

МИНЕРАЛЫ И ПАРАГЕНЕЗИСЫ МИНЕРАЛОВ

СОДЕРЖАНИЕ Bi, Ag, Se и Sb В ГАЛЕНИТЕ КАК ИНДИКАТОР ЗОНАЛЬНОСТИ ЗОЛОТЫХ ПРОЯВЛЕНИЙ НИЖНЕ-МЯКИТСКОГО РУДНОГО УЗЛА (МАГАДАНСКАЯ ОБЛАСТЬ)

© 2024 г. Д. чл. И. С. Литвиненко*, д. чл. О. Т. Соцкая**

*Северо-Восточный комплексный научно-исследовательский институт
им. Н.А. Шило ДВО РАН, ул. Портовая, 16, Магадан, 685000 Россия*

**e-mail: litvinenko@neisri.ru*

***e-mail: sotskaya@neisri.ru*

Поступила в редакцию: 27.12.2023 г.

После доработки: 29.05.2024 г.

Принята к публикации: 17.06.2024 г.

Представлены результаты изучения галенита Берентальской золоторудной системы типа RIRGD (Reduced Intrusive Related Gold Deposit), связанной с одноименным гранитным штоком в юго-восточной части Яно-Колымского золотоносного пояса. По мере удаления от выхода на поверхность Берентальского интрузивного массива отмечается тенденция смены оруденения висмут-сульфотеллуридного минерального типа апикальной (внутриинтрузивной) зоны сульфидно-сульфоарсенидным проксимальной зоны и далее серебро-полисульфидным дистальной зоны. Галенит в висмут-сульфотеллуридном типе руд характеризуется висмутовой геохимической специализацией из-за микровключений висмутина (Bi_2S_3). В сульфидно-сульфоарсенидном типе, помимо висмута, отмечается присутствие серебра. Оно обусловливается твердым раствором в галените матильдита (AgBiS_2), реже микровключениями акантита (Ag_2S). На отдельных участках в нем присутствует золото (из-за микровключений ютенбогаардтита (Ag_3AuS_2) или самородного золота). Галенит в серебро-полисульфидном минеральном типе оруденения отличается повышенными концентрациями селена (твердый раствор с класталитом PbSe) и (или) сурьмы и серебра (за счет микровключений миаргирита AgSbS_2).

Ключевые слова: Северо-Восток России, золотое оруденение, RIRGD-система, зональность, типы руд, галенит

DOI: 10.31857/S0869605524040026, **EDN:** PDMUMS

ВВЕДЕНИЕ

Золоторудные проявления, сосредоточенные в пределах Нижне-Мякитского (Левое-Мякитского) рудного узла, связаны с Берентальской гранитной интрузией в центральной части Магаданской области (рис. 1).

В советский период большинство отечественных геологов причисляли проявления золота, сопряженные с гранитоидными интрузивами, к золото-редкометалльной формации.

В настоящее время исследователи данный вид объектов относят к золото-порфировому (Фогельман и др., 1995; Сидоров, 2000; и др.), золото-полисульфидно-кварцевому (Константинов и др., 2000), золото-висмутовому (Горячев, Гамянин, 2006) типам.

