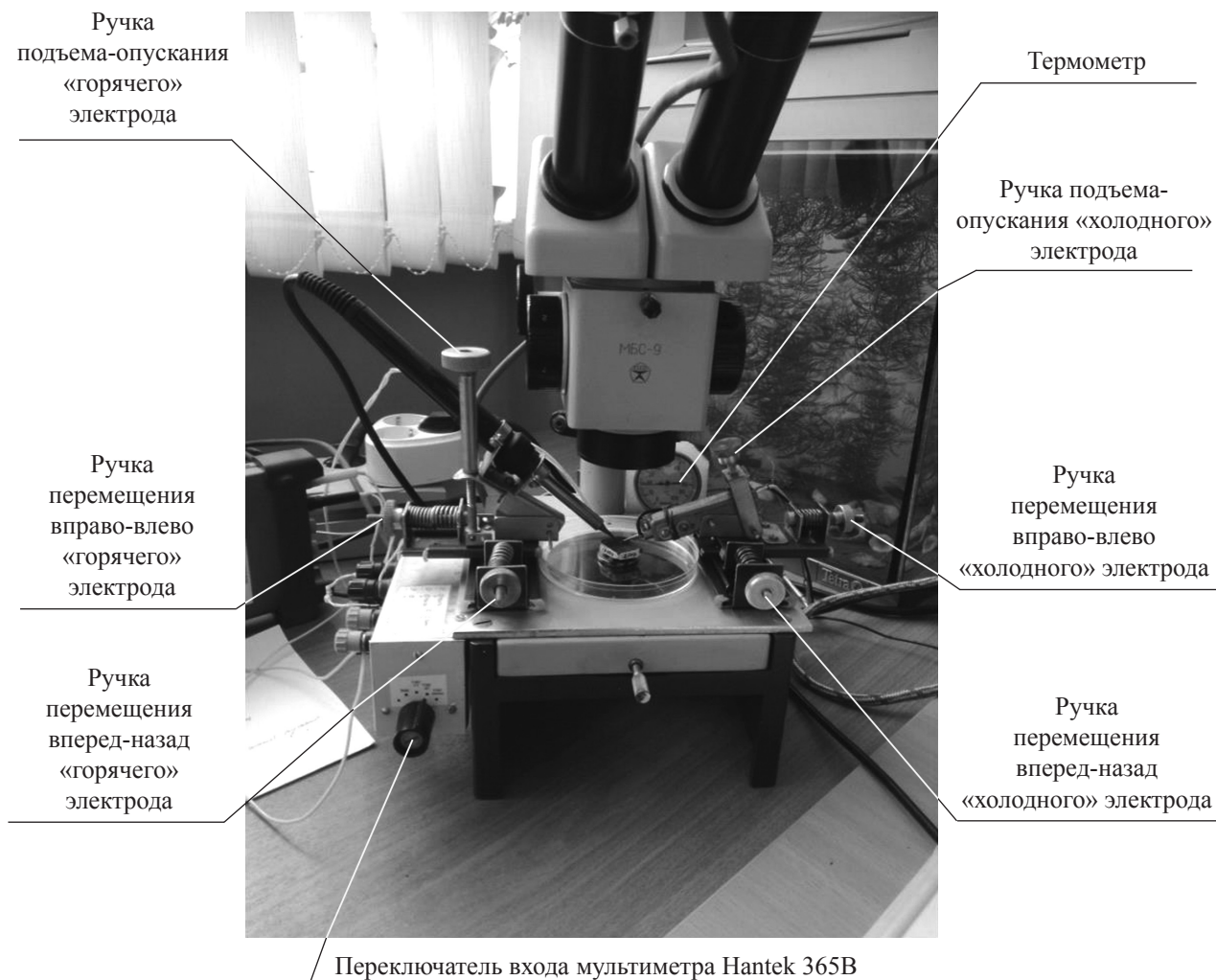


Рис. 2. Общий вид и составные части установки для измерения ТЭДС минералов из аншлифов на базе бинокуляра МБС-9

Fig. 2. General view and components of the installation for measuring the EMF of minerals from polished sections based on the MBS-9 binocular

ры нагрева горячего электрода, что требует учета этого фактора при сравнении данных, полученных при разных условиях.

Краткая характеристика изученных объектов. Нами были изучены термоэлектрические свойства пирита, пирротина и арсенопирита золоторудных месторождений орогенного типа двух крупных золотоносных регионов – Яно-Колымского орогенного пояса Северо-Востока России и Бодайбинского синклинория Саяно-Байкальской орогенной системы. Выбор объектов, с одной стороны, основан на уже известной изученности электрофизических свойств сульфидов в Саяно-Байкальской системе (Вагина, Рудмин, 2010; Пшеничкин и др., 2015; Пшеничкин, Гаврилов, 2018) и имеющемся авторском материале, собранном во время полевых работ 2016 г. в этом регионе, а также на наличии большой коллекции у авторов по сульфидам Яно-Колымского

орогенного пояса, а с другой – возможностью сопоставить сульфиды разновозрастных орогенных месторождений.

Золоторудные месторождения, минералы которых изучены, подробно охарактеризованы во многих публикациях (Бодайбинский синклинорий – Буряк, 1969, 1975; Казакевич и др., 1971; Рундквист и др., 1992; Буряк, Хмелевская, 1997; Иванов, 2014; Distler et al., 2004; Вуд, Попов, 2006; Large et al., 2007; Yudovskaya et al., 2016; Tarasova et al., 2020; Vursiy et al., 2020; Яно-Колымский пояс – Горячев, 1998, 2003; Гамянин и др., 2003; Goryachev, Pirajno, 2014; обе структуры – Goldfarb et al., 2014). Это позволяет нам ограничиться только общей характеристикой изученных типов руд, отсылая заинтересованных лиц к первоисточникам.

Для оруденения Бодайбинского района основным типом являются стратифицированные за-

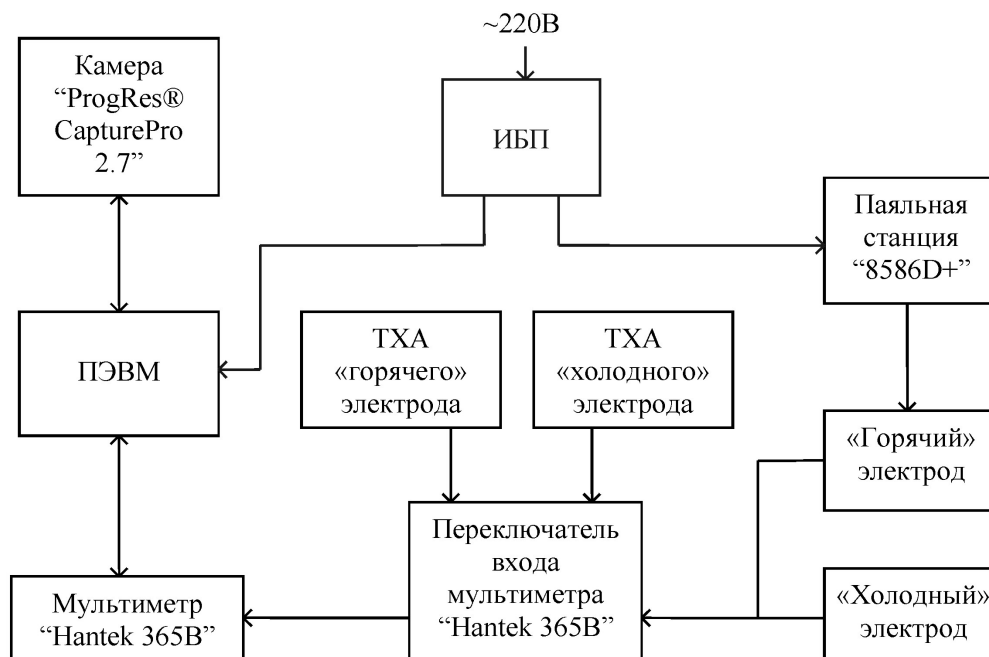


Рис. 3. Блок-схема комплекса измерения ТЭДС

Fig. 3. Flowchart of the EMF measuring system

лежи вкрапленных и прожилково-вкрапленных руд с редкой поздней кварцевожилковой минерализацией. Главными сульфидными минералами руд являются пирит (Сухой Лог, Западный), пирит и пирротин (Голец Высочайший), пирит и арсенопирит (Вернинское). В рудах выделяется до 6 генераций пирита (Large et al., 2007), но все же наиболее достоверны четыре (Tarasova et al., 2020; Тарасова и др., 2021, 2022). Нами изучена в основном третья генерация, главного этапа рудообразования раннепалеозойского возраста (Тарасова и др., 2021). Она представлена линзовидными сростками неограниченных индивидов, нередко рассеянной вкрапленностью. Для сравнения были изучены единичные аншлифы с пиритом из осадочных толщ вачской свиты неопротерозоя (БП-25) и сильно метаморфизованных сланцев мамской серии (БП-32).

