

ЗОЛОТОНОСНЫЙ ПИРИТ В РИФЕЙСКИХ ОТЛОЖЕНИЯХ БАШКИРСКОГО МЕГАНТИКЛИНОРИЯ (НА ПРИМЕРЕ РУДОПРОЯВЛЕНИЯ БОГРЯШКА)

© **А.А. Шарипова,**

младший научный сотрудник,
Институт геологии,
Уфимский научный центр РАН,
ул. Карла Маркса, 16/2,
450077, г. Уфа, Российская Федерация,
эл. почта: ajsylu_azatovna@mail.ru

© **С.В. Мичурин,**

кандидат геолого-минералогических наук,
старший научный сотрудник,
Институт геологии,
Уфимский научный центр РАН,
ул. Карла Маркса, 16/2,
450077, г. Уфа, Российская Федерация,
эл. почта: s_michurin@mail.ru

© **Т.А. Веливецкая,**

кандидат геолого-минералогических наук,
заведующая лабораторией,
Дальневосточный геологический институт,
Дальневосточное отделение РАН,
проспект 100 лет Владивостоку, 159,
690022, г. Владивосток,
Российская Федерация,
эл. почта: velivetskaya@fegi.ru

© **А.В. Игнатьев,**

кандидат геолого-минералогических наук,
ведущий научный сотрудник,
Дальневосточный геологический институт,
Дальневосточное отделение РАН,
проспект 100 лет Владивостоку, 159,
690022, г. Владивосток,
Российская Федерация,
эл. почта: ignatiev@fegi.ru

В статье на примере рудопроявления золота Богряшка рассматриваются отличительные геохимические характеристики золотоносных сульфидов в рифейских отложениях Башкирского мегантиклинория. На рудопоявлении выделяются несколько генераций пирита, различающихся изотопным составом серы, геохимическими особенностями и типом термоэлектрической проводимости. Результаты проведенных исследований показывают, что формирование сульфидной минерализации на рудопоявлении происходило в несколько стадий с участием серы из разных источников. На первой стадии образовался раннедиагенетический пирит с источником серы из сульфат-иона морской воды. Значения $\delta^{34}\text{S}$ первой генерации пирита образуют интервал от $-21,8$ до $-2,1\%$. Формирование второй генерации пирита сопровождалось образованием метасоматических железистых магнетитов (брейнеритов). Источником серы второй генерации выступали эпигенетические эвапоритовые рассолы. Вторая генерация пирита имеет наибольшее распространение на рудопоявлении и характеризуется значительным обогащением тяжелого ^{34}S изотопа – значения образуют интервал от $6,6$ до $51,5\%$. Золотоносные сульфиды образовались в заключительную стадию. Формирование рудопоявления золота было обусловлено гидротермальной деятельностью, в результате которой происходил привнос серы и рудного вещества из глубинного источника, при этом образующиеся сульфиды накладывались на пириты, присутствовавшие в осадочных породах. Золотоносные сульфиды характеризуются изотопным составом серы от нуля до $4,6\%$ и незначительным отклонением от величины $\delta^{34}\text{S}$ метеоритного стандарта. В химическом составе последней генерации пирита отмечается избыток серы по сравнению со стехиометрическим составом пирита и значительная примесь мышьяка, которая в свою очередь обуславливает дырочную проводимость золотоносного типа пирита.

Ключевые слова: Башкирский мегантиклинорий, рудопоявления золота, минералообразующие растворы, пирит, метасоматит, магнетит, изотопия серы

© **A.A. Sharipova¹, S.V. Michurin¹, T.A. Velivetskaya², A.V. Ignatyev²**

GOLD-BEARING PYRITE IN RIPHEAN DEPOSITS OF THE BASHKIR MEGANTICLINORIUM (WITH THE BOGRYASHKA ORE OCCURRENCE TAKEN AS AN EXAMPLE)

¹Institute of Geology,
Ufa Scientific Centre,
Russian Academy of Sciences,
16/2, ulitsa Karla Marksa,
450077, Ufa, Russian Federation,
e-mail: ajsylu_azatovna@mail.ru

The paper considers distinguishing geochemical features in the Riphean gold-bearing sulphides of the Bashkir Meganticlinorium, with the Bogryashka ore occurrence taken as an example. The occurrence displays several pyrite generations that differ in their sulphur isotopic composition, geochemical characteristics and the type of the thermoelectrical conductivity. The research findings show that the formation of sulphide mineralization in the Bogryashka ore occurrence

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, грант № 16–35–00144

²Far East Geological Institute,
Far Eastern Branch,
Russian Academy of Sciences,
159, prospekt 100 let Vladivostoku,
690022, Vladivostok, Russian Federation,
e-mail: velivetskaya@fegi.ru

took place at several stages involving sulphur from different sources. At the first stage early diagenetic pyrite was formed with the sulphur source from seawater sulphate ion.

The $\delta^{34}\text{S}$ values of the first-generation pyrite fall within the range between -21.8 and -2.1% . The formation of the second-generation pyrite was accompanied by the formation of ferroan metasomatic magnesites (breunnerites). It was epigenetic evaporite brines that served as a source of sulphur for the second-generation pyrite. The second-generation pyrite has the prevailing distribution throughout the Bogryashka ore occurrence and is characterized by considerable enrichment in ^{34}S isotope, with the range of values between 6.6 and 51.5%. Gold-bearing sulphides were formed at the final stage. Gold mineralization was due to the hydrothermal activity resulting in the addition of sulphur and ore material from a deep source, the newly formed sulphides being superimposed on the pyrites found in sedimentary rocks. Gold-bearing sulphides are characterized by the sulphur isotopic composition between zero and 4.6‰ and somewhat slight deviation from the meteoric standard $\delta^{34}\text{S}$ values. The chemical composition of the final-generation pyrite includes a considerable amount of arsenic admixture, which, in turn, is responsible for the p-type conductivity of the gold-bearing pyrite.