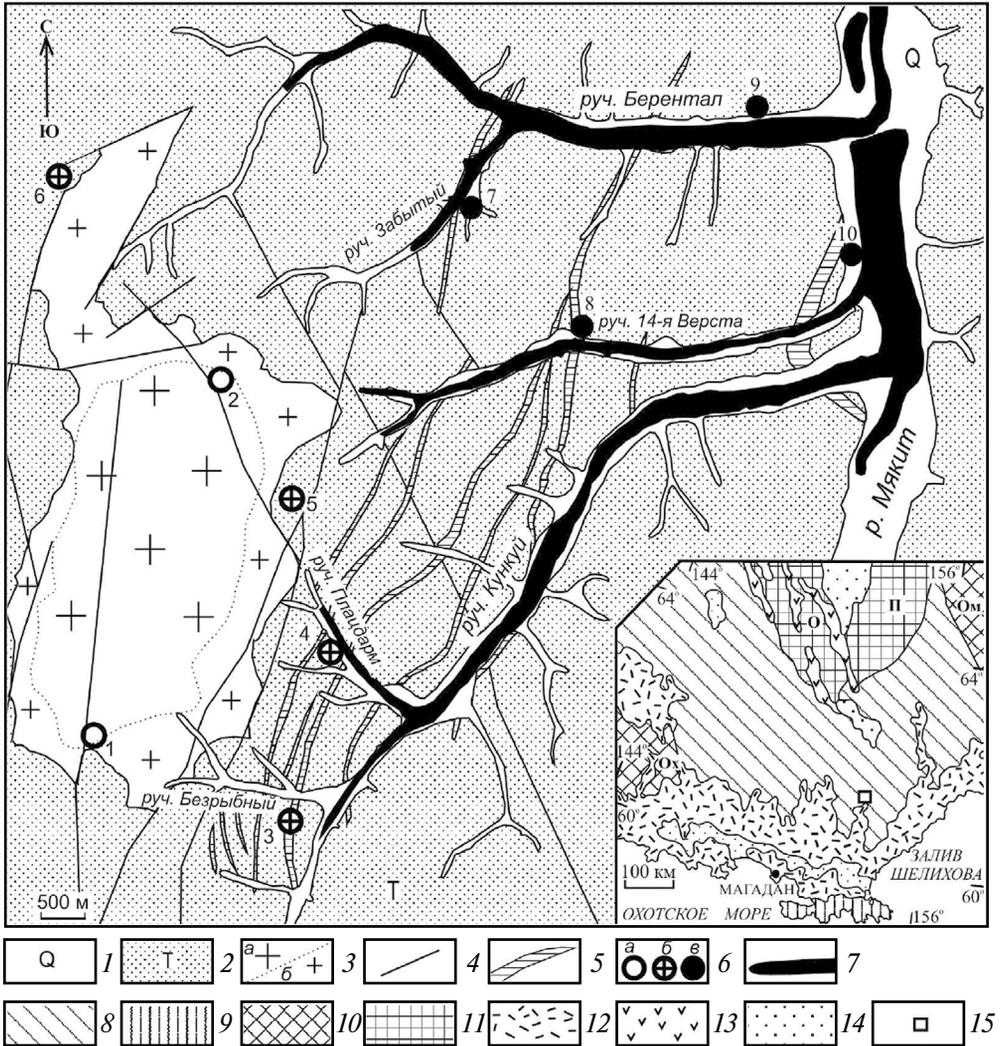


Рис. 1. Геологическая схема Нижне-Мякитского рудного узла. Схема составлена на геологической основе (В. В. Бурзайкин, 1995 г.), с дополнениями и упрощениями.

1 — четвертичные аллювиальные отложения речных долин; 2 — триасовые терригенные и вул-каногенно-терригенные отложения Балыгычанского поднятия Яно-Колымской складчатой системы; 3 — позднеюрско-раннемеловые среднезернистые (а) и мелкозернистые (б) биотитовые граниты Берентальского штока; 4 — разрывные нарушения; 5 — минерализованные зоны дробления с прожилково-жильным окварцеванием и вкрапленно-прожилковой рудной минерализацией; 6 — золоторудные проявления, связанные с Берентальским гранитным интрузивом: а — висмут-сульфотеллуридным (1 — Фронт, 2 — Берентал), б — сульфидно-сульфоарсенидным (3 — Зона Южная, 4 — Плацдарм, 5 — Палатка, 6 — Зона Тревога), в — серебро-полисульфидным (7 — Забытый, 8 — 14-я Верста, 9 — Нижне-Берентальское; 10 — Террасовое) минеральными типами оруденения; 7 — россыпи золота; 8—15 — обозначения геологических структур на врезке: 8, 9 — Верхояно-Чукотская (8) и Корьяско-Камчатская (9) складчатые области; 10 — Охотский (Ох) и Омолонский (Ом) срединные массивы; 11 — Омудевское (О) и Приколымское (П) поднятия; 12, 13 — Охотско-Чукотский (12) и Уяндино-Ясачненский (13) вулканогенные пояса; 14 — наложенные кайнозойские впадины; 15 — местоположение Нижне-Мякитского рудного узла

Fig. 1. Geological diagram of the Nizhne-Myakitsky ore cluster. The diagram is drawn up on a geological basis (V. V. Burzaiкин, 1995 year), with additions and simplifications.

1 — Quaternary alluvial deposits of river valleys; 2 — Triassic terrigenous and volcanic-terri-genous deposits of the Balygychan uplift of the Yana-Kolyma fold system; 3 — Late Jurassic-Early Cretaceous medium-grained (a) and

В англоязычной геологической литературе (Thompson, Newberry, 2000; Lang, Baker, 2001; Hart, 2007; и др.) подобные объекты относят к классу месторождений золота, формирующихся в восстановительной обстановке и связанных с интрузивами, и обозначаются аббревиатурой RIRGD (Reduced Intrusive Related Gold Deposit).

Рудные проявления, связанные с гранитоидами, на Северо-Востоке России с экономической точки зрения долгое время считались неинтересными или с неясными перспективами. Это определило низкую интенсивность поисковых работ на данный вид проявлений и относительно слабую их изученность. Вполне очевидно, что всестороннее изучение новых объектов RIRGD-систем представляет научный интерес и может способствовать совершенствованию методики поисково-оценочных работ на месторождениях данного типа.