Для Яно-Колымского пояса также выбраны объекты с жильно-прожилковым и вкрапленным оруденением в дайках (Восточное), в осадочных толщах (Казаковское, Матросов), а также ареалы пиритизации, сопровождающие зоны крупных региональных разломов (Хара-Урях, Спокойный, Озерный, Среднекан) Дебинского, Среднеканского и Чай-Юрьинского, охарактеризованные ранее (Горячев и др., 2020). В рудах изучены пириты и арсенопириты одной генерации. Пириты обычно имеют кубическую морфологию индивидов размерностью первые миллиметры, арсенопириты – уплощенно-ромбическую такой же размерности. Для сравнения: в работе приведены также авторские данные по ТЭДС аналогичных пирита и арсенопирита жильного

типа орогенного оруденения (Светлое), дайкового типа (Басугуньинский рудно-магматический узел и др.) и золото-висмутового типа (Мякитский рудно-магматический узел), полученные в лаборатории ЗаБНИИ в 1989 г. при анализе зерен монофракций и, частично, опубликованные ранее (Гамянин и др., 2003). Для арсенопирита золото-висмутового типа характерна ассоциация с леллингитом, а не с пиритом, как в орогенных месторождениях золота. Для пирротина проведено также изучение, в целях сравнения, пирротина Cu-Ni месторождения Шануч магматического генезиса (Камчатка).

Результаты исследований сульфидных минералов Северо-Востока приведены в табл. 1. Для них характерны следующие значения, рассмотренные по изученным минералам.

Пирротин. Единичные выделения пирротина показали значения коэффициента ТЭДС около 10 мкВ/°С, весьма близкие к значению пирротина месторождения Шануч – 9.8 мкВ/°С.

Пирит. Пириты рудных объектов имеют близкие значения ТЭДС – от +232 до +305 мкВ/°С при относительно незначительном размахе этих величин. Причем только в пирите Казаковского месторождения выявлена одна проба с пиритом «р-п» типа. Сравнение полученных результатов с данными измерения ТЭДС по зернам монофракций рудного пирита, полученными нами в свое время в лаборатории ЗаБНИИ в Чите (табл. 2), показало хорошее совпадение (интервал значений ТЭДС от +274 до +303 мкВ/°С), т. е. независимо от способа измерения получены совпадаю-

Таблица 1. Значения ТЭДС рудных минералов месторождений и ареалов сульфидизации Северо-Востока Азии (разница $T_{\text{электродов}} - 180^\circ\text{C}$)Table 1. EMF values of ore minerals from deposits and sulfidization areas in Northeast Asia ($T_{\text{electrodes}}$ difference 180°C)

Объект	№ образцов (кол-во замеров)	Минерал	D, +/-, %	ТЭДС, мВ	ТЭДС, мВ размах	ТЭДС, мкВ/°C
Рудные месторождения Северо-Востока Азии						
Шануч	Ш-10 (10)	Пирротин	100	+1.75	+1.2...+2.33	+9.8
Восточное	Вост-8а (9)	Пирит	100	+49.34	+44.25...+59.52	+274
	Вост-12 (10)	Арсенопирит	-100	-36.31	-31.59...-38.69	-202
Казаковское	Каз-2 (10)	Арсенопирит	-100	-41.11	-29.56...-47.48	-228
	Каз-6 (7)	Пирит	+43/-57	+41.78/-48.20	+35.5...+50.7 / -35.7...-73.7	+232/-268
Матросов	БН (4)	Арсенопирит	-100	-37.85	-35.71...-40	-210
	БН (4)	Пирит	100	+54.87	+53.04...+57.94	+305
Ареалы вкрапленности пирита в зонах крупных региональных разломов						
Спокойный	37Б-17-1 (5)	Пирит	100	+35.19	+25.28...+48.5	+195
	37Б-17-1 (1)	Пирит	100	+7.56		+42
	37Б-17-2 (8)	Пирит	100	+38.73	+33.26...+55.96	+215
	2003 (14)	Пирит	100	+50.3	+37.23...+64.28	+251
	2009 (25)	Пирит	100	+51.63	+41.34...+64.27	+258
Среднекан	160-2-19 (10)	Пирит	100	+66.53	+61.12...+70	+370
	160-1-19 (2)	Пирротин	100	+1.78	+1.69...+1.87	+10
	160-1-19 (1)	Пирит	100	+13.76		+76
	160-1-19 (6)	Пирит	100	+57.47	+49.22...+66.28	+319
	163-19-п (7)	Пирит	100	+57.54	+41.96...+69.94	+320
	163-19-в1 (2)	Пирит	100	+30.98	+29.85...+32.12	+172
	163-19-в2 (2)	Пирит	100	+61.92	+57.14...+66.71	+344
	163-19-в3 (2)	Пирит	100	+78.35	+76.27...+80	+435
Озерный	130-18 (6)	Пирит	100	+66.52	+58.86...+76.75	+369
	130-18 (1)	Пирит	100	+12.01		+67
	136-18 (8)	Пирит	+44/-56	+22.70/-17.47	+20.22...+27.35 / -11.3...-27.88	+126/-97
	136-18 (1)	Пирит		+56.54		+314
	139-18 (9)	Пирит	100	+62.17	+46.48...+74.49	+345
	139-18 (1)	Пирит	100	+28.80		+155
	2107 (11)	Пирит	100	+51.17	+34.14...+66.41	+256
Хара-Урях	133-19 (7)	Пирит	+57/-43	+13.41/-22.00	+11...+15.68 / -17.14...-24.00	+74/-122

щие данные, что указывает на достоверность работы нашей аппаратуры. Такая же ситуация, но уже в пределах одного месторождения установлена и для арсенопирита (см. ниже).

Пириты из ареалов вкрапленности, сопровождающих зоны крупных разломов, по нашим данным, характеризуются большими интервалами разброса значений коэффициента ТЭДС (см. табл. 1). Среди них можно выделить две основные группы с ТЭДС +195...+260 мкВ/°C и +310...+370 мкВ/°C, с единичными отклонениями в сторону как минимальных (до +42...+76 мкВ/°C), так и максимальных (до +435 мкВ/°C) значений этого параметра. Также, в отличие от рудного пирита (см. табл. 1 и 2), здесь обнаружены редкие образцы с «р-п» пиритом в участках «Озерный» и «Хара-Урях» зоны Чай-Юрьинского разлома (Горячев и др., 2020).

Арсенопирит. Значения коэффициента ТЭДС арсенопирита трех изученных объектов лежат в узких пределах – от -202 до -228 мкВ/°C (см.

табл. 1), что близко к ранее полученным замерам ТЭДС жильных и дайковых месторождений орогенного типа (-165...-254 мкВ/°C). При этом арсенопирит Восточного месторождения, по нашим данным, имеет коэффициент ТЭДС -202 мкВ/°C, что полностью соответствует ранее полученному значению -211 мкВ/°C (см. табл. 2), хотя аномального арсенопирита «р-типа» (см. табл. 2) в изученных образцах не зафиксировано.

Результаты исследования сульфидов крупнейших месторождений Бодайбинского синклинария показаны в табл. 3. Для них характерны следующие значения, по минералам.

Пирротин. Он отмечен в рудах Западного фланга Сухого Лога, заметно распространен в рудах месторождения Голец Высочайший и в метаморфических сланцах Мамского антиклинария. Имеет значения коэффициента ТЭДС от +10 до +13 мкВ/°C, не различаясь в разных местонахождениях.

Пирит – главный минерал руд всех трех изученных месторождений. По своим электриче-

Таблица 2. Значения ТЭДС монофракций арсенопирита и пирита золоторудных месторождений Яно-Колымского золотоносного пояса (разница $T_{\text{электродов}} 140^\circ\text{C}$)Table 2. EMF values of monofractions of arsenopyrite and pyrite from gold deposits within the Yana-Kolyma gold-bearing belt ($T_{\text{electrodes}}$ difference 140°C)

Месторождение	Кол-во проб	Минерал	D, %	$V_{\text{сред}}, \text{mV}$	A, мкВ/°C	Размах A
Светлое*	4	Арсенопирит	-100	-27.13	-194	-176...-208
Дайка Восточная**	3	Арсенопирит	-100	-29.5	-211	-194...-232
	2	Арсенопирит	-68	18/-18.9	129/-135	93-164 / -109... -161
Штурмовское**	7	Арсенопирит	-100	-29.22	-209	-191... -217
	1	Пирит	100	38.35	274	—
Транспортная**	2	Арсенопирит	-100	-25.55	-182.5	-168... -197
Пятилетка**	4	Арсенопирит	-100	-23.1	-165	-157... -174
	1	Пирит	100	42.45	303	
Басугуньинский рудно-магматический узел						
Дарьял**	2	Арсенопирит	-100	-24.4	-174	-159... -189
	1	Пирит	100	38.7	276	
Утинское, дайка № 6**	4	Арсенопирит	-100	-24.5	-175	-163... -186
	3	Пирит	100	43.2	308.5	+295... +316
Утинское, дайка № 7**	10	Арсенопирит	-100	-24.5	-175	
	1	Арсенопирит	-85	+36.30/-25.35	259.5/-181	
	1	Пирит	100	33.25	237.5	
Версаль***	3	Арсенопирит	100	23.0	164	+157... +168
Мякитский рудно-магматический узел						
Мякитское***	1	Арсенопирит	75	28.9/-12.6	206/-90	
	1	Арсенопирит	100	23.6	169	
Безалаберный**	1	Арсенопирит	-100	-35.55	-254	

*Au-кварцевое жильное орогенное.