Key words: Bashkir Meganticlinorium, gold ore occurrence, mineral-forming solutions, pyrite, metasomatic, magnesite, sulphur isotope

Введение. Вопросы источников рудного вещества и происхождения рудопроявлений и месторождений золота в рифейских отложениях Башкирского мегантиклинория (БМА) в настоящее время относятся к дискуссионным. Ряд исследователей предполагает экстракцию золота в процессе катагенеза-метакатагенеза вмещающих осадочных пород и последующего формирования рудопроявлений в результате дислокационного приразломного метаморфизма в связи с рифей-вендской тектоно-магматической активизацией [1; 2]. Некоторые специалисты при этом полагают, что в условиях тектоно-магматической активизации золото было заимствовано не только из осадочных и интрузивных пород, но и частично имело мантийное происхождение [3]. Другие считают, что формирование рудопроявлений обусловлено привнесением Au «Металлоносными флюидами» мантийного генезиса. На это указывают особенности геологического строения и наличие платиноидов в составе золота [3], а также изотопные характеристики рудных минералов [4; 5].

Понимание рудообразующих процессов представляет не только академический интерес, но и прямо связано с выбором стратегии поисково-разведочных работ. При выяснении природы рудообразующих флю-

идов важным является изучение изотопных и геохимических особенностей рудной минерализации. В задачи настоящего исследования входило установить в рифейских отложениях БМА отличительные геохимические характеристики золотоносных сульфидов с целью выявления их генезиса. Объектом исследования было выбрано рудопроявление Богряшка, которое от других рудопроявлений золота в регионе отличается тем, что только здесь встречаются несколько совершенно разных по изотопно-геохимическим характеристикам генераций сульфидов [6]. Кроме того, уникальность рудопроявления заключается в том, что вмещающие его метасоматиты по сути являются железистыми магнетитами. Это единственный пример на Урале, когда золотоносная минерализация встречается в магнетитах, которые сами по себе могут представлять рудную залежь.

Геологическое положение. Рудопроявление Богряшка располагается в долине одноименной реки в 10 км севернее поселка Верхний Авзян. Оно представляет собой зону метасоматически преобразованных доломитов миньякской подсвиты суранской свиты нижнего рифея с золотосодержащей рассеянной вкрапленной и гнездово-прожилковой сульфидной минерализацией. Рудопроявление относится к золото-

сульфидному типу. Зона метасоматитов вскрыта скважинами в 1975–1982 гг. вблизи старого карьера по отработке золотоносной россыпи (рис. 1).

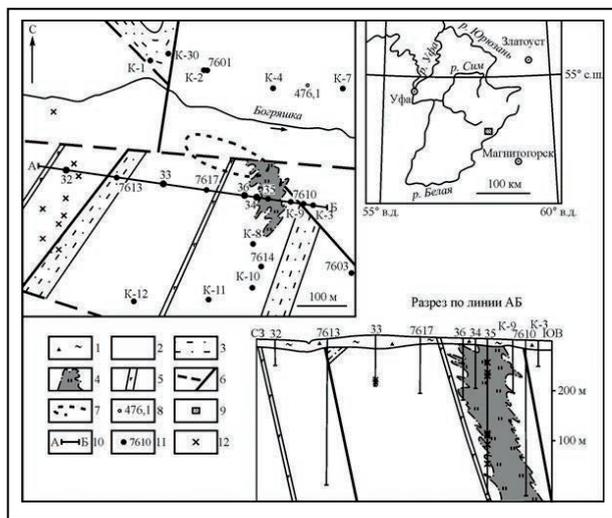


Рис. 1. Геологическая схема и разрез рудопроявления Богряшка (по материалам Абзелиловской ГПП) и положение точек отбора проб на геохимическое изучение:

1 – кора выветривания; 2–3 – отложения миньякской подсвиты суранской свиты: 2 – доломиты, 3 – переслаивание песчаников, алевролитов и низкоуглеродистых глинистых сланцев; 4 – зона карбонатных метасоматитов; 5 – дайки габбро-диабазов; 6 – тектонические нарушения; 7 – карьер по отработке россыпного золота; 8 – топографические высоты; 9 – контур участка; 10 – линия разреза; 11 – скважины и их номера; 12 – точки отбора проб на геохимическое изучение

В структурном отношении рудопроявление располагается в ядре меридионально вытянутой Большеавзянской антиклинали, западное крыло которой срезано Караташским надвигом, а восточное осложнено Большеавзянским разломом. По долине р. Богряшка проходит разлом субширотного направления. Помимо этого, здесь развиты диагональные нарушения, создающие мелкоблоковое строение участка. Золоторудная минерализация приурочена к зоне метасоматитов, которая развита вдоль разрывного нарушения северо-западного простирания.

Штокообразные тела метасоматитов встречаются на пересечении разрывных нарушений, при этом метасоматиты, представленные железистыми магнезитами, на-

ходятся в окружении доломитов [7].

Магматические образования представлены серией даек долеритов лапыштинского комплекса, которые относятся к среднерифейским образованиям [8]. Согласно материалам Абзелиловской геолого-поисковой партии (ГПП), немногочисленные дайки габбро-диабазов в пределах площади рудопроявления имеют дорудный возраст.