Ранее проведенные исследования на рудных проявлениях, связанных с Берентальской гранитной интрузией, касались изучения их минерального состава и типоморфных свойств самородного золота (Горячев, Колесниченко, 1990; Савва и др., 2003; Кузнецов и др., 2011; А. П. Шерстобитов, 2018 г.; Позднякова и др., 2019; Ивасенко и др., 2020; Литвиненко, Шилина, 2020, 2022). Цель настоящей работы — выявление типохимических особенностей галенита в минеральных разностях оруденения Берентальской RIRGD-системы.

Из многочисленных публикаций, содержащих сведения о химическом составе галенита, следует, что он нередко содержит повышенные содержания элементов-примесей, входящих в него как в изоморфной форме, так и в составе субмикроскопических (невидимых под оптическим микроскопом) минеральных микровключений. Качественный состав и уровень концентрации примесей могут широко варьировать как в зависимости от типа оруденения, так и в пределах рудного тела одного месторождения. Таким образом, примесный состав галенита может использоваться как дополнительный критерий при определении условий образования оруденения и как важный элемент прогнозной оценки его пространственного распространения. Отправным моментом для проведения работы по детальному изучению типохимических особенностей галенита в золоторудных проявлениях Нижне-Мякитского рудного узла послужил факт выявления в зернах галенита повышенных концентраций серебра, висмута и селена.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Состав галенита изучен в шести протолочных пробах, отобранных в ходе полевых работ 2008—2012 гг. из оруденелых зон тектонической проработки на рудных проявлениях Берентал, Забытый, 14-я Верста, Нижне-Берентальское и Террасовое (рис. 1). Кроме того, две протолочные пробы из рудопоявления Плацдарм и одна из рудопоявления Берентал любезно предоставлены геологической службой ООО «Золоторудная корпорация». Протолочные пробы обогащались на лотке. Из полученных концентратов зерна исследуемых рудных минералов извлекались под биноклем. В дальнейшем

←—————
fine-grained (6) biotite granites of the Berental stock; 4 — discontinuities; 5 — mineralized crushing zones with veinlet-vein silicification and disseminated-veinlet ore mineralization; 6 — gold ore manifestations associated with the Berental granite intrusion: a — with bismuth-sulfotelluride (1 — Front, 2 — Berental), b — sulfide-sulfoarsenide (3 — Zone Yuzhnaya, 4 — Platzdarm, 4 — Palatkat, 6 — Zone Trevoga), в — silver-polysulfide (7 — Zabytyy, 8 — 14th Versta, 9 — Nizhne-Berentalskoe; 10 — Terrasovoe) mineral types of mineralization; 7 — gold placers; 8—15 — designations of geological structures in the inset: 8, 9 — Verkhoysansk-Chukotka (8) and Koryak-Kamchatka (9) folded areas; 10 — Okhotsk (Okh) and Omolon (Om) middle massifs; 11 — Omulevskoe (O) and Prikolymyskoe (P) uplifts; 12, 13 — Okhotsk-Chukotka (12) and Uyandino-Yasachnensky (13) volcanogenic belts; 14 — superimposed Cenozoic depressions; 15 — location of the Nizhne-Myakitsky ore cluster

они направлялись на изготовление монтированных аншлифов (приполированных пашек из эпоксидной смолы с зернами исследуемых минералов).

Химический состав галенита и ассоциирующих с ним рудных минералов изучался в монтированных аншлифах на микроанализаторе Camebax № 304 с использованием ЭДС-детектора Xmax-50 фирмы Oxford Instruments, программное обеспечение AZtec, режим Point ID (Северо-Восточный центр коллективного пользования СВКНИИ ДВО РАН, г. Магадан, аналитик О. Т. Соцкая). Условия проведения измерений: ускоряющее напряжение — 20 кВ, увеличение 200—2000 \times . Время накопления спектров — 30 секунд. Оптимизация для количественных вычислений проводилась по химически чистой меди каждые 1.5—2 часа. В качестве стандартов использовались аттестованные природные и синтетические материалы. Аналитические линии: *K-серия* для S, Fe, Cu и As; *L-серия* для Bi, Cd, Se, Te, Sb и Ag; *M-серия* для Pb и Au. Эталоны: FeS₂ для Fe и S, CuFeS₂ для Cu, FeAsS для As, Bi₂S₃ для Bi, PbS для Pb, Sb₂S₃ для Sb, Au₈₀Ag₂₀ для Au и Ag, а также химически чистые Se и Cd. Предел обнаружения элементов составляет 0.3 мас. %, диаметр электронного луча 3—4 мкм. Корректность проводимых анализов периодически проверялась на галенитовом стандарте.

Всего в ходе выполненных исследований в монтированных аншлифах изучен состав 53 зерен галенита (566 анализов) и 10 зерен ассоциирующих с ним рудных минералов (53 анализа).