** Au-кварцевое дайковое орогенное.

***Au-Bi, связанное с гранитоидами. В каждой пробе измерено по 20 зерен. Характеристика месторождений и рудно-магматических узлов дана в работах (Горячев, 1998; Гамянин и др., 2003).

ским свойствам он оказался весьма неоднородным (см. табл. 3). Для месторождения Голец Высочайший характерен максимальный разброс значений коэффициента ТЭДС. Так, пирит-III (Тарасова и др., 2021) нами характеризуется «р-п» (+98/-93; +355/-67 мкВ/°C) и «п» (-48, -120 мкВ/°C) типами, а пирит-IV является только пиритом «п-типа» с максимально отрицательными значениями (-242 и -323 мкВ/°C) коэффициента ТЭДС. Для месторождения Сухой Лог (Западный) пирит, соответствующий пириту-III месторождения Голец Высочайший, характеризуется в основном «р-типом» электропроводимости с коэффициентом ТЭДС от +95 до +359 мкВ/°C и наличием пирита «р-п» (+311/-41 и +298/-149 мкВ/°C) и «п» (-78 мкВ/°C) типов. Наши данные показали здесь большее разнообразие типов пирита, чем в известных публикациях (Пшеничкин и др., 2015; Пшеничкин, Гаврилов, 2018), и несколько меньший уровень значений коэффициента ТЭДС, который по данным указанных исследователей варьирует от +180 до +553 мкВ/°C (5 проб). Пирит «р-типа» Вернинского месторождения по значениям коэффициента ТЭДС (+85...+334 мкВ/°C) оказался ближе к пириту

Западного участка Сухого Лога. Близкие результаты получены нами и для пиритов-III («р-тип») и -IV («п-тип») соседнего месторождения Угахан (Тарасова и др., 2022) (см. также табл. 3).

Арсенопирит изучен только в рудах Вернинского месторождения, где он встречается в заметных количествах. Для него характерен незначительный размах значений коэффициента ТЭДС – от -179 до -187 мкВ/°C (см. табл. 3), что вполне сопоставимо с арсенопиритом месторождений Северо-Востока Азии (см. табл. 1 и 2).

Обсуждение результатов. Полученные результаты свидетельствуют о неодинаковом значении электрических свойств разных минералов для целей генетической минералогии.

Так, наименее информативным оказался пирротин, который, вне зависимости от места и типа месторождения, имеет практически одинаковые значения ТЭДС от +1.2 до +3.29 мВ или +9.8...+13 мкВ/°C. Неожиданно пирротин позднемагматического медно-никелевого месторождения Шануч показал наименьшие значения ТЭДС, чем гидротермальный пирротин золоторудных объектов, что противоречит известным данным (Щека, Калмыкова, 1966).

Таблица 3. Значения ТЭДС сульфидов месторождений Бодайбинского синклинория (разница $T_{\text{электродов}} - 180^\circ\text{C}$)Table 3. EMF values of sulfides from deposits within the Bodaibo synclinorium ($T_{\text{electrodes}}$ difference 180°C)

Объект	Номера образцов (кол-во замеров)	Минерал	D, +/-, %	Среднее ТЭДС, мВ	Размах ТЭДС, мВ	ТЭДС, мВ/°C
Рудные объекты Бодайбинского синклинория						
Западный (верх карьера)	3-2 (10)	Пирит-III	100	+62.78	+56.51...+74.11	+349
	3-3 (11)	Пирит-III	+73/-27	+55.96/-7.37	+47.95...+63.29/-5.98...-7.07	+311/-41
	3-5 (13)	Пирит-III	100	+51.89	+34.77...+60.08	+288
	3-6 (3)	Пирит-III	+67/-33	+53.70/-26.86	+53.68...+53.89/-26.86	+298/-149
	3-11 (10)	Пирит-III	+100	+64.57	+52.42...+70.95	+359
Западный (дно карьера)	3-17 (9)	Пирит-III	-100	-14.09	-7.58...-21.87	-78
	3-18 (7)	Пирит-III	+100	+48.35	+45.34...+64.34	+267
	3-18 (1)	Пирит-III		+17.18		+95
	3-17 (4)	Пирротин		+2.35	+1.98...+3.29	+13
Высочайший	В-24 (8)	Пирит-III	+12/-88	+17.66/-16.72	+17.66/-11.81...-25.2	+98/-93
	В-24 (6)	Пирротин	+100	+2.37	+1.80...+3.09	+13
	В-32 (10)	Пирит-III	-100	-21.71	-13.69...-34.7	-120
	Вч-3-1 (6)	Пирит-IV	-100	-58.08	-48.63...-68.78	-323
	Вч-3-1 (4)	Пирротин	+100	+1.86	+1.67...+2.15	+10
	Вч-6А (10)	Пирит-III	+80/-20	63.93/-11.91	+55.9...+72/-7.9...-16.07	+355/-67
	Вч-3 (6)	Пирит-III	+100	-8.69	-7.89...-9.89	-48
	Вч-3 (6)	Пирротин	+100	+2.21	+1.82...+2.93	+12
Вернинское	Вч-3а в кварце (7)	Пирит-IV	-100	-43.54	-30.62...-60.45	-242
	Вр-7 (7)	Пирит-III	+100	60.13	+50.63...+65.75	+334
	Вр-7 (5)	Арсенопирит	-100	-32.26	-30.31...-33.51	-179
	Вр-7-1(10)	Арсенопирит	-100	-33.68	-31.4...-36.3	-187
	Вр-8-1 (8)	Пирит-III	+100	+46.58	+39.75...+50.14	+259
	Вр-8-1 (7)	Арсенопирит	-100	-32.49	-28.84...-39.43	-180
	Вр-9 (9)	Пирит-III	+100	+34.63	+20.88...+52.00	+192
	В-41 (4)	Пирит-III	+100	+15.25	+14.74...+15.66	+85
Угахан (Тарасова и др., 2022)	В-41 (2)	Пирит-III	+100	+37.61	+36.41...+38.81	+209
	В-41 (5)	Арсенопирит	-100	-33.66	-31.55...-35.22	-187
Вкрапленные сульфиды в осадочных и метаморфических толщах Бодайбинского синклинория						
Вача	БП-25 (8)	Пирит	+75/-25	+40.27/-22.40	+19.27...+48.21/-18.76...-26.9	+223/-124
Мамская зона	БП-32 (5)	Пирротин	+100	2.15	2.0-2.3	12

Наиболее интересными получились результаты по изучению ТЭДС пирита, электрические свойства которого весьма информативны (Коробейников и др., 1993). С одной стороны, наши данные показали сходные значения и преобладание пирита «р-типа» в изученных образцах, что свидетельствует о близких условиях формирования изученных минералов руд (рис. 4), с другой – выявились и некоторые различия.

Так, позднемезозойские месторождения характеризуются заметным преобладанием пирита «р-типа», при редком проявлении «р-п типа», а позднепротерозойские – раннепалеозойские

руды Бодайбинского синклинория отличаются большим разнообразием типов проводимости пирита и «р» и «р-п» и «п» и существованием определенных закономерностей в их встречаемости.