Золото в карбонатных метасоматитах распределено неравномерно. По материалам Абзелиловской ГПП в сульфидных концентратах (преобладающий минерал – пирит) содержание золота достигает 150 и более г/т, при этом в породах оно в среднем составляет от 0,2 до 1,0 г/т (скв. № 35, 7610). По нашим данным, полученным в результате атомно-абсорбционного анализа, в карбонатных метасоматитах скважин № 35 содержание золота сильно варьирует от <0,1 до 2,6 г/т (табл. 1).

Наиболее значительные содержания золота по материалам Абзелиловской ГПП установлены в керне скважины № 34 в интервале 25–30 м в карбонатных метасоматитах вблизи контакта с вмещающими доломитами. В полуметровом интервале максимальное содержание золота составило 3,4 г/т, серебра 30,5 г/т, меди 6,86%. Сульфидная минерализация здесь представлена гнездово-прожилковыми выделениями халькопирита, мельниковита и блеклых руд.

Методика исследований. Изотопно-геохимические исследования проведены по образцам, отобранных нами при полевых наблюдениях в пределах площади рудопроявления в 2010 г., а также из керна поисковых скважин № 33 и 35, которые были пробурены в 1975 г. (коллекция А.А. Алексеева). Схема отбора проб приведена на рисунке 1. Исследования включали определение Au и Ag в метасоматитах атомно-абсорбционным анализом; определение химического состава пород рентгенофлуоресцентным и силикатным анализами; определение минерального состава метасоматитов термогравиметрическим и рентгеноструктурным анализами; определения изотопного состава серы сульфидов, а также изучение изотопного состава углерода и кислорода в доломитах

Таблица 1 – Минеральный состав, содержание пирита, золота и серебра в рудных (скв. № 35) и безрудных (скв. № 33) карбонатных метасоматитах рудопроявления Богряшка

№ обр.	Глубина, м	Минеральный состав	Содержание пирита, мас. %	Au, г/т	Ag, г/т
Скважина № 35					
A-12341	68,0	Mg (74)	5	< 0,1	< 0,1
A-12342	47,0	Mg (60), D1 (23)	3	< 0,1	< 0,1
A-12344	74,0	Mg (66), D1 (16)	1	0,11	0,36
A-12345	84,5	Mg (53), D1 (31)	2	0,17	0,40
A-12346a	189,5	Mg (38)	39	2,6	1,57
A-12348	211,6-211,8	D1 (65)	–	0,48	1,40
A-12349	211	Mg (64), D1 (33)	0,5	0,16	< 0,1
A-12350	193,5	Mg (75)	1	< 0,1	0,27
A-12352	250,0	Mg (85)	0,3	< 0,1	< 0,1
Скважина № 33					
A-13478	88,5	D1 (90)	0,5	< 0,1	0,13
A-13479	94,0	Mg (94)	0,5	< 0,1	0,08

Примечание – Минеральный состав карбонатных метасоматитов приводится по данным термогравиметрического анализа. В скобках указано процентное содержание минерала: Mg – магнезит, D1 – доломит. Содержание пирита рассчитано по результатам определения Sobщ рентгенофлуоресцентным анализом. Прочерк – нет данных. Содержание золота и серебра приводится по данным атомно-абсорбционного анализа.

вмещающих пород; энергодисперсионный микроанализ состава сульфидов и изучение термоэлектрических особенностей пирита. Детально методика исследований описана нами ранее [4; 5]. Кроме того, в настоящей работе в нескольких образцах пирита изотопный состав серы определен точно с шагом около 100–500 мкм на масс-спектрометре MAT253 (Thermo Fisher Scientific, Германия) с использованием фемтосекундного лазера Integra-C (Quantronix Lasers, США) в ДВГИ ДВО РАН (г. Владивосток) по методике, описанной в работе [9].

Результаты исследований. Вмещающие породы. По химическому составу вмещающие доломиты рудопроявления отличаются от разновозрастных доломитов миньякской подсвиты суранской свиты более высоким содержанием титана, железа и калия. Содержание минерала доломита в этих по-

родах варьирует от 85 до 99%, которое определено по потере веса при термическом анализе. После прокаливания эти породы приобретают темный цвет, что характерно для железистых доломитов.

По изотопному составу углерода ($\delta^{13}\text{C}$) образует интервал от $-0,3$ до $0,3$ ‰ (PDB), $n=5$) вмещающие доломиты соответствуют обычным морским осадочным карбонатным породам. При этом их изотопный состав кислорода ($\delta^{18}\text{O}=19,4...22,4$ ‰ (SMOW), $n=5$) легче, чем в осадочных карбонатах, в которых $\delta^{18}\text{O}$ составляет около 30‰ относительно SMOW. Это объясняется влиянием эпигенетических процессов. В эпигенезе изотопный состав кислорода относительно легко изменяется, в то время как изотопный состав углерода более устойчив [10].

Метасоматиты. В рудных метасоматитах по сравнению с вмещающими доломитами

резко увеличивается содержание железа и магния. По химическому составу часть рудных метасоматитов соответствуют брейнериту, разновидности железистого магнезита. В образцах метасоматитов содержание FeO составляет 6,91–12,24 мас. % при высоком содержании MgO (33,45–37,1 мас. %) и незначительном CaO (0,28–2,0 мас. %), что типично для брейнерита. Проведенный нами рентгеноструктурный анализ подтверждает, что железистые магнезиты в метасоматитах являются брейнеритами, которые определяются по рефлексам 3,548; 2,748; 2,508; 2,323; 2,108; 1,941; 1,704; 1,512; 1,490; 1,410; 1,357; 1,339; 1,255 Å.