ГЕОЛОГО-СТРУКТУРНАЯ ПОЗИЦИЯ И РУДНАЯ МИНЕРАЛИЗАЦИЯ ЗОЛОТЫХ ПРОЯВЛЕНИЙ НИЖНЕ-МЯКИТСКОГО РУДНОГО УЗЛА

Нижне-Мякитский рудный узел находится в северо-западной части Хурчано-Мякитской золотоносной зоны на юго-восточном фланге Яно-Колымского золотоносного пояса. В тектоническом отношении узел расположен в зоне юго-восточного замыкания Яно-Колымской складчатой системы Верхояно-Чукотской складчатой области вблизи ее границы с Охотско-Чукотским вулканогенным поясом (рис. 1) на участке пересечения зон Умарского и Хурчан-Оротуканского глубинных разломов.

Рудные проявления узла приурочены к Берентальской интрузивно-купольной структуре. В ее центральной части располагается одноименный шток, сложенный лейкократовыми гранитами. По последним данным (Зименко и др., 2018), они относятся к гранитам S-типа коллизионной природы и включены в позднеюрско-раннемеловой гранитный плутонический Каньонский комплекс. На крыльях структуры развиты раннетриасовые отложения, представленные глинистыми и песчано-глинистыми сланцами, алевролитами и аргиллитами с маломощными горизонтами песчаников. В приконтактной зоне по ним развиты кордиерит-андалузитовые, андалузит-кордиерит-кварцевые (пятнистые) и кварц-хлорит-серицитовые (серые) роговики (А. П. Шерстобитов, 2018 г.). Участками они интенсивно сульфидизированы.

Изучение минерального состава рудных проявлений и россыпных месторождений Нижне-Мякитского рудного узла (Литвиненко, Шилина, 2020, 2022; и др.) показало, что золоторудная система, сопряженная с Берентальским гранитным массивом, представлена висмут-сульфотеллуридным, сульфидно-сульфоарсенидным и серебро-полисульфидным минеральными типами золотого оруденения. Латеральная зональность распределения минеральных типов руд отражает пространственно-временную последовательность развития оруденения от висмут-сульфотеллуридного типа апикальной (внутриинтрузивной) зоны к сульфидно-сульфоарсенидному проксимальной зоны и далее серебро-полисульфидному дистальной зоны. Это хорошо согласуется с установленной на золоторудных месторождениях Аляски зональностью рудных систем, связанных с интрузивами гранитоидов (Hart, 2007). По модели RIRGD-систем К. Дж. Р. Харта (Hart, 2007) установленные минеральные разновидности оруденения

отвечают зонам соответственно с Au-Bi-Te, As-Au и Ag-Pb-Zn типом минерализации их центральной, средней и периферийной частей.

Выявленные потенциальные рудные тела представляют собой зоны смятия и дробления в осадочных и магматических породах, сопровождающиеся прожилково-жильным окварцеванием. Местами в них отмечаются участки развития тонкой вкрапленности сульфидов, системы сульфидно-кварцевых прожилков, гнезд и прожилков сульфидов. Особенности рудной минерализации в минеральных типах оруденения отражены в табл. 1.

Таблица 1. Состав рудной минерализации Берентальской RIRGD-системы

Table 1. Composition of ore mineralization of the Berental RIRGD-system

Минерал	Минеральный тип оруденения		
	Висмут-сульфо-теллуридный	Сульфидно-сульфоарсенидный	Серебро-полисульфидный
Пирит	■	■	■
Арсенопирит	■	■	■
Леллингит	■	■	Н.о.
Сфалерит	■	■	■
Галенит	■	■	■
Пирротин	■	■	■
Халькопирит	■	■	■
Самородный висмут	■	■	■
Висмутин	■	■	----
Теллуриды висмута	■	■	----
Галеновисмутит	■	----	Н.о.
Сульфотеллуриды висмута	■	Н.о.	Н.о.
Мальдонит	■	Н.о.	Н.о.
Кобеллит	■	Н.о.	Н.о.
Самородное золото (900–1000 ‰)	■	Н.о.	Н.о.
Самородное золото (800–900 ‰)	----	----	Н.о.
Самородное золото (700–800 ‰)	Н.о.	■	----
Самородное золото (400–700 ‰)	Н.о.	----	■
Молибденит	----	Н.о.	Н.о.
Вольфрамит	----	Н.о.	Н.о.
Антимонит	----	■	----
Шеелит	Н.о.	----	Н.о.
Сульфотеллуриды серебра	Н.о.	■	■
Висмутовые сульфосоли свинца и серебра	Н.о.	■	■
Пираргирит	Н.о.	----	■
Сульфоарсениды серебра	Н.о.	----	■
Акантит	Н.о.	----	■
Ютенбогардтит	Н.о.	----	■
Стефанит	Н.о.	----	■
Самородное серебро	Н.о.	Н.о.	■
Марказит	Н.о.	Н.о.	■
Иорданит	Н.о.	----	----
Зоубекит	Н.о.	Н.о.	----
Миаргирит	Н.о.	Н.о.	----

■ Главные ■ Второстепенные ■ Редкие ---- Очень редкие

Примечание. Н.о. — минерал не обнаружен. Таблица составлена с использованием материалов В. М. Кузнецова и др. (2011), Р. Н. Ивасенко и др. (2020), А. П. Шерстобитова (2018). Минералы перечислены в порядке от главных к второстепенным.