Максимальный разброс значений коэффициента ТЭДС и разнотипности по проводимости пирита-III для месторождения Голец Высочайший характеризует минералогические особенности этого объекта (Тарасова и др., 2021), обусловленные тем, что данное месторождение расположено максимально близко к оси термально-метаморфического купола раннего палеозоя в поле более высоких температур (Пет-

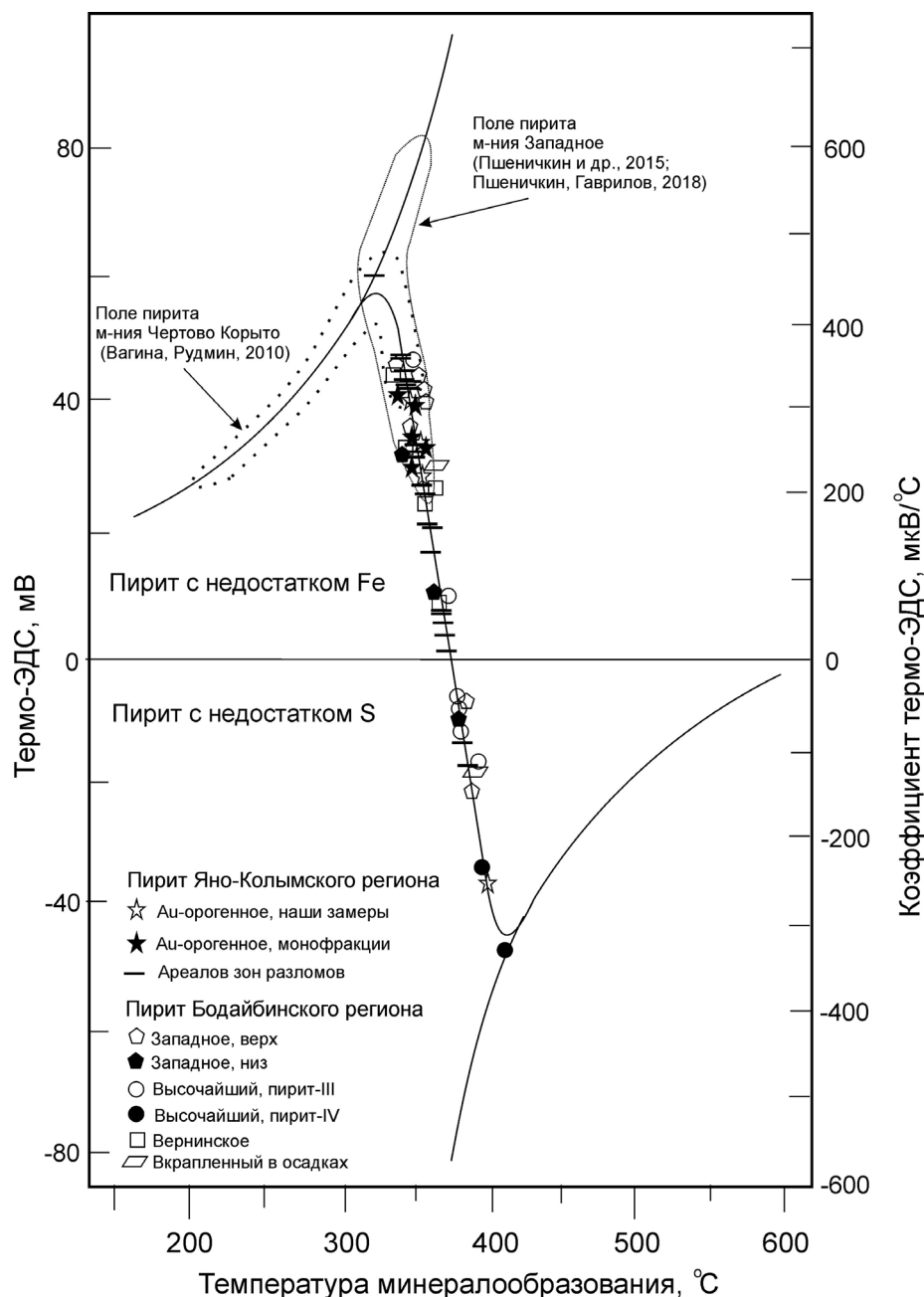


Рис. 4. Распределение точек анализов коэффициента ТЭДС пирита на диаграмме (Красников и др., 1983), с упрощениями и изменениями

Fig. 4. Distribution of the analysis points for the pyrite EMF coefficient on the diagram (Krasnikov et al., 1983), simplified and altered

ров, Макрыгина, 1975). Это фиксируется в сочетании в рудах пирита-III «р-п» и «п» типов, что отличает его от руд месторождений Угахан (Тарасова и др., 2022) и Вернинского, расположенных на большем удалении от купола, и сближает с пиритом месторождения Чертово Кoryто, локализованного в сильно метаморфизованных породах раннего протерозоя. Для последнего характерны вариации коэффициента ТЭДС от +167 до +447 мкВ/°C, при наличии «р-п» пирита (до 40 %), с аномальным значением ТЭДС -400... -447 мкВ/°C (Вагина, Рудмин, 2010).

Элементы локальной вертикальной зональности ТЭДС пирита руд намечаются для участка «Западный» Сухоложского месторождения. Здесь пирит, соответствующий пириту-III месторождения Голец Высочайший, на верхних горизонтах карьера (+920 м) характеризуется в основном «р-типом» электропроводимости с коэффициентом термо-ЭДС от +288 до +359 мкВ/°C, что близко известным литературным данным (Пшеничкин и др., 2015; Пшеничкин, Гаврилов, 2018), а также наличием «р-п» пирита (+311/-41 и +298/-149 мкВ/°C). Для пирита-III, отобранно-

го на дне карьера (+875 м), характерно сочетание проб с пиритом «р» (+267 и +95 мкВ/°С) и «п» (-78 мкВ/°С) типа, что, вероятно, и отражает вертикальную зональность оруденения. Эти результаты соответствуют наблюдениям для золоторудных месторождений Средней Азии, Алтае-Саянской области и Забайкалья (Красников и др., 1983; Коробейников и др., 1993).

Полученные данные по электрическим свойствам пирита, на наш взгляд, свидетельствуют о важной роли этого показателя в фиксации возможной региональной зональности золотого оруденения в Бодайбинском синклинории: от наиболее глубинного и близкого к ядру Мамского метаморфического ареала месторождения Голец Высочайший, через Сухой Лог и Угахан, к Вернинскому месторождению, которое, по всей видимости, представляет собой верхний и самый удаленный уровень рудообразующей системы.

Промежуточное положение по значениям ТЭДС занимает пирит ареалов вкрапленности в осадочных породах зон крупных разломов Яно-Колымского орогенного пояса, для которого характерен широкий интервал разброса значений коэффициента ТЭДС «р-типа» от +42...+76 до +435 мкВ/°С, с находками «р-п» пирита. Это сближает пирит позднемезозойских ареалов зон крупных разломов с пиритом сульфидно-вкрапленных руд Бодайбинского синклинория, которые возникли в результате многоступенчатого преобразования осадочных пород метаморфогенными флюидами позднеэопротерозойского метаморфического и раннепалеозойского плутонометаморфического событий (Будяк и др., 2016, 2019; Goryachev, Budyak, 2017; Горячев и др., 2019). На наш взгляд, полученные данные свидетельствуют о сходстве механизмов их формирования из региональных флюидных потоков (Горячев и др., 2020).

Также интересным, но предварительным результатом является установление принадлежности к «п-типу» пирита-IV месторождения Голец Высочайший, где поздний крупнокристаллический пирит в кварцевой оторочке и в кварце (Вч-3а и 3-1 – см. табл. 3) оказался пиритом с максимально отрицательными значениями (-242 и -323 мкВ/°С) коэффициента ТЭДС. Аналогичный результат получен нами и для позднего пирита месторождения Угахан (Тарасова и др., 2022). Его генетический смысл пока неясен, кроме ТЭДС (см. рис. 4), нет других данных о высокотемпературности этой генерации, что требует дополнительных исследований, поскольку из примесей в таком пирите месторождения Голец Высочайший отмечен только (доли %) As (Тарасова и др., 2021), который характерен для пирита дырочно-го типа (Фаворов и др., 1972), хотя для пирита-IV «п-типа» соседнего месторождения Угахан количество As на порядок меньше (Тарасова и др., 2022). Несмотря на это, как критерий отличия пирита разных генераций, возможно, данный по-

казатель будет важен. Требуется накопление дополнительных данных.

Как показывают наши результаты, арсенопирит разнотипных месторождений разных регионов имеет сходные параметры коэффициента ТЭДС, что может быть обусловлено близостью химического состава и условий кристаллизации этого минерала в терригенно-осадочных толщах. Составы арсенопирита изученных орогенных месторождений золота Северо-Востока Азии (Светлое, Восточное, Утинское, Транспортное, Штурмовское, Дарьял) по данным электронно-зондового анализа имеют незначительные вариации главных компонентов (As – 41.0–43.2; S – 22.3–20.3; Fe – 34.8–35.3 мас.%), с заметным преобладанием серы в их составе (Горячев, 2003). В то же время арсенопирит золото-висмутовых месторождений (Версаль, Мякитское) характеризуется, наоборот, преобладанием мышьяка (As – 47.7–47.9; S – 18.7–18.3; Fe – 33.4–33.6 мас.%) и парагенезисом с леллингитом (Горячев, 2003). Это нашло отражение в разных параметрах проводимости минерала, отрицательной для орогенных месторождений и положительной для золото-висмутовых объектов.