Вместе с тем, часть метасоматитов по химическому составу близка к магнезитам Исмакаевского месторождения, которое располагается в той же структурно-формационной зоне в ~10 км севернее рудопроявления. Магнезиты обогащены кремнеземом, при низком глиноземе и сравнительно высоком содержании железа.

Сульфидная минерализация. По результатам электронно-зондового микроанализа среди сульфидов нами установлены пирит, арсенопирит и халькопирит. Арсенопирит встречается в тесном сростании с пиритом (рис. 2 а, б). Халькопирит образует микровключения в пирите и выделения в матрице породы размером до 0,1–0,2 мм (рис. 2 д).

Пирит рудопроявления Богряшка, по сравнению с пиритами из других рудопроявлений золота, залегающих в рифейских отложениях БМА, образует несколько необычные формы. Здесь он встречается как в виде мелкокристаллических сфероидальных агрегатов зонального строения (рис. 2 в, г), так и в виде сплошных мелкокристаллических катаклазированных масс (рис. 2 е).

Пирит широко распространенной кубической формы в образцах из керна скважины № 35 не был встречен. Это указывает на низкотемпературные условия отложения сфероидальных агрегатов пирита на рудопроявлении, поскольку более высокотемпературные минералы всегда совершенны [11]. Согласно исследованиям [11], радиальные или расходящиеся структуры пирита являются крайними случаями мозаичной

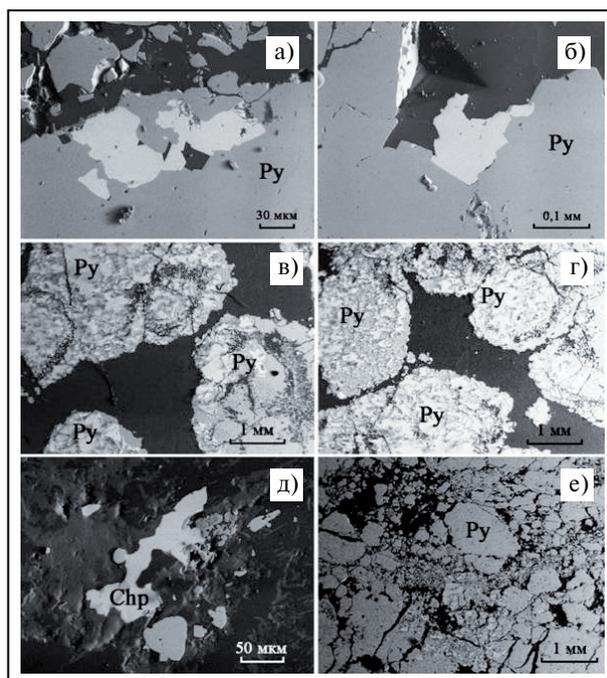


Рис. 2. Формы выделения сульфидов рудопроявления Богряшка (скв. № 35): Asp – арсенопирит; Py – пирит; Chp – халькопирит. а, б – сростание арсенопирита и пирита (обр. А-12345, гл. 84,5 м); в, г – мелкокристаллические сфероидальные агрегаты пирита зонального строения (обр. А-12346, гл. 197,5 м); д – выделения халькопирита в породе (обр. А-12354, гл. 306,0 м); е – мелкокристаллический катаклазированный пирит (обр. А-12351, гл. 226,2 м)

структуры, которая служит характерным признаком пирита на низкотемпературных месторождениях

Анализ результатов термо-ЭДС показывает, что пирит в пределах рудопроявления характеризуется разным типом проводимости [5]. Фиксируются образцы как с положительными значениями термо-ЭДС от +50 до +540 мкВ/°С (дырочный тип проводимости, р-тип), так и с отрицательными от –310 до –50 мкВ/°С (электронный тип проводимости, n-тип). Вместе с тем отмечается пирит (обр. А-12351) со смешанной проводимостью при преобладании дырочного типа (табл. 2).

Термоэлектрическая проводимость пирита возможна при двух основных причинах: 1) нарушении стехиометрического отношения атомного количества железа к сере (при смещении равновесия в сторону S₂²⁻ вакансий увеличивается эффект проводимости n-типа, а в сторону Fe²⁺ вакансий –

Таблица 2 – Термоэлектрические характеристики и изотопный состав серы пирита (скв. № 35)

№ обр.	$\delta^{34}\text{S}$, ‰	<i>n</i>	<i>n</i> -тип		<i>p</i> -тип	
			<i>a/ a_{cp}</i> , мКВ/°С	%	<i>a/ a_{cp}</i> , мКВ/°С	%
А-12345	0,1*	61	–	0	(+90...+540)/+370	100
А-12346а	12,4*	52	(-50...-190)/-110	98	+80	2
А-12346	–	117	(-50...-310)/-160	97	(+60...+90)/+80	3
А-12347	-0,1	314	(-50...-90)/-70	3	(+50...+430)/+150	97
А-12351	7,9	104	(-55...-245)/-100	29	(+50...+390)/+180	71
А-12354	–	14	(-150...-190)/-170	100	–	–

Примечание – Звездочкой отмечены данные по материалам Г.Н. Засухина [14]; прочерк – нет определений; *n* – количество анализов

проводимости *p*-типа); 2) за счет присутствия элементов-примесей, которые замещают основные компоненты в его кристаллической решетке [12]. При этом мышьяк является самым важным элементом, обуславливающим *p*-тип проводимости пирита [13].