Галенит присутствует во всех минеральных типах оруденения. Наибольшим распространением он пользуется в рудах серебро-полисульфидного минерального типа.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Галенит висмут-сульфотеллуридного минерального типа оруденения

Исследовано 35 образцов (зерен) галенита на участке развития висмут-сульфотеллуридного минерального типа оруденения рудопроявления Берентал. В сростках с галенитом установлены пирит, арсенопирит и халькопирит. Микрорентгеноспектральный анализ показал присутствие в галените висмута. В целом наличие висмута выявлено в 57 % исследованных зерен. Распределение его в зернах носит дискретный характер (в 1—2 анализах из 4—11 на зерно), содержания в точках опробования не превышают 1.5 мас. %.

Дискретный характер распределения висмута в зернах галенита указывает на то, что, вероятнее всего, его присутствие в галените обусловлено субмикроскопическими включениями висмутовых минералов. Согласно имеющимся данным о минеральном составе руд висмут-сульфотеллуридного типа (см. табл. 1), это может быть либо самородный висмут, либо висмутин. Положительная корреляционная связь между висмутом и серой (коэффициент корреляции равен 0.5) позволяет предполагать сульфидную форму микровключений. Об этом же свидетельствует и систематически наблюдаемое возрастание содержания серы в анализах галенита с наличием висмута (табл. 2). Вероятнее всего, оно определяется микровключениями в галените висмутин (теоретическое содержание серы в нем составляет 18.7 мас. % против 13.4 мас. % в галените).

Таблица 2. Средний химический состав галенита (мас. %) в рудах висмут-сульфотеллуридного минерального типа

Table 2. Average chemical composition of galena (wt %) in ores of the bismuth-sulfotelluride mineral type

Элемент	Аншлиф 176		Аншлиф 177		Аншлиф 198	
	Зерна без примеси Bi	Зерна с примесью Bi	Зерна без примеси Bi	Зерна с примесью Bi	Зерна без примеси Bi	Зерна с примесью Bi
S	12.9	13.6	12.8	13.4	12.9	13.5
Pb	87.1	85.4	87.2	85.8	87.1	85.9
Bi	—	1.0	—	0.8	—	0.6
Количество анализов, шт.	78	9	35	6	61	17

Примечание. Содержания элементов пересчитаны на сумму 100 %. Прочерк — элемент не обнаружен.

Присутствие в галените примеси висмута за счет микровключений сульфовисмутитов свинца, вследствие их очень ограниченного распространения, представляется маловероятным. На это указывает и отрицательная корреляционная связь между висмутом и свинцом (коэффициент корреляции равен -0.9). Кроме того, сульфовисмутиты свинца могут образовывать с галенитом твердый раствор (Онтоев и др., 1960; Simanenko, 2007; и др.).

Галенит сульфидно-сульфоарсенидного минерального типа оруденения

Галенит в сульфидно-сульфоарсенидном минеральном типе руд исследован на рудопроявлении Плацдарм в экзоконтактной зоне Берентальского интрузива. В сростках с галенитом выявлены пирит, арсенопирит, халькопирит, самородное золото, ютенбогаардит и акантит.

По данным микрорентгеноспектрального анализа на одном из участков в большом количестве исследованных зерен галенита отмечается дискретная примесь висмута, характерная для галенита апикальной (внутриинтрузивной) зоны с висмут-сульфотеллуридным типом оруденения (табл. 3, зерна 170-1-170-20). Содержания его не превышают 2.8 мас. % (табл. 3). Положительная корреляционная связь висмута с серой (коэффициент корреляции до 0.56) может указывать на сульфидную (висмутин) форму его нахождения в микровключениях.

Таблица 3. Химический состав галенита (мас.%) сульфидно-сульфоарсенидного минерального типа оруденения

Table 3. The chemical composition of the galena (wt %) of the sulfide-sulfoarsenide type of mineralization