Арсенопирит Вернинского месторождения также характеризуется существенным преобладанием серы в своем составе (например, проба ВР-41: As – 41.78–43.85; S – 21.99–21.32; Fe – 34.23–35.36 мас.%, 4 анализа, наши неопубликованные данные), что и подтверждается близкими значениями его коэффициента ТЭДС с арсенопиритом золоторудных месторождений Яно-Колымского пояса. А несколько меньшие для него значения этого коэффициента, возможно, свидетельствуют о немного повышенных температурах его кристаллизации по сравнению с арсенопиритами Северо-Востока (рис. 5).

В целом же данные ТЭДС арсенопирита золоторудных месторождений Яно-Колымского пояса и Бодайбинского синклинория указывают на близкие условия кристаллизации этого минерала в интервале температур от 360 до 320 °С. Несколько обособлен от них по ТЭДС (-213...-313 мкВ/°С) арсенопирит месторождения Чертово Кoryто, расположенного к северу от Бодайбинского синклинория, в Тонодском поднятии (Вагина, Рудмин, 2010). Вероятно, это самая низкотемпературная разновидность арсенопирита (около 300 °С) (см. рис. 5).

Особо надо отметить результаты изучения арсенопирита месторождения Восточное Яно-Колымского пояса. Это месторождение испытало контактовый метаморфизм со стороны поздне-мелового интрузива субщелочных гранитоидов (см., например, Горячев, 1998), что нашло отражение в наличии здесь в рудах арсенопирита «р-п типа» с аномальными значениями коэффициента ТЭДС для электронного типа проводимости (-109...-161 мкВ/°С) (см. табл. 2), отличающе-

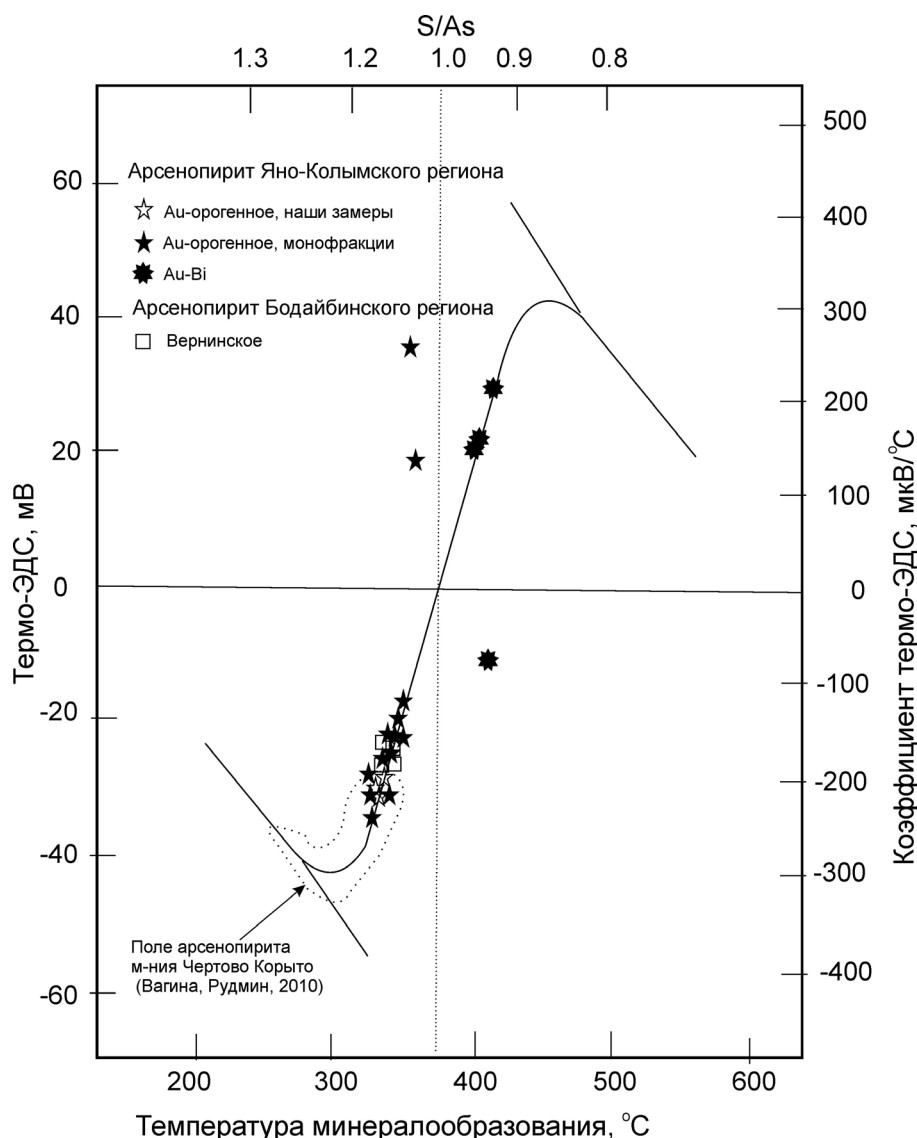


Рис. 5. Распределение точек анализов коэффициента ТЭДС арсенопирита на диаграмме (Красников и др., 1983), с упрощениями и изменениями

Fig. 5. Distribution of the analysis points for the EMF coefficient of arsenopyrite on the diagram (Krasnikov et al., 1983), simplified and altered

гося от основной разности (-202...-211 мкВ/°С) (см. табл. 1 и 2) и соответствующего предположительному нагреву до 380 °С (см. рис. 5). А «р-п» разновидность арсенопирита, выявленная в дайке № 7 Утинского месторождения, показывает близкое сходство этого параметра (-181 мкВ/°С) с параметром основной разновидности арсенопирита «п-типа» (-171...-175 мкВ/°С) (см. табл. 2). Отсутствие в данном случае признаков контактового метаморфизма и сходство данных ТЭДС «п-типа» предполагает более высокотемпературное (360–330 °С) происхождение арсенопирита руд дайки № 7 Утинского месторождения по сравнению с дайкой № 6 (320–350 °С), основываясь на графике (см. рис. 5).

Заключение. Таким образом, значение ТЭДС для пирита и арсенопирита является важным ге-

нетическим признаком происхождения этих минералов. Термоэлектрические свойства пирита и арсенопирита могут быть использованы для определения не только температуры их образования, но и температурных параметров их метаморфизма, а также для характеристики генераций этих минералов. Разработка локальных методов измерения ТЭДС способствует возможности их применения для генетических построений, особенно при изучении золотого сульфидно-вкрапленного и жильно-прожилкового оруденения в структурах разновозрастных орогенных поясов, для чего требуется набор дополнительных данных.

Благодарности. Авторы глубоко благодарны к. г.-м. н. А. Я. Пшеничкину (Томск), чьи консультации во многом способствовали в продвижении авторов по освоению метода и оборудования по

изучению ТЭДС сульфидов, д. г.-м. н. Г. А. Юргенсону (Чита), обратившему в свое время внимание одного из авторов на метод, способствовавший выполнению анализов монофракций и чьи консультации послужили улучшению текста статьи, к. г.-м. н. В. М. Округину (Петропавловск-Камчатский), предоставившему образец месторождения Шануч, и А. М. Суковатову (Магадан), чьи умелые руки во многом способствовали созданию примененной исследовательской аппаратуры. Всем им авторы искренне признательны.

Работа выполнена в рамках госзаказа на исследования для СВКНИИ ДВО РАН и ИГХ СО РАН на 2022 г.