В образцах рудопроявления термоэлектрические характеристики пирита обусловлены двумя этими причинами. По результатам электронно-зондового микроанализа пирит по химическому составу разделяется на две группы. В образцах с дырочным типом проводимости по сравнению со стехиометрическим составом устанавливается довольно значительный избыток серы ($S_{cp}=55,57$ мас. %, $n=17$ (см. табл. 2, обр. А-12345 и А-12347)). Пириты электронного ($S_{cp}=53,28$ мас. %, $n=51$, обр. А-12346, А-12346а, А-12354) и смешанного ($S_{cp}=53,10$ мас. %, $n=8$, обр. А-12351) типа проводимости обнаруживают ее незначительный дефицит и практически очень близки к стехиометрическому составу.

Кроме того, различия отмечаются и по составу элементов-примесей. В образцах пирита *p*-типа появляется довольно заметная примесь мышьяка до 1,57 мас. %. Как показывает проведенный анализ, в пирите с дырочной проводимостью (*p*-тип) величина термо-ЭДС связана с присутствием в нем мышьяка. В противоположность этому кобальт до 0,71 мас. % отмечается в пирите смешанного и электронного типов про-

водимости. В пирите с проводимостью *n*-типа примесь мышьяка не установлена. Из этого следует, что термоэлектрические характеристики пирита *p*-типа обусловлены примесью в нем As.

Результаты по изотопному составу серы, также как и данные по термо-ЭДС, фиксируют две различных генерации пиритовой минерализации на рудопроявлении. По результатам изотопного анализа отмечается двумодальное распределение значений $\delta^{34}\text{S}$ (рис. 3 а) [5; 6]. Одна часть изотопных данных группируется в интервале от -6,6 до 2,7‰ ($\delta^{34}\text{S}_{cp}=-0,5$ ‰; $n=13$), а другая – от 7,9 до 27,4‰ ($\delta^{34}\text{S}_{cp}=16,1$ ‰; $n=25$). Изотопные данные первой группы близки к метеоритному стандарту, что указывает на магматогенный источник серы при образовании этой генерации пирита. Другая генерация значительно обогащена ^{34}S изотопом серы и весьма схожа по изотопному составу с рассеянной пиритовой минерализацией в осадочных породах суранской свиты нижнего рифея, встречающейся за пределами золоторудных зон и участков (рис. 3 б). Отсутствие непрерывного ряда изотопных значений $\delta^{34}\text{S}$ в пиритах рудопроявления, двумодальное распределение и четкая обособленность мод на гистограмме указывают, что этапы образования пиритовой минерализации не были связаны между собой и, по-видимому, были разорваны во времени.

С целью проверки и уточнения этого вы-

вода нами в нескольких образцах рудоносных метасоматитов с пиритовой минерализацией выполнены определения изотопного

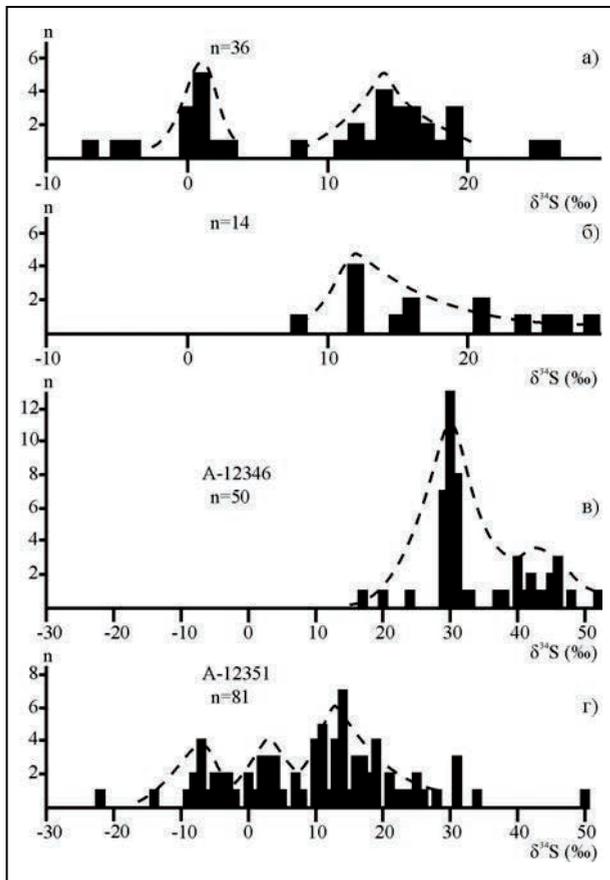


Рис. 3. Гистограммы значений $\delta^{34}\text{S}$ пирита рудопроявления Богряшка (а), пирита из осадочных отложений суранской свиты нижнего рифея (по [6]) (б) и микролазерных определений $\delta^{34}\text{S}$ по срезу пирита в метасоматитах (в, г)

состава серы точно с шагом между точками определения около 100–500 мкм. Результаты прецизионного изучения подтвердили ранее полученные данные (рис. 3 в, г). Однако, к установленным ранее генерациям с модами около нулевых значений и больших положительных значений $\delta^{34}\text{S}$, проявилась генерация пирита, характеризующаяся обогащением легкого ^{32}S изотопа серы (рис. 3 г). Эти данные указывают на присутствие трех генераций пирита в рудоносных метасоматитах рудопроявления Богряшка, наиболее ранняя из которых имеет обычное биогенно-осадочное происхождение.

