

НАУКИ О ЗЕМЛЕ / EARTH SCIENCES

Геология и полезные ископаемые / Geology and mineral resources

УДК 54:553.411(571.56)

EDN: BITZAH

<https://doi.org/10.31242/2618-9712-2026-31-2-195-208>



Оригинальная статья

Типохимизм пирита Хаптасыннахской золоторудной зоны (Анабарский щит, северо-восток Сибирской платформы)

Борис Борисович Герасимов

*Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН,
пр. Ленина, 39, г. Якутск, 677007, Российская Федерация
Bgerasimov@yandex.ru*

Аннотация

Рудная золотоносность Анабарского щита до настоящего времени остается слабо изученной. В связи с открытием новых россыпных месторождений в пределах Билляхской тектонофлюидной зоны Анабарского щита и обоснованием их генетической связи с выявленной эпитермальной золототеллуридной (теллуриды Au, Ag, Cu, Pb и Bi) минерализацией в близлежащих метасоматитах становится актуальным изучение минералого-геохимических особенностей рудных проявлений золота. Исследования типохимизма пирита проведены с целью установления геохимических и минералогических особенностей формирования золотосульфидного оруденения. На основании изучения минеральных включений, макроэлементного состава и элементов-микропримесей выделены две генерации пирита. Пирит-1 – не золотоносный, обнаружен в метасоматитах элювиальных отложений в непосредственной близости от Билляхского массива. Индикаторным признаком является высокое содержание Co, пониженное Ni и в целом низкая концентрация элементов-примесей. Отношение Co/Ni больше единицы и варьирует в широких пределах, что характерно для сульфидов, образовавшихся под влиянием магматогенно-гидротермальных процессов. Предполагается, что этот пирит формировался в высокотемпературных условиях. Пирит-2 – золотоносный, выявлен в метасоматитах, вскрытых поисковой канавой, на некотором удалении от Билляхского массива, характеризуется повышенным содержанием элементов-примесей. Отличительной его чертой являются повышенные концентрации Se и Te, а также в основном низкие значения (<1) отношения Co/Ni. Au определено практически во всех изученных образцах (от 0,07 до 42 г/т) и выявлено и как структурно связанный элемент (Au^{+1}), так и в виде включений (Au^0). Он образовался в низкотемпературных условиях и связан с золототеллуридным минеральным типом оруденения. Результаты исследований показали, что изученный пирит является минералом-индикатором, несущим важнейшую информацию об условиях рудообразования, и особенности его типохимизма могут быть использованы в качестве минералогических критериев при прогнозно-поисковых работах.

Ключевые слова: Анабарский щит, Хаптасыннахская рудная зона, пирит, самородное золото, минеральные включения, элементы-примеси

Финансирование. Исследование выполнено в рамках госзадания ИГАБМ СО РАН (проект № FUGG-2024-0006).

Благодарности. Автор благодарит Р.Ю. Желонкина, главного геолога АК «АЛРОСА», и А.Л. Земнухова, главного геолога АО «Алмазы Анабара», за поддержку при проведении полевых работ.

Для цитирования: Герасимов Б.Б. Типохимизм пирита Хаптасыннахской золоторудной зоны (Анабарский щит, северо-восток Сибирской платформы). *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2026;31(2):195–208. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2026-31-2-195-208> EDN: BITZAH

Pyrite typochemistry of the Khaptasynnakh gold ore zone, Anabar Shield, Northeastern Siberian Platform

Boris B. Gerasimov

*Diamond and Precious Metal Geology Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
39, Lenina Ave., Yakutsk, Russian Federation, 677007
Bgerasimov@yandex.ru*

Abstract

The gold ore potential of the Anabar Shield remains poorly understood to date. Recent discoveries of new placer deposits within the Billyakh tectonic fluid zone of the Anabar Shield, together with established genetic links to epithermal gold–telluride mineralization (tellurides of Au, Ag, Cu, Pb, and Bi) in adjacent metasomatites, have underscored the need for detailed studies of the mineralogical and geochemical signatures of gold occurrences in this region. This study examined pyrite typochemistry to constrain the geochemical and mineralogical characteristics of gold–sulfide mineralization. Based on analyses of mineral inclusions, major-element composition, and trace-element geochemistry, two pyrite generations were identified. Pyrite-1 is barren and occurs in metasomatites of eluvial deposits in the immediate vicinity of the Billyakh massif. It is characterized by high Co contents, low Ni, and generally low concentrations of other impurity elements. The Co/Ni ratio exceeds unity and shows wide variation, a feature typical of sulfides formed under magmatic–hydrothermal conditions, suggesting a high-temperature origin. Pyrite-2 is gold-bearing and occurs in metasomatites exposed by a prospecting trench at a distance from the Billyakh massif. It exhibits elevated concentrations of impurity elements, notably high Se and Te, and Co/Ni ratios below unity. Gold was detected in almost all analyzed samples (0.07 to 42 g/t) and occurs both as structurally bound Au⁺ and as native inclusions (Au⁰). Pyrite-2 formed under low-temperature conditions and is associated with gold–telluride-type mineralization. Collectively, these results demonstrate that the studied pyrite serves as an effective indicator mineral, providing critical information on ore formation conditions. Its typochemical features can therefore be used as mineralogical exploration criteria in the search for new mineralization.

Keywords: Anabar Shield, Khaptasynnakh ore zone, pyrite, native gold, mineral inclusions, trace elements

Funding. This research was conducted within the framework of a state assignment to the DPMGI SB RAS (project No. FUGG-2024-0006).

Acknowledgements. The author thanks Roman Y. Zhelonkin (Chief Geologist, JSC ALROSA) and Alexey L. Zem-nukhov (Chief Geologist, JSC Almazy Anabara) for their support during field work.

For citation: Gerasimov B.B. Pyrite typochemistry of the Khaptasynnakh gold ore zone, Anabar Shield, Northeastern Siberian Platform. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2026;31(2):195–208. (In Russ.); <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2026-31-2-195-208> EDN: BITZH

Введение

На территории Анабарского щита известен широкий ореол рассеяния россыпного золота [1–4]. В 2024 г. геологами АО «Алмазы Анабара» здесь открыты россыпные месторождения золота. Рудная золотоносность имеет также достаточно продолжительную историю изученности, однако до недавнего времени не было детальных опубликованных данных по минералогии и условиям образования рудных проявлений. Хаптасыннахская рудная зона была выделена А.П. Смеловым с соавторами [2, 3] и расположена в центральной части Билляхской зоны тектонического меланжа Анабарского щита, основа которой сформирована системой разломов. Эти разломы разграничивают

блоки в различной степени диафторированных и мигматизированных плагиогнейсов, гнейсов и кристаллических сланцев гранулитовой фации верхнеанабарской серии архейского, а также блоки, сложенные биотит-амфиболовыми гнейсами амфиболитовой фации хапчанской серии раннепротерозойского возраста [5]. В центральной части зоны интродирован Билляхский массив метаморфизованных в амфиболитовой фации порфириовидных гранодиоритов, монцонитов и гранитов (билляхский комплекс) раннепротерозойского возраста. Породы массива прорваны дайками аляскитов (рис. 1).

Рудная зона прослеживается в субмеридиональном направлении, видимой протяженностью

более 20 км, при ширине от 0,5 до 10 км и трасируется сульфидизированными породами, представленными в разной степени метасоматически измененными гнейсами и гранитогнейсами. Характер оруденения в основном вкрапленный. Основные рудные минералы – пирит, пирротин, халькопирит и теллуриды. Наиболее ранней является пирит-пирротиновая ассоциация. К этой ассоциации также отнесены спорадически встречающиеся арсенопирит, герсдорфит, молибденит и шеелит. Средняя полиметаллическая ассоциация представлена халькопиритом, галенитом и сфалеритом. Позже формируются халькозин и борнит, образуя каймы и прожилки, замещающие халькопирит. Наиболее поздняя минерализация представлена теллуридами – гесситом, теллуровисмутитом, хедлейитом и алтаитом. В ассоциации с хедлейитом в гессите обнаружен также самородный висмут. В целом результаты детального изучения минералого-геохимических особенностей оруденения метасоматитов дали основание выделить эпитермальный золототеллуридный минеральный тип оруденения на Анабарском щите [6, 7].

Таким образом, в связи с открытием новых россыпных месторождений в пределах Билляхской тектонофлюидной зоны Анабарского щита и обоснованием их генетической связи с выявленной эпитермальной золототеллуридной (теллуриды Au, Ag, Cu, Pb и Bi) минерализацией в близлежащих метасоматитах возникает необходимость в изучении минералого-геохимических особенностей рудных проявлений золота. Поскольку пирит является минералом-индикатором условий рудообразования, становится целесообразным детальное изучение его типохимизма.

Материалы и методы

Анализы химического состава пиритов проводились с использованием микроскопа JEOL JSM-6480LV, с энергодисперсионным спектрометром Energy 350 Oxford Instruments (Abington, UK) (ускоряющее напряжение 20 кВ, ток зонда 1,09 нА, время измерения 7 с). Стандартами служили золото 850 ‰ – Au и Ag; FeS₂ (пирит) – Fe и S; CuFeS₂ (халькопирит) – Cu; FeAsS (арсенопирит) – As; ZnS (сфалерит) – Zn. Пределы обнаружения элементов (в мас.%) составили: Au – 1,81; Ag – 1,11; Fe – 1,02; S – 0,71; Cu – 1,22; As – 1,07; Zn – 1,73. Анализы выполнены

в отделе физико-химических методов анализа ИГАБМ СО РАН.