ЛИТЕРАТУРА

- Будяк А. Е., Горячев Н. А., Скузоватов С. Ю. Геодинамические предпосылки формирования масштабного оруденения в южном обрамлении Сибирского кратона в протерозое // Доклады Академии наук. 2016. Т. 470, № 5. С. 562–565.
- Будяк А. Е., Скузоватов С. Ю., Тарасова Ю. И., Ванг К. Л., Горячев Н. А. Единая неопротерозойская – раннепалеозойская эволюция рудоносных осадочных комплексов юга Сибирского кратона // Доклады Академии наук. 2019. Т. 484, № 3. С. 335–339.
- Буряк В. А. Генетические типы и закономерности локализации золотого оруденения Ленского района // Вопросы геологии и золотоносности Ленского района. Иркутск, 1969. С. 116–140.
- Буряк В. А. Метаморфогенно-гидротермальный тип промышленного золотого оруденения. Новосибирск : Наука, 1975. 144 с.
- Буряк В. А., Хмелевская Н. М. Сухой Лог – одно из крупнейших золоторудных месторождений мира. Владивосток : Дальнаука, 1997. 133 с.
- Вагина Е. А., Рудмин М. А. Кристалломорфология и термоэлектрические свойства пирита и арсенопирита в золоторудном месторождении Чертово Корыто (Патомское нагорье) // Известия Томского политехнического университета. 2010. Т. 317, № 1. С. 66–73.
- Вуд Б. Л., Попов Н. П. Гигантское месторождение золота Сухой Лог // Геология и геофизика. 2006. Т. 47, № 3. С. 315–341.
- Гамянин Г. Н., Горячев Н. А., Бахарев А. Г., Колесниченко П. П., Зайцев А. И., Диман Е. Н., Бердников Н. В. Условия зарождения и эволюции гранитоидных золоторудно-магматических систем в мезозоидах Северо-Востока Азии. Магадан : СВКНИИ ДВО РАН, 2003. 196 с.
- Горбатов Г. А. Термоэлектрические свойства пирита и галенита и возможная их связь с температурой минералообразования // Труды ВИМСа. 1957. С. 116–121.
- Горячев Н. А. Геология мезозойских золото-кварцевых жильных поясов Северо-Востока Азии. Магадан : СВКНИИ ДВО РАН, 1998. 210 с.
- Горячев Н. А. Происхождение золото-кварцевых жильных поясов Северной Пацифики. Магадан : СВКНИИ ДВО РАН, 2003. 143 с.
- Горячев Н. А., Игнатъев А. В., Веливецкая Т. А., Будяк А. Е., Тарасова Ю. И. Опыт применения локального анализа изотопного состава серы сульфидов руд крупнейших месторождений Бодайбинского синклинария (Восточная Сибирь) // Доклады Академии наук. 2019. Т. 484, № 4. С. 460–463.
- Горячев Н. А., Соцкая О. Т., Игнатъев А. В., Веливецкая Т. А., Горячева Е. М., Семышев Ф. И., Бердников Н. В., Малиновский М. А., Альшевский А. В. О сульфидной минерализации зон крупных разломов Яно-Колымского орогенного пояса // Вестник Северо-Восточного научного центра ДВО РАН. 2020. № 1. С. 11–29.
- Иванов А. И. Золото Байкало-Патомы (геология, оруденение, перспективы). Москва : ЦНИГРИ, 2014. 215 с.
- Казакевич Ю. П., Шер С. Д., Жаднова Т. П. и др. Ленский золоторудный район // Труды ЦНИГРИ. 1971. Вып. 85. Т. 1. 164 с.
- Коробейников А. Ф., Нарсеев В. А., Пишеничкин А. Я., Ревякин П. С., Арифуров Ч. Х. Пириты золоторудных месторождений (свойства, зональность, практическое применение). Москва : ЦНИГРИ, 1993. 213 с.
- Красников В. И., Сейфуллин Р. С., Суматохин В. А., Фаворов В. А. Некоторые вопросы методики изучения термоэлектрических свойств рудных минералов и интерпретации результатов измерений // Советская геология. 1975. № 8. С. 107–116.
- Красников В. И., Фаворов В. А., Суматохин В. А., Гурьевич А. С., Лапушков В. М., Романов В. Г., Зезюлина Э. Д. Методические рекомендации по использованию электрических свойств рудных минералов для изучения и оценки эндогенных месторождений. Ленинград : Мингео СССР, ЗабНИИ, 1983. 91 с.
- Кулешевич Л. В., Белашев Б. З. Колчеданное оруденение Восточной Карелии (опыт изучения состава и электрических свойств пиритов // Труды Карельского филиала РАН. 1998. Вып. 1. С. 57–72.
- Никулин В. Н., Павловский А. Б., Ставинский В. А. Термоэлектрические свойства арсенопирита как показатель глубины формирования оруденения // Геология рудных месторождений. 1976. № 2. С. 116–122.
- Петров Б. В., Макрыгина В. А. Геохимия регионального метаморфизма и ультраметаморфизма. Новосибирск : Наука, 1975. 341 с.
- Пишеничкин А. Я., Гаврилов Р. Ю. Пириты западного фланга Сухоложского золоторудного поля (Ленский рудный район) // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2018. Т. 329, № 5. С. 135–143.
- Пишеничкин А. Я., Гаврилов Р. Ю. Типоморфизм пиритов Ольховско-Чибикского золоторудного поля (Восточный Саян) // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2019. Т. 330, № 3. С. 60–72.
- Пишеничкин А. Я., Коробейников А. Ф., Комоедов А. Ф. Зависимость величины термо-ЭДС пиритов от температуры нагрева электрода // Известия Томского политехнического института. Томск : ТПИ, 1976а. Т. 264. С. 74–76.
- Пишеничкин А. Я., Коробейников А. Ф., Мацюшевский А. В. Особенности кристалломорфологии и термоэлектрических свойств пиритов // Известия Томского политехнического института. Томск : ТПИ, 1976б. Т. 264. С. 82–84.
- Пишеничкин А. Я., Гаврилов Р. Ю., Понамаренко М. А. Пириты золоторудного месторождения Западное (Бодайбинский район) // Успехи современного естествознания. 2015. № 1. С. 981–984.
- Рабинович К. Р., Булытников В. А., Акчурина В. М. Методические рекомендации по использованию термоэлектрических свойств пирита для прогнозирования золотого оруденения. Новосибирск : СНИИГГИМС, 1981. 75 с.

- Ревякин П. С., Ревякина Э. А. Электрические свойства пиритов и их поисковое значение // Разведка и охрана недр. 1978. № 7. С. 45–50.
- Розова Е. В. К методике измерения коэффициента термоэлектродвижущей силы рудных минералов // Труды ЦНИГРИ. 1970. Вып. 93. С. 45–57.
- Романов В. Г. Электрические свойства рудных минералов и их использование для решения минералогических и геологических задач // Вестник ЧитГУ. 2008. № 6 (51). С. 147–154.
- Романов В. Г. Зональность и прогнозная оценка эндогенных месторождений на основе температурных параметров термо-ЭДС и электропроводности сульфидов : автореф. дис. ... д-ра геол.-минер. наук. Улан-Удэ, 2011. 45 с.
- Романов В. Г. Статистическое обоснование зависимости «условия образования – состав – электрофизические свойства» сульфидных минералов // Вестник ЗабГУ. 2017. Т. 23, № 4. С. 23–32.
- Рундквист И. К., Бобров В. А., Смирнова Т. Н., Смирнов М. Ю., Данилова М. Ю., Ащеулов А. А. Этапы формирования Бодайбинского рудного района // Геология рудных месторождений. 1992. Т. 34. С. 3–15.
- Савицкий К. В., Горенков Н. Л., Сидорова М. В. Измерение коэффициента термоэлектродвижущей силы и удельной проводимости рудных минералов // Теория и практика обогащения руд цветных и благородных металлов : Труды ЦНИГРИ. Москва, 1980. Вып. 151. С. 53–58.
- Сейфуллин Р. С. Возможности и перспективы развития термоэлектрического метода изучения рудных минералов // Записки ВМО. 1978. Вып. 5. С. 519–528.
- Стеценко Н. С., Куделя В. К. Изучение термоэлектрических свойств рудных минералов под микроскопом // Минералогический сборник. Львов : Изд-во Гос. ун-та, 1974. Вып. 1. № 28. С. 31–39.
- Тарасова Ю. И., Будяк А. Е., Горячев Н. А., Игнатьев А. В., Веливецкая Т. А., Блинов А. В., Горячева Е. М. Типоморфизм сульфидов золоторудного месторождения Угахан (Байкало-Патомское нагорье) // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. 2022. Т. 503, № 1. С. 12–17.
- Тарасова Ю. И., Будяк А. Е., Иванов А. В., Горячев Н. А., Игнатьев А. В., Веливецкая Т. А., Радомская Т. А., Блинов А. В., Бабяк В. Н. Типоморфизм, типохимизм и изотопно-геохимические характеристики сульфидов железа месторождения Голец Высочайший (Восточная Сибирь) // Записки РМО. 2021. № 1. С. 63–75.
- Теут А. О., Куленова Н. А. Роль термоэлектричества в процессах самоорганизации полисульфидных руд // Термоэлектричество. 2013. № 1. С. 5–18.
- Фаворов В. А., Красников В. И., Сычугов В. С. Некоторые факторы, определяющие изменчивость полупроводниковых свойств пирита и арсенопирита // Известия АН СССР. Сер. геология. 1972. № 11. С. 72–84.
- Щека С. А., Калмыкова Т. Ф. К оценке относительных температур формирования пирротинов методом термо-ЭДС // Геохимия и минералогия магматогенных образований. Владивосток : ДВГИ ДФ СО АН СССР, 1966. С. 101–106.
- Distler V. V., Yudovskaya M. A., Mitrofanov G. L., Prokof'ev V. V., Lishnevsky E. N. Geology, composition, and genesis of the Sukhoi Log noble metals deposit, Russia // Ore Geology Reviews. 2004. Vol. 24. P. 7–44.
- Goldfarb R. J., Taylor R., Collins G., Goryachev N. A., Orlandini O. F. Phanerozoic continental growth and gold metallogeny of Asia // Gondwana Research. 2014. Vol. 25 (1). P. 49–102.
- Goryachev N. A., Budyak A. E. Conditions for the formation of the Lena gold-bearing area, Southern Siberia, Russia // SEG 2017 Ore Deposits of Asia: China and Beyond, September 17–20, Beijing, Abstracts. 2017. P. 135.
- Goryachev N. A., Pirajno F. Gold deposits and gold metallogeny of Far East Russia // Ore Geology Reviews. 2014. Vol. 59. P. 123–151.
- Large R. R., Maslennikov V. V., Robert F., Danyush-evsky L., Chang, Z. Multistage sedimentary and metamorphic origin of pyrite and gold in the giant Sukhoi Log deposit, Lena gold province, Russia // Economic Geology, 2007. Vol. 102. P. 1233–1267.
- Tarasova Yu. I., Budyak A. E., Chugaev A. V., Goryachev N. A., Tauson V. L., Skuzovatov S. Yu., Reutsky V. N., Abramova V. D., Gareev B. I., Bryukhanova N. N., Parshin A. V. Mineralogical and isotope-geochemical ($\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{34}\text{S}$ and Pb-Pb) characteristics of the Krasniy gold mine (Bai-kal-Patom Highlands): Constraining ore-forming mechanisms and the model for Sukhoi Log-type deposits // Ore Geology Reviews. 2020. 119. 103365. P. 1–24.
- Vursiy G. L., Zibrov I. A., Lobov S. G., Yakubchuk A. S. The Sukhoi Log Gold Deposit, Russia // SEG Special Publications. 2020. No. 23. P. 523–543 (Chapter 25).
- Yudovskaya M. A., Distler V. V., Prokofiev V. Yu., Akin-fiev N. N. Gold mineralisation and orogenic metamorphism in the Lena province of Siberia as assessed from Chertovo Koryto and Sukhoi Log deposits // Geoscience Frontiers. 2016. Vol. 7. P. 453–481.