Номер зерна	Количество анализов, шт.	Элемент					
		Pb	S	Se	Bi	Ag	Au
170-1	6	<u>86.4—87.5</u>	<u>12.3—12.9</u>	<u>0.0—0.7</u>	<u>0.0—0.6</u>	—	—
		86.8	12.6	0.5 (83)	0.1(17)		
170-12	3	<u>86.7—86.8</u>	<u>12.4—12.8</u>	<u>0.0—0.7</u>	<u>0.0—0.5</u>	—	—
		86.8	12.6	0.4 (67)	0.2 (33)		
170-16	63	<u>83.2—87.5</u>	<u>12.2—14.3</u>	<u>0.0—0.8</u>	<u>0.0—2.8</u>	—	<u>0.0—3.5</u>
		85.7	13.1	0.5 (89)	0.5 (51)		0.1 (9)
170-20	23	<u>78.8—87.4</u>	<u>12.0—13.7</u>	<u>0.0—0.8</u>	<u>0.0—1.0</u>	<u>0.0—4.1</u>	<u>0.0—3.8</u>
		86.1	12,8	0.5 (83)	0.2 (30)	0.2 (4)	0.2 (4)
171-1	7	<u>69.7—79.0</u>	<u>12.5—13.9</u>	—	<u>2.6—6.0</u>	<u>3.0—6.4</u>	<u>1.2—6.0</u>
		75.5	13.1		4.8 (100)	4.0 (100)	2.6 (100)
171-12	3	<u>81.9—86.8</u>	<u>13.1—13.4</u>	—	<u>0.0—2.3</u>	<u>0.0—2.9</u>	—
		83.6	13.2		1.4 (67)	1.8 (67)	
171-19	24	<u>68.0—75.3</u>	<u>11.9—14.2</u>	—	<u>5.6—9.5</u>	<u>4.7—10.5</u>	<u>0.0—5.0</u>
		72.1	13.3		7.7 (100)	5.9 (100)	1.0 (58)

Примечание. Содержания элементов пересчитаны на сумму 100%. Над чертой — пределы колебаний, под чертой жирным шрифтом — среднее. В скобках — доля анализов, в которых присутствует данный примесный элемент. Прочерк — элемент не обнаружен.

На этом же участке в зернах галенита отмечена примесь селена, содержание которого не превышает 0.8 мас. % (табл. 3). Близкий к постоянному характер ее проявления позволяет предполагать, что она обусловлена твердым раствором в галените клаусталита (1.55—1.94 мол. %). Существование природного ряда твердых растворов этих минералов выявлено Р. Г. Коулманом (Coleman, 1959). Его промежуточные члены описаны на ряде объектов (Czamanske, Hall, 1976; Юшкин, Павлов, 1983; и др.).

На другом участке в галените в качестве постоянной примеси отмечаются одновременно висмут и серебро. Содержания их достигают 10.0 мас. % (табл. 3, зерно 171—19). Они присутствуют в эквивалентных количествах, отвечающих соотношению этих элементов в матильдите. В пересчетах проведенных анализов на матильдит в одном из анализов (S — 49.99, Ag — 5.57, Bi — 4.56, Pb — 39.88 ат. %) получена наиболее близкая к теоретической его формула — $Ag_{1.10}Bi_{0.90}S_{2.00}$ (к. ф. рассчитаны на 4 атома).

Матильдитовый тип является наиболее распространенным типом природных твердых растворов галенита (Онтоев и др., 1960; Van Hook, 1960; Wernick, 1960; Craig, 1967; Foord, Shawe, 1989; Dobrev, 2002; и др.). Экспериментальные исследования системы

Pb–Ag–Bi–S показали, что одновременно значительные концентрации висмута и серебра в галените обусловлены твердым раствором в нем кубической модификации матильдита $\alpha\text{-AgBiS}_2$ (Van Hook, 1960; Wernick, 1960). По представлениям Л. Ф. Симаненко (Simanenko, 2007) в данном случае имеет место гетеровалентный изоморфизм по схеме $2\text{Pb}^{2+} \leftarrow \text{Ag}^+ + \text{Bi}^{3+}$.

Иногда в зернах галенита спорадически отмечаются повышенные концентрации золота и серебра, а также отдельно серебра и золота (табл. 3). О возможных формах вхождения золота в галенит нет данных. Что касается самостоятельных повышенных содержаний в нем серебра, то исследования галенита из многих месторождений мира показали, что его сереброносность связана с минеральными включениями серебряных и серебросодержащих минералов в матрице галенита (Свешникова, 2004; Simanenko, 2007; и др.). Наличие сростков исследованных образцов галенита с ютенбогаардитом, акантитом и самородным золотом, позволяют предполагать, что совместные повышенные концентрации серебра и золота в галените обусловлены микровключениями ютенбогаардита или самородного золота, а отдельные — акантита и самородного золота.

Галенит серебро-полисульфидного минерального типа оруденения

Галенит в серебро-полисульфидном минеральном типе оруденения изучен в рудных проявлениях Забытый, 14-я Верста, Нижне-Берентальское и Террасовое. В сростках с галенитом выявлены акантит и очень редкий минерал зоубекит с усредненной кристаллохимической формулой по 11 микрозондовым анализам $\text{Ag}_{1.05}\text{Pb}_{4.10}\text{Sb}_{3.87}\text{S}_{9.98}$ (к. ф. рассчитаны на 19 атомов).