Модель формирования рудопроявления. Приведенные материалы позволяют пред-

ставить следующую модель формирования рудопроявления. Сначала на стадии раннего диагенеза протодоломитового осадка образовался раннедиагенетический пирит при участии бактерий и источником серы из морского растворенного сульфат-иона. Значения $\delta^{34}\text{S}$ первой генерации пирита образуют интервал от $-21,8$ до $-2,1\text{‰}$.

Затем сформировалась вторая генерация пирита, которая характеризуется значительным обогащением тяжелого ^{34}S изотопа – значения $\delta^{34}\text{S}$ образуют интервал от $6,6$ до $51,5\text{‰}$. Источником серы при формировании этой генерации пирита выступали сульфаты эвапоритов, на быстрое присутствие которых в нижнерифейских отложениях БМА указывают литологические и изотопно-геохимические признаки [4].

Судя по явному преобладанию положительных значений $\delta^{34}\text{S}$, вторая генерация имеет наибольшее распространение на рудопроявлении. Ее формирование, скорее всего, сопровождалось образованием здесь метасоматических магнезитов из эпигенетических эвапоритовых рассолов. Сценарий ее создания, видимо, тот же, что и для пиритов в магнезитах типового Саткинского месторождения на Южном Урале [15].

Как отмечено выше, железистые магнезиты рудопроявления Богряшка по химическому составу близки к магнезитам Исмакаевского месторождения. Вмещающими породами на этих объектах являются одни и те же доломиты миньякской подсвиты суранской свиты. Исходя из этого, можно предположить одновременное образование магнезитов рудопроявления Богряшка с магнезитами Исмакаевского месторождения, для которых определен возраст в 1250 ± 130 млн лет (Sm-Nd метод) [16]. Источником флюида при образовании магнезитов Исмакаевского месторождения являлись захороненные эвапоритовые рассолы [16].

В заключительную стадию сформировалась третья генерация пирита, которая характеризуется изотопным составом серы от нуля до $4,6\text{‰}$ и незначительным отклонением от $\delta^{34}\text{S}$ метеоритного стандарта. Это указывает на то, что при образовании этой

генерации происходил привнос серы из глубинного источника. Ее формирование происходило в результате тектоно-магматических процессов и гидротермальной деятельности, вероятно, синхронно с образованием золоторудной минерализации на других рудопроявлениях, залегающих в рифейских отложениях БМА в позднерифей-вендское время. Образующиеся сульфиды накладывались на пириты, присутствовавшие в осадочных породах. Именно эта третья генерация пирита является золотоносной, что подтверждается распределением золота в сульфидных концентратах рудопроявления. Определения содержаний золота выполнены химическим анализом (использованы материалы А.Г. Потехина). В интервалах скважины № 35 с максимальным содержанием золота (66–163 г/т) значения $\delta^{34}\text{S}$ пирита (0,9; 0,1‰) близки к метеоритному стандарту (рис. 4).

В интервалах, где фиксируются высокие положительные значения $\delta^{34}\text{S}$ (10,9–12,8‰), содержания золота в сульфидных концентратах уменьшаются до 14–55,5 г/т. Важно

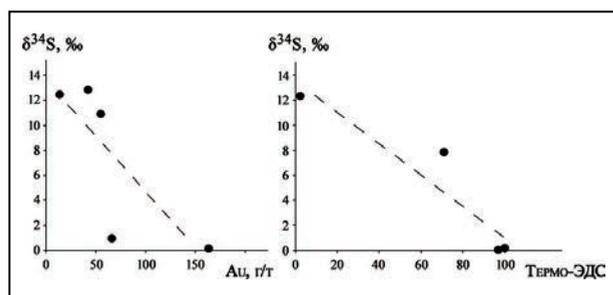


Рис. 4. Связь изотопного состава серы пирита с содержанием золота в сульфидных концентратах и термо-ЭДС (в относительной доле n-типа)

отметить, что такая же обратная зависимость изотопного состава серы установлена и для пирита с разным типом проводимости. Анализ зависимости между термоэлектрическими характеристиками пирита и его изотопным составом серы показывает, что

в пирите с дырочным типом проводимости значения $\delta^{34}\text{S}$ близки к метеоритному стандарту, а пирит n-типа значительно обогащен ^{34}S изотопом (рис. 4). Дырочный тип проводимости на рудопроявлении фиксируется в мышьяковистом пирите и исходя из полученных данных именно этот тип пирита в большей степени золотоносен.

Заключение. Таким образом, результаты проведенных исследований показывают, что формирование сульфидной минерализации на рудопроявлении Богряшка происходило в несколько стадий с участием серы из разных источников, один из которых имел «мантийную» природу, а другие – коровую. На стадии раннего диагенеза протодоломитового осадка образовался раннедиагенетический пирит с источником серы из морского растворенного сульфат-иона. Затем сформировалась генерация пирита, источником серы которой выступали сульфаты эвапоритов, присутствовавшие в осадочных толщах БМА. Формирование второй генерации пирита сопутствовало образованию метасоматических магнетитов из эпигенетических эвапоритовых рассолов.

Золотоносные сульфиды образовались в заключительную стадию. Они характеризуются близкими к метеоритному стандарту значениями $\delta^{34}\text{S}$ и представляют собой самостоятельную генерацию, образованную с участием серы из магматогенного источника. В их химическом составе, как правило, отмечается избыток серы по сравнению со стехиометрическим составом пирита и значительная примесь мышьяка, которая в свою очередь обуславливает дырочную проводимость золотоносного типа пирита. Рудообразование было обусловлено гидротермальной деятельностью, в результате которой происходил привнос серы и рудного вещества из глубинного источника, при этом образующиеся сульфиды накладывались на пириты, присутствовавшие в осадочных породах*.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бердников П.Г. Перспективы золотого оруденения Муртыктинского и Авзянского типов (Южный Урал) // Геология, минералогия и геохимия месторождений золота Урала. Свердловск: УрО РАН, 1987. С. 96–101.