Поступила в редакцию 20.07.2022 г.

SULFIDE THERMO-EMF: METHOD CAPABILITIES AND SIGNIFICANCE FOR MINERALOGICAL RESEARCH (Exemplified by the Study of Pyrite and Arsenopyrite Gold Deposits in the Eastern and Southern Margins of the Siberian Craton)

**N. A. Goryachev ^{1,2}, V. I. Mishunin ¹, E. M. Goryacheva ¹,
O. T. Sotskaya ¹, Yu. I. Tarasova ², A. E. Budyak ²**

¹North-East Interdisciplinary Scientific Research Institute n. a. N. A. Shilo, FEB RAS, Magadan
E-mail: goryachev@neisri.ru

²A. P. Vinogradov Institute of Geochemistry SB RAS, Irkutsk

On the example of studying the EMF of pyrrhotite, pyrite, and arsenopyrite from gold deposits of the Yana-Kolyma orogenic belt and the Bodaybo synclinorium, using the local determination method for polished sections, it is shown that this parameter for pyrite and arsenopyrite is an important

genetic sign of the their origin. Thermoelectric properties of pyrite and arsenopyrite can be used to estimate not only the temperature of their formation but also the temperature parameters of their metamorphism, as well as to characterize the generation of these minerals. The development of local methods for measuring EMF contributes to the possibility of using them for genetic constructions, especially in the study of gold sulfide-impregnated and lode-veinlet mineralization within structures of different-age orogenic belts.

Keywords: thermoelectric properties of pyrrhotite, pyrite, and arsenopyrite; orogenic gold deposits, Yana-Kolyma belt, Bodaibo synclinorium of the Sayan-Baikal belt.

REFERENCES

- Budyak, A. E., Goryachev, N. A., Skuzovatov, S. Yu., 2016. Geodynamic Prerequisites for the Formation of Large-scale Mineralization in the Southern Framing of the Siberian Craton in the Proterozoic, *Doklady Akademiyi Nauk*. 470, 5, 562–565 [In Russian].
- Budyak, A. E., Skuzovatov, S. Yu., Tarasova, Yu. I., Vang, K. L., Goryachev, N. A., 2019. Unified Neoproterozoic-Early Paleozoic Evolution of Ore-bearing Sedimentary Complexes in the South of the Siberian Craton, *Doklady Akademiyi Nauk*. 484, 3, 335–339 [In Russian].
- Buryak, V. A., 1969. Genetic Types and Patterns of Localization of Gold Mineralization in the Lensky Region, *Issues in Geology and Gold Mining in the Lena District*. Irkutsk. 116–140 [In Russian].
- Buryak, V. A., 1975. Metamorphogenic-Hydrothermal Type of Industrial Gold Mineralization. Novosibirsk, Nauka [In Russian].
- Buryak, V. A., Khmelevskaya, N. M., 1997. Sukhoi Log: One of the Largest Gold Deposits in the World. Vladivostok, Dalnauka [In Russian].
- Distler, V. V., Yudovskaya, M. A., Mitrofanov, G. L., Prokof'ev, V. V., Lishnevsky, E. N., 2004. Geology, Composition, and Genesis of the Sukhoi Log Noble Metals Deposit, Russia, *Ore Geology Reviews*. 24, 7–44.
- Favorov, V. A., Krasnikov, V. I., Sychugov, V. S., 1972. Some Factors Determining Variability of Pyrite and Arsenopyrite Semiconductor Properties, *Izvestiya AS USSR, Series: Geology*. 11, 72–84 [In Russian].
- Gamyranin, G. N., Goryachev, N. A., Bakharev, A. G., Kolesnichenko, P. P., Zaytsev, A. I., Diman, E. N., Berdnikov, N. V., 2003. Conditions for the Origination and Evolution of Granitoid Gold-Ore-Magmatic Systems in Mesozooids of Northeast Asia. Magadan, NEISRI FEB RAS [In Russian].
- Goldfarb, R. J., Taylor, R., Collins, G., Goryachev, N. A., Orlandini, O. F., 2014. Phanerozoic Continental Growth and Gold Metallogeny of Asia, *Gondwana Research*. 25 (1), 49–102.
- Gorbatov, G. A., 1957. Thermoelectric Properties of Pyrite and Galena and Their Possible Relationship with the Mineral Formation Temperature, *Trudy VIMS*. Moscow. 116–121 [In Russian].
- Goryachev, N. A., 1998. Geology of the Mesozoic Gold-Quartz Vein Belts in Northeast Asia. Magadan, NEISRI FEB RAS [In Russian].
- Goryachev, N. A., 2003. Origin of the Gold-Quartz Vein Belts of the North Pacific. Magadan, NEISRI FEB RAS [In Russian].
- Goryachev, N. A., Budyak, A. E., 2017. Conditions for the Formation of the Lena Gold-Bearing Area, Southern Siberia, Russia, *SEG 2017 Ore Deposits of Asia: China and Beyond*, September 17–20, Beijing, Abstracts. 135.
- Goryachev, N. A., Pirajno, F., 2014. Gold Deposits and Gold Metallogeny of Far East Russia, *Ore Geology Reviews*. 59, 123–151.
- Goryachev, N. A., Ignatiev, A. V., Velivetskaya, T. A., Budyak, A. E., Tarasova, Yu. I., 2019. Experience in the Application of Local Analysis of the Isotope Composition of Sulfur in Sulfides of Ores of the Largest Deposits of the Bodaibo Synclinorium (Eastern Siberia), *Doklady Akademiyi Nauk*. 484, 4, 460–463 [In Russian].
- Goryachev, N. A., Sotskaya, O. T., Ignatiev, A. V., Velivetskaya, T. A., Goryacheva, E. M., Semyshev, F. I., Berdnikov, N. V., Malinovskiy, M. A., Alshevskiy, A. V., 2020. On Sulfide Mineralization of Large Fault Zones in the Yana-Kolyma Orogenic Belt, *Bulletin of the North-East Scientific Center*. 1, 11–29 [In Russian].
- Ivanov, A. I., 2014. Baikal-Patom Gold: Geology, Mineralization, Prospects. Moscow, TsNIGRI [In Russian].
- Kazakevich, Yu. P., Sher, S. D., Zhadnova, T. P. et al., 1971. Lensky Gold-bearing Region, *Proceedings TsNIGRI*. 85, 1, 164 [In Russian].
- Korobeinikov, A. F., Narseyev, V. A., Pshenichkin, A. Ya., Revyakina, P. S., Arifulov, Ch. Kh., 1993. Pyrites of Gold Deposits (Properties, Zoning, Practical Application). Moscow, TsNIGRI [In Russian].
- Krasnikov, V. I., Favorov, V. A., Sumatokhin, V. A., Guryevich, A. S., Lapushkov, V. M., Romanov, V. G., Zezyulina, E. D., 1983. Guidelines for Using Electrical Properties of Ore Minerals for Studying and Evaluating of Endogenous Deposits. Leningrad, USSR Ministry of Geology, ZabNII [In Russian].
- Krasnikov, V. I., Seyfullin, R. S., Sumatokhin, V. A., Favorov, V. A., 1975. Some Questions of the Methodology for Studying the Thermoelectric Properties of Ore Minerals and Interpreting the Results of Measurements, *Sovetskaya Geologiya*. 8, 107–116 [In Russian].
- Kuleshevich, L. V., Belashev, B. Z., 1998. Pyrite Mineralization in Eastern Karelia: Experience in Studying the Composition and Electrical Properties of Pyrites, *Trudy Karelskogo Filiala RAN*. 1, 57–72 [In Russian].
- Large, R. R., Maslennikov, V. V., Robert, F., Danyushkevsky, L., Chang, Z., 2007. Multistage Sedimentary and Metamorphic Origin of Pyrite and Gold in the Giant Sukhoi Log Deposit, Lena Gold Province, Russia, *Economic Geology*. 1233–1267.
- Nikulin, V. N., Pavlovskiy, A. B., Stavinsky, V. A., 1976. Thermoelectric Properties of Arsenopyrite as an Indicator for the Depth of Mineralization, *Geology of Ore Deposits*. 2, 116–122 [In Russian].