Определение элементов-примесей в пирите выполнялось методом LA-ICP-MS в лаборатории анализа минерального вещества ИГЕМ РАН (Москва) (аналитик В.Д. Абрамова). Измерения проводились на квадрупольном масс-спектрометре Thermo X-Series II путем абляции сульфидов с помощью системы лазерной абляции ESI NWR213. Аблируемый материал с лазерной приставки переносился потоком гелия (600 мл/мин). На входе масс-спектрометра поток гелия, несущий испаренный материал, смешивался с потоком аргона (0,8 л/мин). Для расчета концентраций использовался метод внешней градуировки по международному стандарту в виде прессованного сульфида MASS-1 (USGS). Для расчета элементов, недостающих в MASS-1 (Ru, Rh, Pd, Re, Os), использовался другой образец сравнения UQAC Fe-S1 (Университет Квебека, Шикутими, Канада), изготовленный из прессованного порошка природных сульфидов, легированного микроэлементами. В качестве внутреннего стандарта использовали стехиометрические значения содержания железа в сульфидах. Расчет проведен в программе Iolite. Анализируемые изотопы: ³³S, ⁵⁷Fe, ⁵⁹Co, ⁶⁰Ni, ⁶³Cu, ⁶⁶Zn, ⁶⁹Ga, ⁷²Ge, ⁷⁵As, ⁷⁷Se, ⁹⁵Mo, ¹⁰¹Ru, ¹⁰³Rh, ¹⁰⁵Pd, ¹⁰⁷Ag, ¹⁰⁸Pd, ¹¹¹Cd, ¹¹⁵In, ¹¹⁸Sn, ¹²¹Sb, ¹²⁵Te, ¹⁸²W, ¹⁸⁵Re, ¹⁸⁹Os, ¹⁹³Ir, ¹⁹⁵Pt, ¹⁹⁷Au, ²⁰⁵Tl, ²⁰⁸Pb, ²⁰⁹Bi.

Содержания элементов-примесей подразделены на высокие (>1000 г/т), повышенные (100–1000 г/т), умеренные (10–100 г/т) и низкие (<10 г/т).

Результаты и обсуждение

Нами изучен пирит, выделенный из проб, отобранных с двух участков центральной части Хаптасыннахской рудной зоны. Участок 1 расположен в непосредственной близости от выходов гранитоидов Билляхского массива, участок 2 находится на некотором удалении к востоку от массива (см. рис. 1). На первом участке изучены штуфные пробы из элювиальных отложений, на втором – бороздовые пробы, отобранные с полотно поисковой канавы 114.

Пирит из штуфных проб участка 1

Изученные образцы представлены метасоматитами кварц-полевошпатового состава, развитыми по гнейсам. Текстура руд вкрапленная,

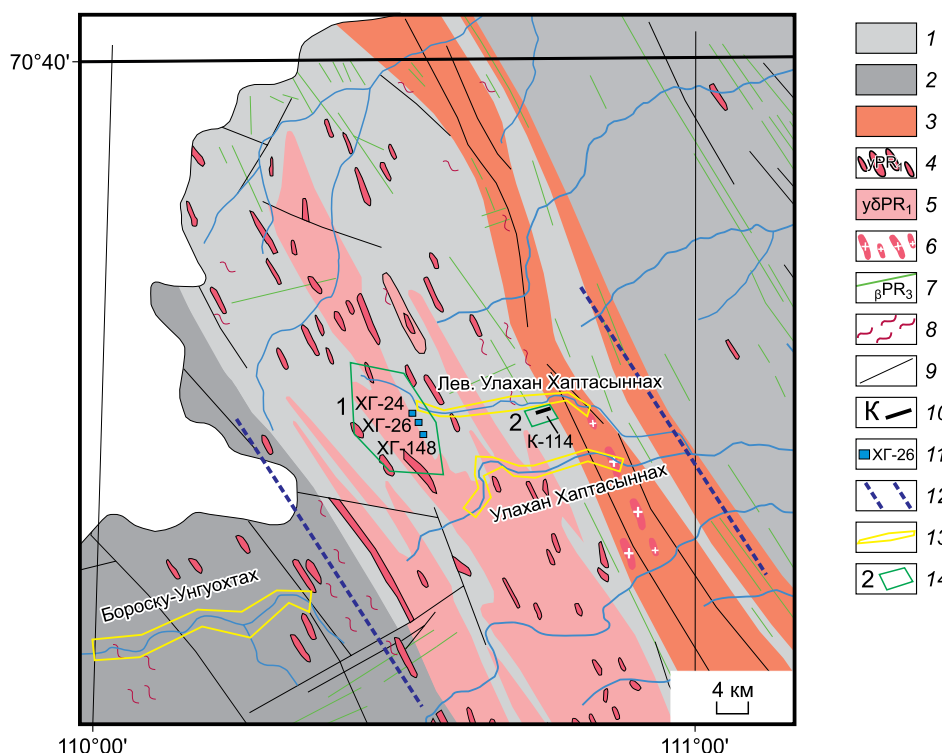


Рис. 1. Схема геологического строения Билляхской зоны Анабарского щита: 1 – архейская верхнеанабарская серия, 2 – нерасчлененные метаморфические комплексы Далдынского и Хапчанского террейнов, 3 – протерозойская хапчанская серия, 4 – раннепротерозойские аляскитовые и лейкократовые граниты (γ_1 -PR₁), 5 – раннепротерозойские порфировидные биотит-роговообманковые гранодиориты, монзониты, граниты и граносиениты билляхского комплекса (γ - σ PR₁), 6 – раннепротерозойские биотитовые монцогаббро и амфибол-биотитовые кварцевые монзониты, 7 – протерозойские метадоле- риты (β -PR₃), 8 – зоны мигматизации и гранитизации, 9 – тектонические контакты, 10 – поисковая канава, 11 – точки отбо- ра штучных проб и их номера, 12 – границы Хаптасыннахской рудной зоны, 13 – контуры россыпей, 14 – участки работ

Fig. 1. Geological structure of the Billyakh zone of the Anabar Shield: 1 – Archean Upper-Anabar Series, 2 – undivided meta- morphic complexes of the Daldyn and Khapchan terranes, 3 – Proterozoic Khapchan series, 4 – Paleoproterozoic alaskite and leucocratic granites (γ_1 -PR₁), 5 – Paleoproterozoic porphyric biotite-hornblende granodiorites, monzonites, granites and granosy- enites of the Billyakh complex (γ - σ PR₁), 6 – Paleoproterozoic biotite monzogabbros and amphibole-biotite quartz monzonites, 7 – Meso-Neoproterozoic diabbases and gabbro-diabbases (β -PR₃), 8 – zones of migmatization and granitization, 9 – tectonic con- tacts, 10 – prospecting trench, 11 – sampling points and their numbers, 12 – boundaries of the Khaptasynnah ore zone, 13 – plac- er contours, 14 – work areas

преимущественно полосчатая, реже рассеянная и пятнистая. Основными породообразующими минералами являются кварц и полевые шпаты. Кварц характеризуется мелко-, среднезернистой структурой. Полевые шпаты представлены как К, так и Na-Ca минералами в равной пропорции. Темноцветные минералы – пироксены, амфибо- лы, биотит. Главные рудные минералы – пирит, пирротин и халькопирит, реже встречаются сфал- ерит и галенит (содержание рудных минералов достигает 5 %). Кроме этого установлены арсе- нопирит, молибденит, ковеллин, борнит, антимо- нит, акантит, самородный висмут, золото, а так- же группа минералов теллура – петцит, гессит и теллуrowисмутит [7]. Пирит образует идио-

морфные кристаллы и аллотриоморфные выде- ления (рис. 2). Часто, наряду с пирротинном, яв- ляется матрицей для микрозерен других рудных минералов. Во всех проанализированных пири- тах (30 зерен) отмечается недостаток S (табл. 1). В качестве минеральных включений опреде- лены калиевый полевой шпат, плагиоклаз, кварц, хлоралпатит, сфалерит и халькопирит (см. рис. 2).

В пиритах выявлен широкий спектр элемен- тов-примесей. Au, Ga и In не обнаружены. Уровень содержания элементов-примесей в основном уме- ренный и низкий. Содержание Co варьирует от низкого до высокого, при этом около 20 % пири- та имеет повышенные, а более 50 % – высокие его концентрации (табл. 2).