Характерной типохимической особенностью галенита в серебро-полисульфидном типе руд является наличие в нем повышенных концентраций селена (табл. 4). Их постоянное присутствие позволяет предполагать, что они обусловлены твердым раствором в галените клаусталита (9.97—25.0 мол. %).

На отдельных участках галенит характеризуется повышенными содержаниями серебра и сурьмы (до 15.5 и 14.4 мас. % соответственно). Дискретный характер их проявления свидетельствует о том, что они связаны с микровключениями серебряно-сурьмяных минералов. Положительные значения (от 0.8 до 1.0) коэффициента корреляции между серебром, сурьмой и серой и отрицательные (от –0.9 до –1.0) между этими элементами и свинцом указывают на то, что повышенные концентрации серебра и сурьмы в галените обусловлены микровключениями серебряно-сурьмяного сульфида, а не более сложных (со свинцом) образований.

Сводные расчеты состава предполагаемого в микровключениях в галените серебряно-сурьмяного сульфида на различных рудных проявлениях показали близкие результаты, указывающие на его принадлежность к миаргириту. В пересчетах полученных анализов на миаргирит наиболее близка к теоретической его кристаллохимическая формула $\text{Ag}_{1.08}\text{Sb}_{1.00}\text{S}_{1.92}$ (анализ: S — 49.09, Ag — 11.52, Sb — 10.64, Pb — 28.76 ат.%; к. ф. рассчитаны на 4 атома). В большинстве случаев он характеризуется несколько повышенным содержанием серебра. Его расчетная сводная кристаллохимическая формула $\text{Ag}_{1.17}\text{Sb}_{1.02}\text{S}_{1.81}$ (к. ф. рассчитаны на 4 атома).

В обеих охарактеризованных геохимических разновидностях галенита, как и в галените висмут-сульфотеллуридного и сульфидно-сульфоарсенидного минеральных типов руд, спорадически отмечаются невысокие концентрации висмута (табл. 4). Положительная корреляционная связь висмута с серой (коэффициент корреляции равен 0.5—0.7) позволяет предполагать, что, как и в галените висмут-сульфотеллуридного и сульфидно-арсенидного типов оруденения, они обусловлены микровключениями висмутина.

Таблица 4. Химический состав галенита (мас. %) серебро-полисульфидного минерального типа оруденения**Table 4.** The chemical composition of the galena (wt %) of the silver-polysulfide type of mineralization

Рудное проявление	Номер зерна	Количество анализов, шт	Элемент					
			Pb	S	Se	Bi	Ag	Sb
14-я Верста	139-24	17	<u>85.2–86.3</u> 85.7	<u>10.4–11.6</u> 11.0	<u>2.6–3.6</u> 3.2 (100)	–	–	–
	139-25	23	<u>82.0–84.9</u> 83.7	<u>7.8–10.3</u> 9.2	<u>6.6–7.3</u> 6.9 (100)	<u>0.00–1.8</u> 0.2 (22)	–	–
	181-10	11	<u>85.1–86.1</u> 85.8	<u>10.4–11.8</u> 11.1	<u>2.8–3.4</u> 3.1 (100)	–	–	–
Террасовое	143-17	24	<u>83.6–86.4</u> 85.3	<u>10.8–12.5</u> 11.6	<u>2.5–3.0</u> 2.8 (100)	<u>0.0–1.1</u> 0.3 (33)	–	–
	143-18	17	<u>84.1–86.2</u> 85.4	<u>10.9–12.6</u> 11.6	<u>2.4–3.0</u> 2.7 (100)	<u>0.0–1.0</u> 0.3 (41)	–	–
	143-20	24	<u>83.7–85.9</u> 85.0	<u>10.1–11.6</u> 10.8	<u>3.7–4.2</u> 4.0 (100)	<u>0.0–1.7</u> 0.2 (21)	–	–
Нижне-Берентальское	143-33	26	<u>54.6–87.5</u> 82.5	<u>12.8–15.9</u> 13.5	–	<u>0.0–1.0</u> 0.1 (23)	<u>0.0–15.5</u> 2.0 (15)	<u>0.0–14.4</u> 1.9 (15)
Забывтый	181-15	33	<u>58.3–87.5</u> 83.8	<u>12.5–15.6</u> 13.3	–	–	<u>0.0–13.0</u> 1.4 (18)	<u>0.0–13.8</u> 1.5 (18)

Примечание. Содержания элементов пересчитаны на сумму 100 %. Над чертой — предел колебаний, под чертой жирным шрифтом — среднее содержание. В скобках — доля анализов, в которых присутствует данный примесный элемент. Прочерк — элемент не обнаружен.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В Нижне-Мякитском рудном узле развитие в золоторудной системе, связанной с Берентальской гранитной интрузией, различных минеральных типов оруденения определило своеобразие геохимической специализации распространенного в них галенита. К типоморфным примесям в галените можно отнести висмут, серебро, селен и сурьму.