- Petrov, B. V., Makrygina, V. A., 1975. Geochemistry of Regional Metamorphism and Ultrametamorphism. Novosibirsk, Nauka [In Russian].
- Pshenichkin, A. Ya., Korobeynikov, A. F., Komoyedov, A. F., 1976. Dependence of the Pyrite Thermo-EMF Value on the Electrode Heating Temperature, *Izvestiya Tomskogo Polytechnicheskogo Instituta*. Tomsk, TPI. 264, 74–76 [In Russian].
- Pshenichkin, A. Ya., Korobeynikov, A. F., Matsyush-evsky, A. V., 1976. Peculiarities of Crystal Morphology and Thermoelectric Properties of Pyrites, *Izvestiya Tomskogo Polytechnicheskogo Instituta*. Tomsk, TPI. 264, 82–84 [In Russian].
- Pshenichkin, A. Ya., Gavrilov, R. Yu., Ponamarenko, M. A., 2015. Pyrites of the Zapadnoye Gold Deposit, Bodaibo District, *Advances in Current Natural Sciences*. 1, 981–984 [In Russian].
- Pshenichkin, A. Ya., Gavrilov, R. Yu., 2018. Pyrites from the Western Flank of the Sukholozhsky Gold Field, Lena Ore District, *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Engineering of Georesources*. 329, 5, 135–143 [In Russian].
- Pshenichkin, A. Ya., Gavrilov, R. Yu., 2019. Typomorphism of Pyrites of the Olkhov-Chibizhek Gold Field (Eastern Sayan), *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Engineering of Georesources*. 330, 3, 60–72 [In Russian].
- Rabinovich, K. R., Bulynnikov, V. A., Akchurina, V. M., 1981. Guidelines for Using the Pyrite Thermoelectric Properties for Gold Mineralization Forecasting. Novosibirsk, SNIIGGIMS [In Russian].
- Revyakin, P. S., Revyakina, E. A., 1978. Electrical Properties of Pyrites and Their Search Value, *Prospect and Protection of Mineral Resources*. 7, 45–50 [In Russian].
- Romanov, V. G., 2008. Electrical Properties of Ore Minerals and Their Use for Solving Mineragenic and Geological Problems, *Chita State University Journal*. 6 (51), 147–154 [In Russian].
- Romanov, V. G., 2011. Zonality and Predictive Assessment of Endogenous Deposits Based on the Temperature Parameters of Thermo-EMF and Electrical Conductivity of Sulfides, Avtoref. Diss. ... Doktora Geol.-Mineral. Nauk. Ulan-Ude [In Russian].
- Romanov, V. G., 2017. Statistical Substantiation of the Dependence “Conditions of Formation – Composition – Electrical Properties” for Sulfide Minerals, *Transbaikalian State University Journal*. 23, 4, 23–32 [In Russian].
- Rozova, E. V., 1970. On the Methodology of Measuring the Coefficient of Thermoelectromotive Force in Ore Minerals, *Trudy TsNIGRI*. 93, 45–57 [In Russian].
- Rundkvist, I. K., Bobrov, V. A., Smirnova, T. N., Smirnov, M. Yu., Danilova, M. Yu., Ashcheulov, A. A., 1992. Stages of the Bodaibo Ore District Formation, *Geology of Ore Deposits*. 34, 3–15 [In Russian].
- Savitsky, K. V., Gorenkov, N. L., Sidorova, M. V., 1980. Measuring the Coefficient of the Thermoelectromotive Force and Specific Conductivity for Ore Minerals, *Theory and Practice of Concentrating Non-Ferrous and Precious Metal Ores. Trudy TsNIGRI*. Moscow. 151, 53–58 [In Russian].
- Seyfullin, R. S., 1978. Opportunities and Prospects Perspectives for the Developing ment of the Thermoelectric Method for Studying Ore Minerals, *Zapiski VMO*. 5, 519–528 [In Russian].
- Shcheka, S. A., Kalmykova, T. F., 1966. On the Assessment of Pyrrhotites Formation Relative Temperatures Using the Thermo-EMF Method, *Geochemistry and Mineralogy of Magmatic Formations*. Vladivostok, FEGI DF SB AN USSR. 101–106 [In Russian].
- Stetsenko, N. S., Kudelya, V. K., 1974. Microscope Study of Ore Mineral Thermoelectric Properties, *Mineralogicheskyy Sbornik*. Lvov, Lvov State University. 1, 28, 31–39 [In Russian].
- Tarasova, Yu. I., Budyak, A. E., Chugaev, A. V., Goryachev, N. A., Tauson, V. L., Skuzovatov, S. Yu., Reutsky, V. N., Abramova, V. D., Gareev, B. I., Bryukhanova, N. N., Parshin, A. V., 2020. Mineralogical and Isotope-Geochemical ($\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{34}\text{S}$ and Pb-Pb) Characteristics of the Krasniy Gold Mine (Baikal-Patom Highlands): Constraining Ore-Forming Mechanisms and the Model for Sukhoi Log-type Deposits, *Ore Geology Reviews*. 119, 103365, 1–24.
- Tarasova, Yu. I., Budyak, A. E., Ivanov, A. V., Goryachev, N. A., Ignatyev, A. V., Velivetskaya, T. A., Radomskaya, T. A., Blinov, A. V., Babyak, V. N., 2021. Typomorphism, Typochemistry, and Isotope-Geochemical Characteristics of Iron Sulfides from the Golets Vysochaishy Deposit, Eastern Siberia, *Zapiski RMO*. 1, 63–75 [In Russian].
- Tarasova, Yu. I., Budyak, A. E., Goryachev, N. A., Ignatiev, A. V., Velivetskaya, T. A., Blinov, A. V., Goryacheva, Ye. M., 2022. Sulfide Typomorphism at the Ugakhan Gold Deposit, Baikal-Patom Highlands, *Doklady Earth Sciences*. 503, 1, 12–17 [In Russian].
- Teut, A. O., Kulenova, N. A., 2013. Role of Thermoelectricity in the Processes of Polysulfide Ore Self-Organization, *Journal of Thermoelectricity*. 1, 5–18 [In Russian].
- Vagina, E. A., Rudmin, M. A., 2010. Crystal Morphology and Thermoelectric Properties of Pyrite and Arsenopyrite in the Chertovo Koryto Gold Deposit, Patom Highlands, *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*. 317, 1, 66–73 [In Russian].
- Vursiy, G. L., Zibrov, I. A., Lobov, S. G., Yakubchuk, A. S., 2020. The Sukhoi Log Gold Deposit, Russia, *SEG Special Publications*. Chapter 25. 23, 523–543.
- Wood, B. L., Popov, N. P., 2006. Sukhoi Log Giant Gold Deposit, *Russian Geology and Geophysics*. 47, 3, 315–341 [In Russian].
- Yudovskaya, M. A., Distler, V. V., Prokofiev, V. Yu., and Akinfiev, N. N., 2016. Gold Mineralisation and Orogenic Metamorphism in the Lena Province of Siberia as Assessed from Chertovo Koryto and Sukhoi Log Deposits, *Geoscience Frontiers*. 7, 453–481.