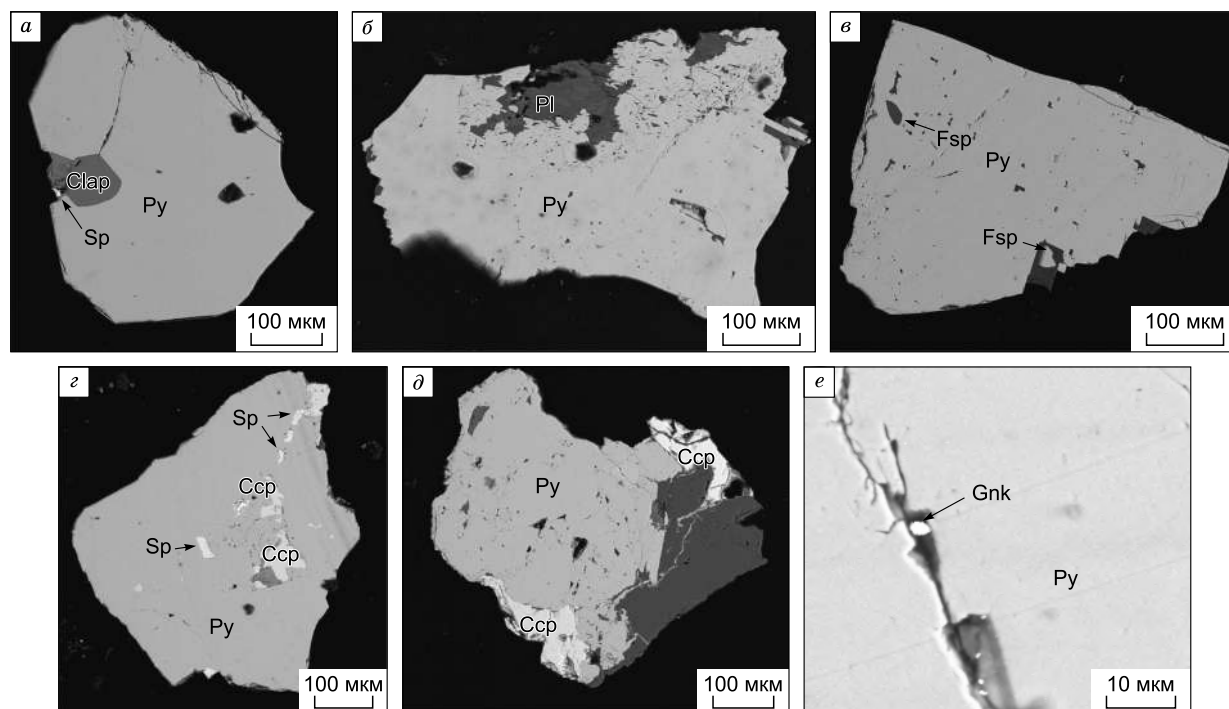


Рис. 2. Минеральные включения в пирите: *а* – сфалерит в сростании с хлорapatитом, *б* – плагиоклаз, *в* – калиевый полевой шпат, *г* – кристаллы сфалерита и халькопирита, *д* – халькопирит, *е* – мельчайшее выделение гринокиита

Fig. 2. Mineral inclusions in pyrite: *a* – sphalerite intergrown with chlorapatite, *б* – plagioclase, *в* – potassium feldspar, *г* – crystals of sphalerite and chalcopyrite, *д* – chalcopyrite, *е* – the smallest particle of greenockite

Пирит из бороздовых проб участка 2

Поисковые каналы пройдены вкост простиранья рудной зоны и имеют глубину 3–4 м. Изученные образцы представляют собой разнообразные кварц-полевошпатовые метасоматиты пятнистой и полосчатой текстуры. Макроминеральный состав руд представлен пиритом, пиротином и халькопиритом, спорадически встречаются сфалерит и галенит. Микроминеральный комплекс более разнообразен и состоит из арсенипирита, молибденита, шеелита, ковеллина, халькозина, антимонита, киновари, самородного висмута и золота, а также группы минералов теллура – петцита, гессита, теллуrowисмутита, хедлейита и алтаита.

Пирит представлен главным образом идиоморфными кристаллами. В качестве включений выявлены мелкие зерна золота, халькопирита, галенита, минералов группы хлорита (рис. 3). Наиболее распространенным включением из рудных минералов является халькопирит, характеризующийся как весьма мелкими, так и относительно крупными размерами выделений. Весьма мелкое золото отмечается по периферийным ча-

стям пиритов. Галенит встречается в виде единичных зерен микрометрового размера. Кроме этого в одном кубическом кристалле пирита обнаружены включения теллуридов золота и серебра.

Таблица 1
Химический состав пирита участка 1
по данным PCMA, мас. %

Table 1
Chemical composition of pyrite from site 1
according to electron microprobe analysis, wt. %

Номер анализа	S	Fe	Сумма	Эмпирическая формула
1	52,55	47,39	99,94	Fe _{1,02} S _{1,98}
2	52,35	46,78	99,13	Fe _{1,02} S _{1,98}
3	51,57	46,5	98,07	Fe _{1,02} S _{1,98}
4	52,77	46,47	99,24	Fe _{1,01} S _{1,99}
5	51,44	46,57	98,01	Fe _{1,03} S _{1,97}
6	52	46,11	98,11	Fe _{1,01} S _{1,99}
7	52,64	45,82	98,46	Fe _{1,00} S _{2,00}
8	51,68	46,45	98,13	Fe _{1,02} S _{1,98}
9	52,06	45,94	98	Fe _{1,01} S _{1,99}
10	52,69	47,09	99,78	Fe _{1,02} S _{1,98}

Таблица 2

Элементы-примеси в пирите образцов участка 1 по данным LA-ICP-MS, г/г

Table 2

Impurity elements in pyrite of site 1 according to LA-ICP-MS data, ppm

Номер анализа	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	As	Se	Mo	Ag	Cd	Sn	Sb	Te	W	Tl	Pb	Bi	Co/Ni
1	55,46	137,71	8,13	2,12	0,05	0,23	6,16	0,31	1,74	—	—	—	0,47	—	0,99	2,49	4,61	0,4
2	1804,8	23,22	2,51	1,18	0,03	1113,9	2,82	—	0,11	0,89	—	—	0,09	—	—	—	—	77,73
3	12455	22,47	3,9	0,76	—	0,41	4	—	0,1	0,56	—	—	0,42	—	—	—	—	554,39
4	16262	13,21	3,43	1,32	0,02	0,78	6,25	—	—	0,61	—	—	0,19	—	—	—	0,11	1231,32
5	15369	36,57	1,97	0,33	0,02	11,8	5,73	—	0,1	0,56	—	—	0,28	—	—	—	—	420,31
6	7614	578,1	4,32	1,13	—	0,32	9,49	—	0,19	27,73	—	—	1,93	—	—	0,16	—	13,17
7	59,69	127,84	4,09	0,28	0,02	—	7,61	0,24	—	2,16	—	—	0,61	—	—	0,19	—	0,47
8	9672,6	22,47	1,69	0,75	0,02	1,19	0,99	—	0,16	—	—	—	0,28	—	—	0,13	—	430,54
9	1786	390,1	2,03	0,2	—	—	5,03	0,11	—	5,17	—	—	0,14	—	—	0,13	—	4,58
10	143,35	0,74	3,53	0,04	—	138,18	2,35	0,1	0,1	—	0,61	—	0,09	—	—	0,1	0,05	193,04
11	824,38	1,65	5,22	1,69	0,05	233,59	1,27	—	0,17	23,03	—	—	0,85	—	—	0,24	—	501,14
12	578,1	2,68	5,41	0,8	0,08	93,06	0,85	0,1	—	—	—	—	0,85	—	—	0,51	0,05	215,79
13	92,12	1,18	2,96	1,41	0,15	143,35	6,58	—	—	—	0,11	—	0,56	—	—	—	—	78,4
14	234,53	1,6	3,2	1,65	0,06	185,18	2,16	—	0,14	1,79	0,1	—	0,14	—	—	0,32	—	146,76
15	1696,7	1,49	2,45	0,85	0,03	1,46	0,33	—	0,1	—	—	—	0,24	—	—	0,15	—	1142,41
16	3764,7	2,07	4,61	3,29	—	0,27	0,52	0,11	0,38	3,34	0,13	—	0,09	—	—	1,36	0,17	1820,45
17	883,6	0,43	5,92	1,22	0,03	—	5,41	—	0,17	0,61	—	—	1,55	—	—	0,15	—	2065,93
18	18,19	63,92	10,15	1,46	0,03	—	4,56	0,23	1,36	3,67	—	—	0,05	4,42	—	1,67	0,19	0,28
19	4,32	0,58	14,24	11,75	0,29	60,16	12,27	0,23	0,98	8,46	0,52	14,62	8,13	0,5	0,88	41,36	—	7,42
20	32,43	7,52	55,93	120,32	0,06	22,04	5,45	0,15	4,18	5,73	0,16	34,78	1,03	—	1,83	648,6	0,11	4,31
21	8695	8,18	4,09	0,61	—	2,3	0,71	0,33	—	1,08	—	—	0,24	—	—	0,14	—	1063,22
22	1381,8	42,77	3,9	0,99	0,04	0,28	1,69	0,12	0,28	—	—	—	0,61	—	—	0,14	0,24	32,31
23	9005,2	4,47	4,79	0,94	0,02	0,29	0,38	0,1	0,16	0,33	—	—	0,19	—	—	—	—	2016,84
24	10,81	4,32	9,96	0,75	—	—	11,05	—	0,58	—	—	—	0,05	—	—	158,86	—	2,5
25	1,18	0,21	2,63	0,06	0,02	0,14	7,29	0,15	0,15	0,71	—	—	0,38	—	—	7,9	—	5,56
26	0,32	1,74	3,1	1,6	0,03	0,16	2,73	0,11	0,15	7,99	0,25	—	0,42	—	—	22,09	—	0,19
27	397,62	18,28	2,21	19,27	—	3,62	13,82	—	0,15	13,63	0,15	—	0,14	—	—	0,66	0,21	21,75
28	3,9	1,55	5,73	2,96	—	1,03	22,09	0,42	0,76	1,13	—	—	—	—	—	23,08	3,04	2,52
29	4,61	0,66	4,79	1,36	—	—	38,54	—	0,24	0,71	—	—	0,42	—	—	0,16	0,04	7
30	2227,8	16,92	380,7	25,38	0,02	0,66	5,92	—	2,3	1,32	—	—	2,16	—	—	4,23	0,09	131,67
31	6293,3	26,51	15,51	2,21	—	2,66	4,98	—	—	0,19	—	—	0,24	—	—	0,85	0,09	237,41
32	2115	11,94	4,84	0,66	0,02	0,44	6,35	—	0,2	0,19	—	—	0,24	—	—	0,31	—	177,17

Примечание. Прочерк – ниже предела обнаружения.