2. Рыкус М.В., Сначев В.И. О вероятной модели золотообразования в рифейских толщах западного склона Южного Урала // Ежегодник-1997: Информационные материалы. Уфа, 1999. С. 137–139.

3. Ковалев С.Г. Геохимия золота западного склона Южного Урала как показатель его генезиса // Самородное золото: типоморфизм минеральных ассоциаций, условия образования месторождений, задачи прикладных исследований: Матер. Всерос. конф., посвященной 100-летию Н.В. Петровской. М.: ИГЕМ РАН, 2010. Т. I. С. 252–254.

4. Мичурин С.В., Ковалев С.Г., Горожанин В.М. Генезис сульфатов и сульфидов в нижнерифейских отложениях Камско-Бельского авлакогена и Башкирского мегантиклинория. Уфа: ДизайнПолиграфСервис, 2009. 192 с.

5. Шарипова А.А., Мичурин С.В. Изотопно-геохимические и термоэлектрические характеристики сульфидов из рудопоявления Багряшка // Геология. Изв. Отд-ния наук о Земле и природных ресурсах АН РБ. 2012. № 18. С. 81–87.

6. Маскова А.А., Мичурин С.В. Изотопный состав серы сульфидов золоторудных проявлений в докембрийских отложениях Башкирского антиклинория // Новые горизонты в изучении процессов магмо- и рудообразования: Матер. Всерос. конф. М.: ИГЕМ РАН, 2010. С. 362–363.

7. Нечаев В.П. Особенности гидротермально-метасоматического процесса на некоторых золоторудных проявлениях западного склона Южного Урала // Вопросы минералогии, геохимии и генезиса полезных ископаемых Южного Урала. Уфа: БФАН СССР, 1982. С. 52–56.

8. Алексеев А.А., Алексеева Г.В., Ковалев С.Г. Дифференцированные интрузии западного склона

Урала. Уфа: Гилем, 2003. 171 с.

9. Игнатъев А.В., Веливецкая Т.А. Новый локальный метод для определения изотопного состава серы в сульфидах с использованием изотопного масс-спектрометра с лазерной абляцией // Масс-спектрометрия. 2013. № 10 (4). С. 255–263.

10. Виноградов В.И. Экскурсы $\delta^{13}\text{C}$ неопротерозой-кембрийских карбонатов – отражение палеоклиматических обстановок? // Матер. XVIII симпозиума по геохимии стабильных изотопов им. академика А.П. Виноградова, г. Москва, 14–16 нояб. 2007. М.: ГЕОХИ РАН, 2007. С. 66–67.

11. Бородин С.А. Скрученные и мозаичные кристаллы пирита как индикатор температуры образования гидротермальных месторождений // Геохимия гидротермального рудообразования. М.: Наука, 1971. С. 91–105.

12. Пириты золоторудных месторождений (свойства, зональность, практическое применение) / А.Ф. Коробейников, В.А. Нарсеев, А.Я. Пшеничкин, П.С. Ревякин, Ч.Х. Ариффулов. М.: ЦНИГРИ, 1993. 216 с.

13. Möller P., Kersten G. Electrochemical accumulation of visible gold on pyrite and arsenopyrite surfaces // Mineral. Deposita. 1994. Vol. 29. P. 404–413.

14. Засухин Г.Н. Изотопный состав серы сульфидных проявлений в различных структурно-фациальных зонах Ю. Урала // Минералогическо-геохимические особенности рудоносных комплексов Южного Урала. Уфа: БФАН СССР, 1982. С. 22–27.

15. Крупенин М.Т., Мичурин С.В. Изотопно-геохимические характеристики сульфидов из магнетитовых месторождений Южно-Уральской провинции // Геология. Изв. Отд. наук о Земле и природных ресурсов АН РБ. 2011. № 16. С. 64–80.

16. Крупенин М.Т., Кузнецов А.Б., Константинова Г.В. Сравнительная Sr-Nd систематика карбонатных пород в типовых магнетитовых месторождениях нижнего рифея Южно-Уральской провинции // Ежегодник–2014: Тр. ИГГ УрО РАН, 2015. Вып. 162. С. 100–106.

REFERENCES

1. Berdnikov P.G. Perspektivy zolotogo orudeneniya Murtyktinskogo i Avzyanskogo tipov (Yuzhnyy Ural) [Prospects for gold mineralization of the Murtykty and Avzyan types (South Urals)]. Geologiya, mineralogiya i geokhimiya mestorozhdeniy zolota

Urala [Geology, mineralogy and geochemistry of gold deposits in the Urals]. Sverdlovsk, UrO RAN, 1987, pp. 96–101 (In Russian).

2. Rykus M.V., Snachev V.I. O veroyatnoy modeli zolotoobrazovaniya v rifeyskikh tolshchakh zapadnogo sklona Yuzhnogo Urala [On the probable

gold formation model in Riphean rocks of the western slope of the South Urals]. *Ezhegodnik 1997* [Yearbook 1997]. Information materials. Ufa, 1999, pp. 137–139 (In Russian).