Note. Dash – below detection limit.

В пиритах обнаружен широкий спектр элементов-примесей (табл. 3). Концентрация Co варьирует от низкой до высокой, при этом более 50 % пирита характеризуется умеренным (22 %) и низким (30 %) содержанием этого элемента. Ni имеет высокий (18 %) и повышенный (39 %) уровень содержания в более 50 % изученного пирита. Cu, Zn, As, Se и Bi демонстрируют в основном умеренные и повышенные концентрации, остальные элементы – низкие (см. табл. 3). Au выявлено практически во всех проанализированных образцах пиритов, максимальное его содержание составило 42 г/т.

Результаты исследований показали, что по концентрации основных макрокомпонентов и элементов-примесей пириты образцов элювиальных отложений (пирит-1) и поисковой канавы (пирит-2) различаются.

В пирите-1 содержания основных макрокомпонентов колеблются в следующих пределах: Fe от 45,82 до 47,39 % (среднее 46,48 %), S от 51,44 до 52,77 % (среднее 52,18 %) (см. табл. 1). В пирите-2 концентрации Fe варьируют от 46,15 до 48,77 % (среднее 47,56 %), а S – от 51,44 до 53,88 % (среднее 52,78 %) (табл. 4). Таким образом, основная часть пирита-2 отличается от пирита-1 чуть более высокими содержаниями Fe и S, что хорошо демонстрируется на диаграмме соотношений этих элементов (рис. 4, а).

Сравнительный анализ медианных содержаний элементов-примесей в пирите показал, что пирит-2 характеризуется более высокими содержаниями большинства микроэлементов, чем пирит-1 (рис. 4, б). Исключением являются Co и Te, которые имеют более высокие медианные значения в пирите-1.

По сведениям [8], Co и Ni могут замещать Fe в кристаллической решетке пирита. Степень концентрации этих элементов в сульфидах широко использовалась многими исследователями для вывода о ключевых процессах рудообразования [9–14]. Кроме этого, считается, что отношение Co/Ni в пирите является геохимическим индикатором условий его образования [15].

В пирите-1 содержание Co варьирует от 0,32 до 16262 г/т, медианное значение составляет 883,6 г/т, а Ni – от 0,21 до 578,1 г/т, медианное – 50 г/т (см. табл. 1). В пирите-2 концентрация Co варьирует от 0,05 до 12720 г/т, медианное значение достигает 99 г/т, а Ni – от 0,37 до 4320 г/т, медианное – 179 г/т (см. табл. 2). Таким образом, по содержанию Co и Ni пирит-1 существенно

отличается от пирита-2, что выражается в более высоком содержании Co, и в более низком (на порядок) – Ni. Это хорошо иллюстрируется на графике соотношений медианных содержаний элементов-примесей (см. рис. 4, б). По данным [8], повышенные содержания Co характерны для высокотемпературных рудных систем, что обусловлено его высокими концентрациями в высокотемпературных гидротермальных флюидах. На резкое снижение концентрации Co в гидротермальных флюидах по мере снижения температуры также указано в [16].

Отношение Co/Ni в пирите-1 составляют от 0,19 до 2065, в среднем 393,96 г/т (см. табл. 1). В пирите-2 значения отношения Co/Ni значительно ниже и варьируют от 0,01 до 655,67, в среднем 63,79 г/т (см. табл. 2). Это различие отлично демонстрируется на графике соотношений Co и Ni (рис. 5, а).

Таким образом, большинство значений отношения Co/Ni в изученных образцах пирита-1 больше единицы и варьируют в широких пределах, что считается влиянием магматогенно-гидротермальных процессов [13, 15]. Основная же часть пирита-2 имеет низкое отношение Co/Ni (<1), что может быть результатом более низкой температуры его кристаллизации [19]. Об этом также могут свидетельствовать более высокие содержания Se в пирите-2 (в основном >10, в среднем 41,93 г/т) по сравнению с пиритом-1 (в основном <10, в среднем 6,41 г/т), поскольку содержание Se в сульфидах увеличивается с понижением температуры [8, 18]. Вместе с тем, содержание этого элемента зависит также от уровня pH и окислительно-восстановительных условий рудообразующих флюидов. Так, по данным [13], пириты из разных генетических типов рудных месторождений различаются по содержанию Se, в связи с разнообразными условиями их образования. Упомянутые авторы сравнили концентрации Se и As в сульфидах из разных месторождений. Пириты орогенных и эпитептермальных (LS) месторождений и типа Карлин, которые характеризуются относительно низкими температурами флюидов, низкой fO_2 , низкой соленостью и почти нейтральным pH, имеют высокие содержания Se (преимущественно >10 г/т) и As (преимущественно >100 г/т). Пириты эпитептермальных (HS) месторождений, характеризующиеся относительно низкими температурами флюидов (< 300 °C), высокой fO_2 , умеренно-высокой соленостью и очень кислым pH, имеют силь-

Таблица 3

Элементы-примеси в пирите образцов участка 2 по данным LA-ICP-MS, г/т

Table 3

Impurity elements in pyrite samples collected of site 2 according to LA-ICP-MS data, ppm

Номер анализа	Co	Ni	Cu	Zn	As	Se	Mo	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	W	Au	Tl	Pb	Bi	Co/Ni
1	23,00	327,00	174,00	17,60	21,40	54,00	0,75	0,68	4,00	—	—	1,13	9,40	—	2,30	0,05	19,10	5,70	0,07
2	5300,00	54,00	33,40	2,31	51,40	19,00	—	0,08	0,66	—	0,26	—	5,80	—	0,27	0,13	0,83	0,20	98,14
3	1510,00	340,00	48,00	20,00	30,40	17,80	—	0,80	196,00	—	—	1,43	6,20	0,11	30,00	0,07	4,37	1,07	4,44
4	99,00	2360,00	14,80	1,75	20,30	62,00	—	0,02	0,00	—	0,33	0,19	1,45	—	0,10	0,02	1,09	0,19	0,04
5	3,30	494,00	102,00	13,40	5,60	87,00	—	0,37	3,20	—	0,69	2,60	4,30	0,35	1,40	0,01	12,80	1,78	0,01
6	2,90	860,00	48,90	26,00	21,40	13,80	—	0,33	0,01	—	—	0,87	4,70	—	1,15	0,11	36,00	3,50	0,01
7	7280,00	190,00	64,00	1,30	20,30	20,00	—	0,00	0,00	—	0,53	—	1,70	—	0,07	0,16	0,59	0,09	38,31
8	165,00	760,00	780,00	440,00	15,20	38,20	—	2,56	14,10	0,17	0,47	0,45	4,30	—	1,83	0,08	8,59	1,90	0,21
9	1,68	109,00	9,80	1,09	16,10	61,00	—	0,07	—	—	0,33	—	7,70	—	—	0,02	0,83	0,12	0,01
10	1,60	179,00	17,90	1,90	12,30	26,00	—	0,01	—	—	0,14	—	—	—	—	—	0,91	0,22	0,01
11	2510,00	361,00	50,00	3,60	18,00	64,00	—	1,02	0,33	—	—	—	23,00	—	0,18	—	14,00	2,30	6,95
12	250,00	628,00	18,30	4,40	16,80	43,00	—	0,21	—	0,05	—	0,89	2,20	—	0,60	0,02	0,51	0,00	0,39
13	3700,00	47,00	57,00	1,50	31,20	23,00	—	5,70	—	—	0,09	0,30	63,00	—	—	0,10	12,80	17,80	78,72
14	0,53	17,10	46,20	1,86	44,60	25,30	—	0,38	0,92	0,04	—	0,04	0,01	—	0,10	0,07	0,83	—	0,03
15	10460,00	38,00	50,00	3,70	33,20	56,00	—	6,60	9,30	0,02	0,27	1,16	16,00	—	0,81	0,10	10,80	3,00	275,26
16	230,00	129,00	71,00	5,90	74,00	17,00	—	0,58	3,00	—	0,54	1,74	71,00	—	2,70	0,09	16,60	5,40	1,78
17	4780,00	11,50	28,00	5,40	28,70	14,10	—	0,74	13,30	—	—	0,60	4,60	—	3,30	0,09	6,70	2,51	415,65
18	1,40	—	94,00	30,50	19,60	91,00	—	3,30	4,90	—	0,05	0,98	—	—	2,41	0,10	12,00	0,03	0,01
19	15,20	610,00	38,00	4,20	23,10	61,00	—	0,23	3,00	—	0,32	0,82	0,50	—	1,90	0,13	32,10	0,18	0,02
20	2,70	310,00	18,60	7,40	17,30	34,00	—	1,10	32,00	—	0,11	1,27	—	—	16,00	0,08	5,60	0,54	0,01
21	75,00	356,00	14,20	2,70	31,60	77,00	—	0,08	2,10	—	—	0,63	4,00	—	0,88	0,04	6,50	0,49	0,21
22	10260,00	21,90	37,90	3,50	19,10	26,60	—	0,73	1,90	—	0,17	0,66	0,01	—	2,61	0,13	3,40	0,18	468,49
23	10,60	1380,00	583,00	115,00	62,50	67,00	27,80	2,65	9,70	—	0,26	3,93	4,70	—	3,10	0,08	120,00	0,30	0,01
24	5110,00	21,10	52,90	2,03	47,60	13,90	—	0,00	0,08	—	0,10	0,40	2,50	—	0,29	0,17	2,70	0,82	242,18
25	—	3,10	125,00	8,90	194,00	5,10	—	1,11	25,00	—	0,02	0,56	—	—	1,77	0,17	1,80	—	0,01
26	—	0,00	56,00	1,69	100,00	8,70	—	0,23	—	0,06	—	0,28	—	—	0,04	0,22	1,06	—	0,01
27	—	3,10	490,00	40,00	460,00	4,30	—	1,30	64,00	—	—	4,00	—	0,07	22,00	0,11	10,00	0,04	0,01
28	8630,00	33,70	17,20	0,82	43,50	10,20	—	0,00	0,01	—	0,10	0,09	—	—	—	—	0,40	0,06	256,08
29	5050,00	49,00	43,00	18,00	22,20	21,00	—	0,70	48,00	—	0,31	3,70	—	—	21,00	0,07	3,70	—	103,06
30	38,20	855,00	23,40	5,00	15,50	36,00	—	0,34	1,80	—	0,25	0,50	—	—	2,15	0,08	1,29	0,18	0,04
31	93,00	1440,00	42,00	67,00	11,10	62,00	—	7,00	38,00	0,02	1,04	4,40	—	0,62	12,70	0,09	6,80	9,20	0,06

32	1330,00	28,00	60,30	5,70	32,60	66,00	—	1,93	32,00	—	0,30	1,13	7,00	—	6,20	0,16	33,30	28,00	47,50
33	11380,00	38,40	26,90	2,34	28,00	18,70	—	0,00	0,70	—	0,06	0,19	0,23	—	1,61	0,09	1,34	0,67	296,35
34	50,00	27,00	41,00	16,80	19,70	84,00	—	3,40	38,00	—	1,11	3,30	—	0,06	10,60	0,28	82,00	0,24	1,85
35	32,80	640,00	28,40	7,50	13,60	47,00	—	2,17	24,00	0,02	0,57	1,07	1,07	0,04	5,90	0,14	1,93	0,33	0,05
36	48,00	630,00	33,80	14,50	6,40	68,00	—	2,39	38,00	—	0,14	1,96	—	0,18	13,10	0,13	4,00	0,44	0,07
37	316,00	1560,00	50,00	40,00	5,60	23,00	—	10,10	45,00	—	0,42	4,20	—	—	8,20	0,35	17,80	0,84	0,20
38	12720,00	19,40	19,20	4,60	28,20	16,80	—	0,14	5,30	—	0,09	0,25	—	—	1,84	0,10	0,68	—	655,67
39	134,00	566,00	290,00	56,00	21,10	64,00	—	10,30	290,00	—	1,50	10,80	—	—	30,00	1,32	17,20	0,26	0,23
40	4100,00	14,00	9,80	2,51	26,00	12,60	—	0,00	2,00	—	0,15	0,14	—	—	1,14	0,03	0,32	—	292,85
41	9000,00	35,00	51,00	3,40	148,00	10,90	—	0,00	1,60	—	—	—	—	—	0,68	0,19	0,53	—	257,14
42	8520,00	25,00	45,00	15,00	133,00	12,00	—	3,40	32,00	0,05	0,12	1,14	—	0,07	14,00	0,08	2,00	—	340,80
43	120,00	620,00	77,00	5,70	26,50	41,00	—	1,50	1,80	—	—	0,14	—	—	2,20	0,62	8,20	—	0,19
44	1,70	103,00	66,00	2,30	14,40	10,50	—	6,30	2,30	—	0,18	0,47	—	—	1,13	2,11	32,50	—	0,01
45	310,00	2420,00	119,00	11,30	33,30	59,00	—	11,90	35,00	0,03	0,25	2,80	—	—	6,80	4,66	100,00	0,02	0,12
46	—	28,00	69,00	26,10	13,50	12,50	—	2,40	54,00	—	0,34	5,70	—	0,03	12,30	0,36	9,10	—	0,01
47	102,00	1130,00	76,00	59,00	12,70	29,00	—	1,51	39,00	0,09	0,56	6,40	—	0,10	16,10	0,62	17,10	0,02	0,09
48	24,70	3180,00	17,00	2,50	24,80	81,00	—	0,80	10,70	—	0,06	0,58	1,70	—	2,62	0,33	2,83	—	0,01
49	470,00	2660,00	1960,00	58,60	1250,00	108,00	6,80	223,00	225,00	—	1,19	82,10	0,33	0,16	42,00	20,10	93,30	0,10	0,10
50	203,00	2300,00	178,00	9,10	648,00	46,00	—	106,00	22,90	—	0,31	33,70	1,60	—	9,40	18,00	6,60	0,06	0,08
51	343,00	50,00	47,00	3,40	28,10	39,00	—	0,29	25,00	0,09	0,16	1,25	1,10	—	5,90	0,11	9,70	0,07	6,86
52	1,60	14,00	44,00	14,00	38,30	51,00	—	0,42	3,10	—	0,38	1,09	—	—	5,40	0,15	8,60	0,04	0,11
53	0,63	575,00	125,00	5,30	22,20	53,00	—	14,20	0,28	—	0,23	0,84	—	—	0,36	3,56	79,00	—	0,01
54	90,00	940,00	116,00	46,00	30,20	41,00	—	23,00	20,00	—	0,49	4,50	—	—	5,50	5,90	429,00	—	0,09
55	118,00	1510,00	103,00	7,80	22,70	91,00	—	1,34	0,36	0,02	0,46	6,60	—	—	0,23	1,33	11,30	—	0,07
56	135,00	4320,00	24,60	2,06	19,60	80,00	—	0,35	—	—	0,13	0,54	—	—	0,11	0,16	1,12	—	0,03
57	7,40	165,00	39,20	2,90	20,50	70,00	—	0,25	—	—	0,25	0,62	—	—	0,05	0,20	7,00	—	0,04
58	29,30	744,00	37,00	10,20	16,40	80,00	—	1,53	1,50	—	0,24	0,44	—	—	0,08	0,14	15,00	—	0,03
59	0,21	—	28,00	5,50	21,60	17,00	—	0,67	—	—	0,74	0,37	—	—	1,79	0,84	7,10	0,11	0,01
60	—	—	13,00	7,30	22,90	21,80	—	0,28	—	—	0,06	0,20	3,60	—	—	0,16	1,74	0,06	0,01
61	52,00	64,00	480,00	56,00	60,00	45,00	—	55,00	11,00	—	1,20	7,00	33,00	0,40	3,50	0,14	77,00	1,02	0,80

Примечание. Прочерк – ниже предела обнаружения.

Note. Dash – below detection limit.

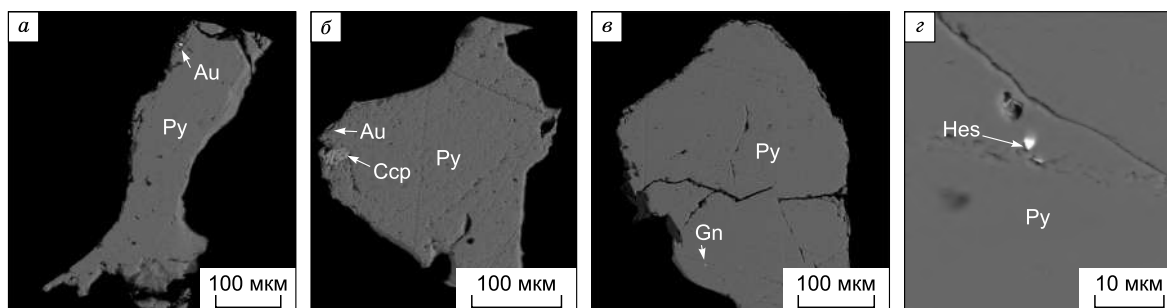


Рис. 3. Минеральные включения в пирите: *а* – мельчайшее выделение золота, *б* – зерно золота рядом с кристаллом халькопирита, *в* – мельчайшее зерно галенита, *г* – зерно гессита

Fig. 3. Mineral inclusions in pyrite: *a* – the smallest gold particle, *б* – a gold grain next to a chalcopyrite crystal, *в* – the smallest galena grain, *г* – hessite grain

но изменчивые значения Se (около 1–1000 г/т) и As (около 1–30 000 г/т). Пириты из порфировых месторождений, характеризующиеся высокими флюидными температурами, высокой fO_2 , умеренно-высокой соленостью и кислым pH, имеют относительно низкие содержания Se (в основном <10 г/т) и As (в основном <100 г/т) [13]. Как показано на рис. 5, *б*, пирит-1 по соотношению Se и As преимущественно располагается в поле порфировых месторождений, частично перекрываясь полем эпитермальных (HS) месторождений, а пирит-2 полностью локализуется в области эпитермальных месторождений и частично перекрывается полем рудопроявлений порфирового типа.