3. Kovalev S.G. Geokhimiya zolota zapadnogo sklona Yuzhnogo Urala kak pokazatel ego genezisa [Geochemistry of gold on the western slope of the South Urals as an indicator of its genesis]. *Samorodnoe zoloto: tipomorfizm mineralnykh assotsiatsiy, usloviya obrazovaniya mestorozhdeniy, zadachi prikladnykh issledovaniy* [Native gold: Typomorphism of mineral assemblages, formation conditions of deposits, objectives of applied research]. Proceedings of conference devoted to the 100th birthday anniversary of N.V. Petrovskaya. Moscow, IGEM RAN, 2010, vol. 1, pp. 252–254 (In Russian).

4. Michurin S.V., Kovalev S.G., Gorozhanin V.M. Genezis sulfatov i sulfidov v nizhnerifeyskikh otlozheniyakh Kamsko-Belskogo avlakogena i Bashkirskogo megantiklinoriya [Genesis of sulfates and sulfides in the Lower Riphean deposits of the Kama-Belaya Aulacogen and the Bashkir Meganticlinorium]. Ufa, DizaynPoligrafServis, 2009, 192 p. (In Russian).

5. Sharipova A.A., Michurin S.V. Izotopno-geokhimicheskie i termoelektricheskie kharakteristiki sulfidov iz rudoproyavleniya Bagryashka [Isotope-geochemical and thermoelectric characteristics of sulphides from the Bagryashka ore occurrence]. *Geologiya. Izvestiya otdeleniya nauk o Zemle i prirodnykh resursov AN RB – Geology. Bulletin of the Department for Geosciences and Natural Resources of the Academy of Sciences of the Republic of Bashkortostan*, 2012, no. 18, pp. 81–87 (In Russian).

6. Maskova A.A., Michurin S.V. Izotopnyy sostav sery sulfidov zolotorudnykh proyavleniy v dokembriyskikh otlozheniyakh Bashkirskogo antiklinoriya [Sulphur isotopic composition of sulphides in gold ore occurrences of Precambrian deposits of the Bashkir Anticlinorium]. *Novye gorizonty v izuchenii protsessov magmo- i rudoobrazovaniya* [New horizons in studying the processes of the magmatic and ore formation]. Proceedings of the All-Russian Conference. Moscow, IGEM RAN, 2010, pp. 362–363 (In Russian).

7. Nechaev V.P. Osobennosti gidrotermalno-metasomaticheskogo protsessa na nekotorykh zolotorudnykh proyavleniyakh zapadnogo sklona Yuzhnogo Urala [Features of the hydrothermal metasomatic process at some gold occurrences on the

western slope of the South Urals]. *Voprosy mineralogii, geokhimii i genezisa poleznykh iskopaemykh Yuzhnogo Urala* [Problems of mineralogy, geochemistry and genesis of mineral deposits in the South Urals]. Ufa, BFAN SSSR, 1982, pp. 52–56 (In Russian).

8. Alekseev A.A., Alekseeva G.V., Kovalev S.G. Differentysirovannye intruzii zapadnogo sklona Urala [Differentiated intrusions on the western slope of the Urals]. Ufa, Gilem, 2003. 171 p. (In Russian).

9. Ignatyev A.V., Velivetskaya T.A. Novyy lokalnyy metod dlya opredeleniya izotopnogo sostava sery v sulfidakh s ispolzovaniem izotopnogo mass-spektrometra s lazernoy ablyaysiey [New local method for determining the isotopic composition of sulfur in the sulfides using isotope mass spectrometer with laser ablation]. *Mass-spektrometriya – Mass Spectrometry*, 2013, no. 10 (4), pp. 255–263 (In Russian).

10. Vinogradov V.I. Ekskursy $\delta^{13}\text{S}$ neoproterozoy-kembriyskikh karbonatov – otrazhenie paleoklimaticheskikh obstanovok? [Excursus of $\delta^{13}\text{S}$ Proterozoic-Cambrian carbonates: Reflection of paleoclimatic environments?]. 18th Symposium on Geochemistry of Stable Isotopes named after Academician A.P. Vinogradov (November 14–16, 2007, Moscow). Moscow, GEOKhI RAN, 2007, pp. 66–67 (In Russian).

11. Borodin S.A. Skruchennyye i mozaichnyye kristally pirita kak indikator temperatury obrazovaniya gidrotermalnykh mestorozhdeniy [Twisted and mosaic crystals of pyrite as a temperature indicator of the formation of hydrothermal deposits]. *Geokhimiya gidrotermalnogo rudoobrazovaniya* [Geochemistry of hydrothermal ore mineralization]. Moscow, Nauka, 1971, pp. 91–105 (In Russian).

12. Purity zolotorudnykh mestorozhdeniy (svoystva, zonalnost, prakticheskoe primeneniye) [Pyrites of gold deposits (properties, zoning, practical application)]. A.F. Korobeynikov, V.A. Narseev, A.Ya. Pshenichkin, P.S. Revyakin, Ch.Kh. Arifulov. Moscow, TsNIGRI, 1993, 216 p. (In Russian).

13. Möller P., Kersten G. Electrochemical accumulation of visible gold on pyrite and arsenopyrite surfaces. *Mineral. Deposita*, 1994, vol. 29, pp. 404–413.

14. Zasukhin G.N. Izotopnyy sostav sery sulfidnykh proyavleniy v razlichnykh strukturno-fatsialnykh zonakh Yuzhnogo Urala [Sulfur isotopic composition of sulphide manifestations in various structural-facies zones of the South Urals]. *Mineralogo-geokhimicheskie osobennosti rudonosnykh kompleksov Yuzhnogo*