Содержание Au в пирите-2 варьирует от 0,07 до 42 г/т. До настоящего времени у исследовате-

лей не сложилось единого мнения о форме нахождения золота в пирите: вхождении Au в структуру пирита в качестве изоморфной примеси или в самородном состоянии в виде нановключений. По мнению [8], Au относится к элементам, которые встречаются в пирите в виде нестехиометрических замещений в кристаллической решетке. По материалам [20–22], невидимое Au может находиться в химически связанном виде в структуре пирита, а также в виде поверхностно-связанной формы наноразмерной неавтономной фазы, находящейся на поверхности кристаллов. При этом по экспериментальным данным и результатам, полученным при изучении золотосодержащего пирита на месторождениях разных генетических типов, низкомышьяковистые пириты не могут содержать более 5 г/т структурной формы Au [20]. М. Райхом с соавторами [17] была выведена кривая растворимости Au в As-содержащем пирите, которая показывает, что Au может встречаться либо как структурно связанный элемент (Au^{+1}), либо в виде включений (Au^0). В нашем случае точки данных на графике разброса концентрации элементов для Au-As, которые устанавливаются ниже предела растворимости в твердом веществе, указывают на то, что основная часть золота находится в форме Au^{+1} , т. е. входит в структуру пирита (рис. 5, *в*). Вместе с тем, как указывалось выше, в пиритах методом РСМА установлены также микровключения самородного золота. На диаграмме зависимости содержания Au и As это отражается в виде фигуративных точек, концентрирующихся выше линии предела растворимости. По [23], содержание Au и As уменьшается с повышением температуры от 200 до 500 °С. Этими авторами определены два основных типа золотосодержащего мышьяко-

Таблица 4

**Химический состав пирита участка 2
по данным РСМА, мас. %**

Table 4

**Chemical composition of pyrite from site 2
according to electron microprobe analysis, wt. %**

Номер анализа.	S	Fe	Сумма	Формула
1	53,76	47,29	101,05	$Fe_{1,01} S_{1,99}$
2	53,42	46,56	99,98	$Fe_{1,00} S_{2,00}$
3	52,76	47,23	99,99	$Fe_{1,02} S_{1,98}$
4	53,88	48,77	102,65	$Fe_{1,03} S_{1,97}$
5	52,9	46,98	99,88	$Fe_{1,01} S_{1,99}$
6	53,28	48,06	101,34	$Fe_{1,02} S_{1,98}$
7	52,87	46,15	99,02	$Fe_{1,00} S_{2,00}$
8	52,06	47,93	99,99	$Fe_{1,04} S_{1,96}$
9	53,3	48,29	101,59	$Fe_{1,03} S_{1,97}$
10	52,12	46,21	98,33	$Fe_{1,01} S_{1,99}$

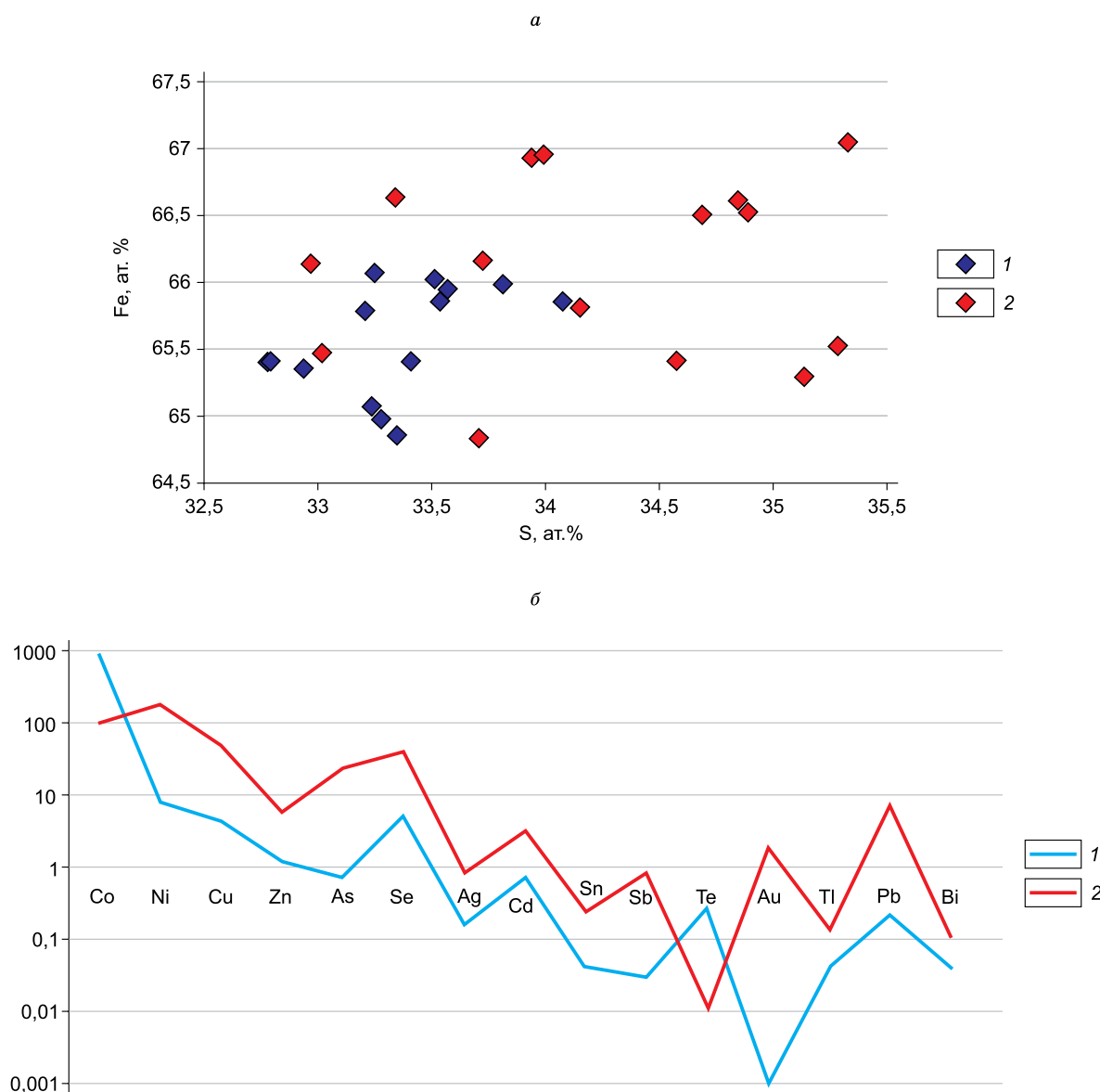


Рис. 4. Диаграмма соотношений Fe и S (ат.%) (*a*) и медианных содержаний (г/т) элементов-примесей (*b*) в пирите Хаптасыннахской рудной зоны: 1 – пирит-1, 2 – пирит-2

Fig. 4. Diagram of Fe and S ratios (at. %) (*a*) and median contents (ppm) of impurity elements (*b*) in pyrite of the Khaptasynnakh ore zone: 1 – pyrite-1, 2 – pyrite-2

вистого пирита. Первый тип формируется в золоторудных месторождениях карлинского типа и орогенных месторождениях золота, где состав в значительной степени определяется взаимодействием флюидов с породой и/или может быть сильно изменен при колебаниях температуры и под действием гидротермальных флюидов. Второй тип – это пириты из Au-Cu-порфировых и эпitherмальных золоторудных месторождений, которые характеризуются составами, сохраняющими Au/As-сигнатуру минерализующих магматоген-

но-гидротермальных флюидов, что подтверждает роль этого сульфида в контроле соотношения металлов в рудных системах. Как показано на рис. 5, *б*, основная масса золотоносного пирита Хаптасыннахской рудной зоны относится к эпitherмальному типу, частично перекрывается полями порфировых и вулканогенных массивно-сульфидных месторождений.

Теллур обнаружен во всех образцах пирита-1 в количестве от 0,05 до 8,13 г/т. В пирите-2 концентрация этого элемента колеблется от 0,23 до

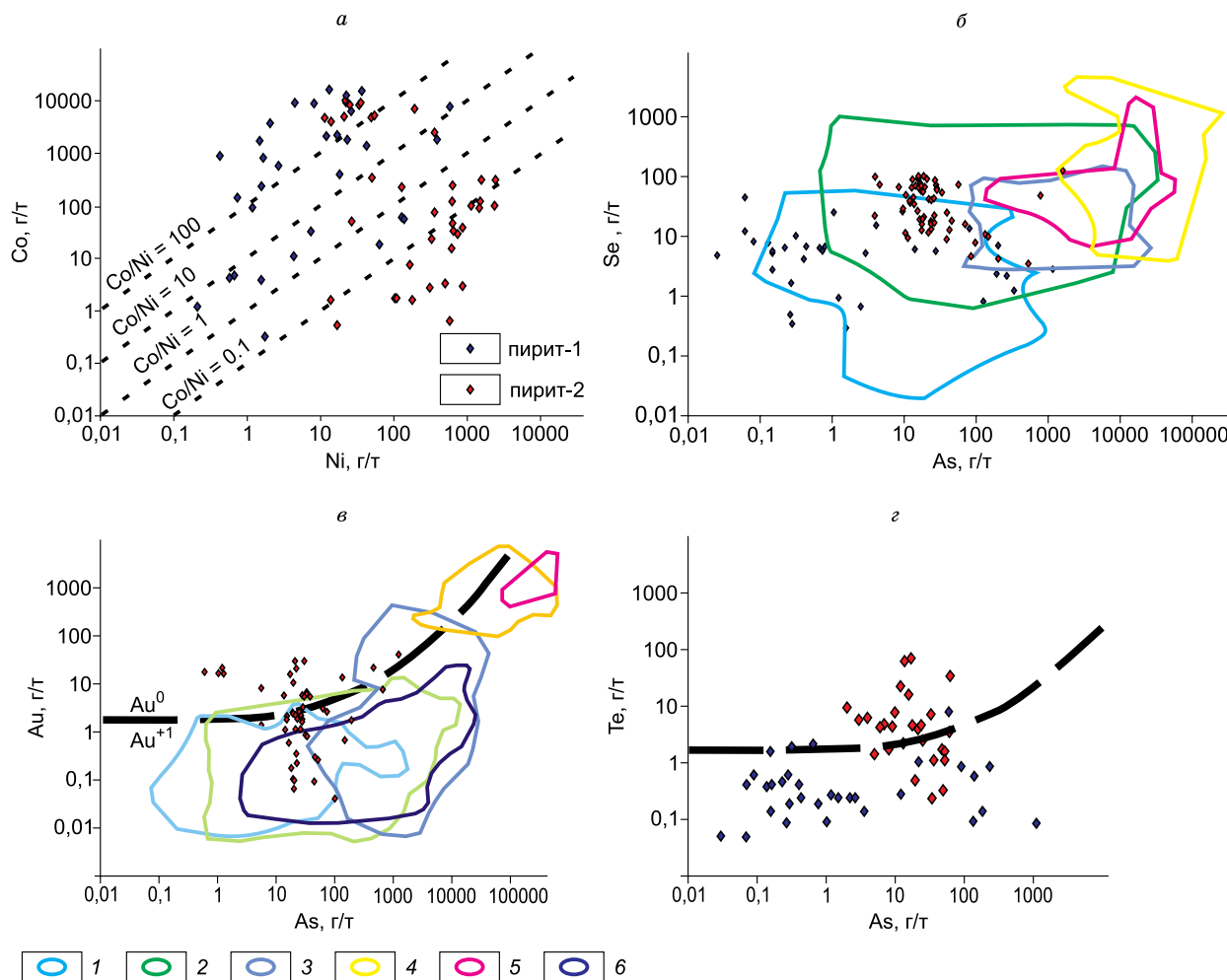


Рис. 5. Графики соотношений Co и Ni (а), Se и As (б), Au и As (в), Te и As (г) в пиритах Хаптасыннахской рудной зоны. Поля различных типов месторождений по [13]: 1 – порфировые, 2 – эпипермальные (HS-тип), 3 – орогенные, 4 – типа Карлин, 5 – эпипермальные (LS-тип), 6 – вулканогенные массивно-сульфидные. Черная штриховая линия растворимости Au – верхний предел твердого раствора Au и Te в пирите в зависимости от As [17, 18]

Fig. 5. Graphs of ratios between Co and Ni (a), Se and As (б), Au and As (в), Te and As (г) in pyrites from the Khaptasynnaakh ore zone. Fields of different types of deposits according to [13]: 1 – porphyry, 2 – epithermal (HS-type), 3 – orogenic, 4 – Carlin type, 5 – epithermal (LS-type), 6 – volcanogenic massive-sulfide. The black dotted curve of the Au solubility line is the upper limit of the solid solution of Au and Te in pyrite depending on As [17, 18]

71 г/т, но при этом обнаружен он только в 50 % образцов. По этой причине медианное значение содержания Te оказалось выше в пирите-1 (см. рис. 4), хотя абсолютные значения практически на порядок выше в пирите-2 (см. табл. 1, 2). По материалам [18], низкие и средние концентрации Se и Te характерны для пирита медно-порфировых месторождений, а для эпипермального пирита – сильно варьирующие концентрации Te и Se, от 0,1 до 7940 г/т и от 0,4 до 2150 г/т соответственно. Кроме этого, высокие содержания Te в кристаллах пирита объясняются наличием теллуридных включений. М. Кит с соавторами [18] на основании того, что ковалентный радиус Te

(138 пм) весьма близок к таковому Au (136 пм), допустили, что линия растворимости Au может также использоваться для идентификации включений Te в пирите на диаграмме $\log(\text{Te})$ – $\log(\text{As})$. Как показано на рис. 5, г, основная часть фигуративных точек пирита-2 локализуется выше линии растворимости, что согласуется с установлением в этом пирите микровключений теллуридов золота (см. рис. 3).

Таким образом, аналитические точки составов изученных разновидностей пирита довольно контрастно обособливаются во всех рассмотренных диаграммах, что свидетельствует о различных условиях образования пирита-1 и пирита-2.

Заключение

Сравнительный анализ состава и содержаний некоторых элементов-примесей в пирите Хаптасыннахской рудной зоны позволяет утверждать о выявлении пиритов различных генераций:

– пирит-1 – не золотоносный, обнаружен в метасоматитах элювиальных отложений. Индикаторными признаками являются высокое содержание Co, пониженное Ni и в целом низкая концентрация элементов-примесей. Отношение Co/Ni больше единицы и варьирует в широких пределах, что характерно для сульфидов, образовавшихся под влиянием магматогенно-гидротермальных процессов. Предполагается, что этот пирит формировался в высокотемпературных условиях и, возможно, связан с медно-порфировой рудной системой;

– пирит-2 – золотоносный, выявлен в метасоматитах, вскрытых поисковой канавой, характеризуется повышенным содержанием элементов-примесей. Отличительными его чертами являются высокие концентрации Ni и повышенные Se, Te и низкие значения (<1) отношения Co/Ni. Au определено практически во всех изученных образцах пирита-2 (от 0,07 до 42 г/т) и выявлено и как структурно связанный элемент (Au^{+1}), и в виде включений (Au^0). Пирит-2 кристаллизовался в низкотемпературных условиях и связан с золототеллуридным минеральным типом оруденения.

Таким образом, результаты исследований позволяют констатировать, что изученный пирит является минералом-индикатором, несущим важнейшую информацию об условиях рудообразования, и особенности его типохимизма могут быть использованы в качестве минералогических критериев при прогнозно-поисковых работах.

Список литературы / References

1. Толстов А.В. Перспективы золотоносности Анабарской антеклизы. *Вестник Госкомгеологии*. 2002;(1):44–49. EDN: XANMER.

Tolstov A.V. Gold prospects of the Anabar Antecline. *Bulletin of the State Geology Committee*. 2002;(1):44–49. (In Russ.) EDN: XANMER

2. Смелов А.П., Амузинский В.А., Зедгенизов А.Н. и др. Перспективы коренной золотоносности метаморфических и магматических комплексов Анабарского щита. В кн.: *Золото Сибири и Дальнего Востока: Тезисы третьего Всероссийского симпозиума с международным участием, г. Улан-Удэ, 21–25 сентября 2004 г.* Улан-Удэ; 2004. С. 279–281.

Smelov A.P., Amuzinsky V.A., Zedgenizov A.N., et al. Prospects for primary gold content of metamorphic and igneous complexes of the Anabar Shield. In: *Gold of Siberia and the Far East: Proceedings of the Third All-Russian Symposium*

with International Participation, Ulan-Ude, September 21–25, 2004. Ulan-Ude; 2004, pp. 279–281. (In Russ.)

3. Кравченко А.А., Смелов А.П., Березкин В.И. и др. Природа золоторудной минерализации раннепротерозойского билляхского гранитоидного комплекса по геохимическим данным (Анабарский щит). *Отечественная геология*. 2010;(5):23–29. EDN: MURPLJ

Kravchenko A.A., Smelov A.P., Berezkin V.I., et al. The nature of gold mineralization of the Paleoproterozoic Billyakh granitoid complex as derived from geochemical data (Anabar Shield). *Otechestvennaya geologiya* [Domestic Geology] 2010.(5): 23–29. (In Russ.) EDN: MURPLJ

4. Герасимов Б.Б. Типоморфные признаки самородного золота россыпи реч. Левый Улахан Хаптасыннах и его вероятные коренные источники (Анабарский щит). *Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири*. 2024;3(59): 84–92. <https://doi.org/10.20403/2078-0575-2024-3-84-92> EDN: NHAHXR

Gerasimov B.B. Typomorphic features of native gold placer of the Left Ulakhan Haptasynakh river and its probable indigenous sources (Anabar Shield). *Geology and Mineral Resources of Siberia*. 2024;3(59):84–92. <https://doi.org/10.20403/2078-0575-2024-3-84-92>. (In Russ.) EDN: NHAHXR

5. Смелов А.П., Котов А.Б., Сальникова Е.Б. и др. Возраст и продолжительность формирования Билляхской зоны тектонического меланжа, Анабарский щит. *Петрология*. 2012;20(3):315–330. EDN: OXYBNJ

Smelov A.P., Beryozkin V.I., Kravchenko A.A., et al. Age and duration of the formation of the Billyakh tectonic melange zone, Anabar shield. *Petrology*. 2012;20(3):286–300. <https://doi.org/10.1134/S0869591112030058> EDN: PDPENJ

6. Герасимов Б.Б., Желонкин Р.Ю., Земнухов А.Л. и др. Золото-теллуридная минерализация Билляхской зоны тектонического меланжа Анабарского щита. *Доклады Российской академии наук. Науки о Земле*. 2025;524(1):64–73. <https://doi.org/10.7868/S3034506525090084> EDN: FGWTLV

Gerasimov B.B., Zhelonkin R.Yu., Zemnukhov A.L., et al. Gold-telluride mineralization of the Billyakh Zone of the tectonic melange of the Anabar Shield. *Doklady Earth Sciences*. 2025;524(1):1–8. <https://doi.org/10.1134/S1028334X25605905> EDN: DKEMYU

7. Gerasimov B., Kondratieva L. Mineral characterization of gold ore occurrences in the Khaptasynakh Ore Zone, Anabar Shield, Far East Region, Russia. *Minerals*. 2025;15:774. <https://doi.org/10.3390/min15080774> EDN: OQPPNG

8. Huston D.L., Sie S.H., Suter G.F., et al. Trace elements in sulfide minerals from eastern Australian volcanic-hosted massive sulfide deposits: Part I, Proton microprobe analyses of pyrite, chalcopyrite, and sphalerite, and Part II, Selenium levels in pyrite; comparison with $\delta^{34}\text{S}$ values and implications for the source of sulfur in volcanogenic hydrothermal systems. *Economic Geology*. 1995;90(5):1167–1196. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.90.5.1167>.

9. Reich M., Deditius A., Chrysosoulis S., et al. Pyrite as a record of hydrothermal fluid evolution in a porphyry copper system: a SIMS/EMPA trace element study. *Geochim. Cosmochim. Acta*. 2013;(104):42–62. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2012.11.006>

10. Babedi L., Von der Heyden B., Tadie M., Mayne M. Trace elements in pyrite from five different gold ore deposit classes: a review and meta-analysis. In: Torvela T., et al. (eds.) *Recent Advances in Understanding gold Deposits: From Orogeny to Alluvium*. Geological Society London Special Publications. 2023. <https://doi.org/10.1144/SP516-2021-41>.

11. Сильянов С.А., Сазонов А.М., Лобастов Б.М. и др. Типохимизм пирита золоторудного месторождения Совет-

ское (Енисейский край). *Геосферные исследования*. 2022;(2): 112–126. <https://doi.org/10.17223/25421379/23/7> EDN: OFGBFJ

Silyanov S.A., Sazonov A.M., Lobastov B.M., et al. Pyrite typochimistry of the Sovetskoe gold deposit (Yenisei Ridge, Russia). *Geosphere Research*. 2022;(2):112–126. (In Russ.) <https://doi.org/10.17223/25421379/23/7> EDN: OFGBFJ

12. Ефанова Л.И., Ковальчук Н.С., Майорова Т.П. Микропримеси в пирите золоторудных проявлений хребта Манитаньрд (Полярный Урал). *Руды и металлы*. 2024;2:28–45. <https://doi.org/10.47765/0869-5997-2024-10007> EDN: WKDEIR.

Efanova L.I., Kovalchuk N.S., Mayorova T.P. Microimpurities in pyrite of gold ore occurrences of the Manitanyrd ridge (the Polar Urals). *Ores and Metals (Rudy I Metally)*. 2024;2:28–45. <https://doi.org/10.47765/0869-5997-2024-10007> EDN: WKDEIR.

13. Xie J., Dang T., Qian L., et al. Geochemistry of sulfide minerals from skarn Cu (Au) deposits in the Fenghuangshan ore field, Tongling, eastern China: Insights into ore-forming process. *Ore Geology Reviews*. 2020;(122). <https://www.sci-hub.ru/10.1016/j.gca.2018.11.034?ysclid=loicmhp7cm238766688>.

14. Лоскутов Е.Е., Фридовский В.Ю., Иванов Е.Е. Состав пирита золоторудного проявления Утанах в диафторитах Верхне-Тимптонского района Алдано-Станового щита (по данным РСМА и ЛА-ИСПМС). *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2025;30(4):559–571. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2025-30-4-559-571> EDN: RFQTTR

Loskutov E.E., Fridovsky V.Yu., Ivanov E.E. Composition of pyrite from the Utanakh gold ore occurrence in diaphthorites of the Upper-Timptonsky region of the Aldan-Stanovoy shield (according to RSMA and LA-ISPMS data). *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2025;30(4):559–571 (In Russ.) <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2025-30-4-559-571> EDN: RFQTTR

15. Bralía A., Sabatini G., Troja F.A. Reevaluation of the Co/Ni ratio in pyrite as geochemical tool in ore genesis problems. *Mineral. Deposita*. 1979;(14):353–374.

16. Maslennikov V.V., Maslennikov S.P., Large R.R., Danyshevsky, L.V. Study of trace element zonation in Vent Chimneys from the Silurian Yaman-Kasy volcanic-hosted massive sulfide deposit (Southern Urals, Russia) using laser ablation-inductively coupled plasma mass spectrometry (LA-ICPMS). *Econ. Geol.* 2009;(104):1111–1141. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.104.8.1111> EDN: OHLIQN

17. Reich M., Kesler S.E., Utsunomiya S., et al. Solubility of gold in arsenian pyrite. *Geochim. et Cosmochim. Acta*. 2005;(69):2781–2796. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2005.01.011>.

18. Keith M., Smith D.J., Jenkin G.R.T., et al. A review of Te and Se systematics in hydrothermal pyrite from precious metal deposits: insights into ore-forming processes. *Ore Geology Reviews*. 2017. <http://dx.doi.org/10.1016/j.oregeorev.2017.07.023>

19. Bajwah Z.U., Seccombe P.K., Offler R. Trace element distribution Co: Ni ratios and genesis of the Big Cadia iron-copper deposit, New South Wales, Australia. *Mineral. Deposita*. 1987;(22):292–300. <https://doi.org/10.1007/BF00204522>.

20. Таусон В.Л., Кравцова Р.Г., Смагунов Н.В. и др. Структурное и поверхностно-связанное золото в пиритах месторождений разных генетических типов. *Геология и геофизика*. 2014;55(2):350–369. <https://doi.org/10.15372/GiG20140021> EDN: SMXAHT

Tauson V.L., Kravtsova R.G., Smagunov N.V., et al. Structurally and superficially bound gold in pyrite from deposits of different genetic types. *Geology and Geophysics*. 2014;55(2): 350–369. (In Russ.) <https://doi.org/10.15372/GiG201400210> EDN: SMXAHT

21. Таусон В.Л., Липко С.В. Растворимость Au в основных минералах-концентраторах благородного металла. *Геология и геофизика*. 2020;61(12):1619–1636. <https://doi.org/10.15372/GiG2020165> EDN: VXJAMM

Tauson V.L., Lipko S.V. Solubility of gold in common gold-concentrating minerals. *Geology and Geophysics*. 2020;61(12): 1619–1636. (In Russ.) <https://doi.org/10.15372/GiG2020165> EDN: VXJAMM

22. Липко С.В., Николаев А.В., Бабкин Д.Н., Таусон В.Л. Аккумуляция примесных элементов при гидротермальной кристаллизации пирита: селективность поверхностных фаз. *Записки Горного института*. 2026;277:146–156. EDN: HPSVWO

Lipko S.V., Nikolaev A.V., Babkin D.N., Tauson V.L. Accumulation of impurity elements underhydrothermal crystallization of pyrite: selectivity of surface phases. *Journal of Mining Institute*. 2026;277:146–156. (In Russ.) EDN: HPSVWO

23. Deditius A.P., Reich M., Kesler S.E., et al. The coupled geochemistry of Au and As in pyrite from hydrothermal ore deposits. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2014;140: 644–670. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2014.05.045>.

Об авторе

ГЕРАСИМОВ Борис Борисович, кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории геологии и минералогии благородных металлов, Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН, <https://orcid.org/0000-0002-5112-536X>, SPIN: 4136-7018, e-mail: bgerasimov@yandex.ru

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

About the author

GERASIMOV, Boris Borisovich, Cand. Sci. (Geol. and Mineral.), Leading Researcher, Laboratory of Geology and Mineralogy of Precious Metals, Diamond and Precious Metal Geology Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, <https://orcid.org/0000-0002-5112-536X>, SPIN: 4136-7018, e-mail: bgerasimov@yandex.ru

Conflict of interest

The author declares no conflict of interest.

Поступила в редакцию / Submitted 02.04.2026

Поступила после рецензирования / Revised 12.05.2026

Принята к публикации / Accepted 21.05.2026