В галените висмут-сульфотеллуридного типа оруденения ведущую положительную индикаторную роль играет висмут. Его присутствие обусловлено микровключениями висмутита. В сульфидно-сульфоарсенидном типе руд в образованиях галенита, помимо висмута, появляются селен (твердый раствор клаусталита в галените), серебро и золото (за счет твердого раствора в галените матильдита, микровключений ютенбогаардтита, акантита и самородного золота). Галенит серебро-полисульфидного минерального типа характеризуется повышенными концентрациями селена (твердый раствор клаусталита в галените), серебра и сурьмы (из-за микровключений миаргирита).

Таким образом, так же как для самородного золота (Литвиненко, Шилина, 2022), в Берентальской RIRGD-системе галениту свойственна латеральная зональность его геохимической специализации. В целом, при переходе от висмут-сульфотеллуридного через сульфидно-сульфоарсенидный к серебро-полисульфидному типу оруденения, то есть по мере удаления от выхода на поверхность Берентальского

рудогенерирующего интрузивного массива, отмечается тенденция уменьшения висмутистости и возрастания серебристости, селенистости и сурьмянистости галенита в рудах. Формирование всех типов золотого оруденения Нижне-Мякитского рудного узла в RIRGD-системе подчеркивается сквозным характером распространения в галените примеси висмута.

Примесный состав галенита может использоваться как дополнительный критерий при характеристике зональности развития оруденения, связанного с гранитными интрузиями, и как важный элемент прогнозной оценки латерального распространения различных минеральных типов оруденения на конкретных рудных месторождениях и узлах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Горячев Н.А., Гамянин Г.Н. Золото-висмутовые (золото-редкометалльные) месторождения Северо-Востока России: типы и перспективы промышленного освоения / Золоторудные месторождения Востока России: Труды III Всерос. симпозиума «Золото Сибири и Дальнего Востока: геология, геохимия, технология, экономика, экология» (Улан-Удэ, 21–25 сент. 2004 г.). Магадан: СВНЦ ДВО РАН, **2006**. С. 50–61.

Горячев Н.А., Колесниченко П.П. Граниты и грейзены Мякитского интрузива как пример локальной рудно-магматической системы / Рудно-магматические системы Северо-Востока СССР: сб. науч. тр. / под ред. Н.А. Шилов, В.И. Гончарова. Хабаровск: Хабар. политехн. ин-т, **1990**. С. 41–53.

Зименко М.И., Карелин Ю.П., Зименко Е.А., Жигулина А.С., Воронаев В.С. Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1:200000: изд.2-е. Сер. Сугойская. Лист Р-56-XXI (Мякит). Объяснительная записка. Санкт-Петербург: Картограф. фабрика ВСЕГЕИ, **2018**. 192 с.

Ивасенко Р.Н., Попов Ю.В., Фомина М.И., Михалицына Т.И., Скильская Е.Д. Минеральные ассоциации золоторудных проявлений Берентальского рудного поля (Северо-Восток России) // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. **2020**. № 1. С. 53–61.

Константинов М.М., Некрасов Н.М., Сидоров А.А., Стружков С.Ф. Золоторудные гиганты России и мира. Москва: Научный мир, **2000**. 272 с.

Кузнецов В.М., Горячев Н.А., Жигалов С.В., Савва Н.Е. Структура и рудоносность Мякит-Хурчанского рудно-россыпного узла // Вестник СВНЦ ДВО РАН. **2011**. № 4. С. 37–51.

Литвиненко И.С., Шилина Л.А. Реконструкция коренных источников россыпных месторождений Нижне-Мякитского рудно-россыпного узла (Северо-Восток России) на основе изучения типоморфных признаков россыпного золота // Вестник СВНЦ ДВО РАН. **2020**. № 1. С. 30–46.

Литвиненко И.С., Шилина Л.А. Геохимические особенности самородного золота Нижне-Мякитского рудно-россыпного узла (Северо-Восток России) // Вестник ДВО РАН. **2022**. № 1. С. 21–33.

Онтюев Д.О., Ниссенбаум П.Н., Органова Н.И. Природа высоких содержаний висмута и серебра в галенитах Букуинского месторождения и некоторые вопросы изоморфизма в системе $PbS-Ag_2S-Bi_2S_3$ // Геохимия. **1960**. № 5. С. 414–426.

Позднякова Н.Н., Ивасенко Р.Н., Роднов Ю.Н., Попов Ю.В. Типоморфизм самородного золота рудопроявлений Берентальского рудного поля, Магаданская область // Руды и металлы. **2019**. № 3. С. 61–70.

Савва Н.Е., Парфенов М.И., Комина В.И. Генетическая природа бимодального распределения пробыности шлихового золота россыпи руч. Плацдарм (южные отроги Мякитского интрузива) / Геодинамика, магматизм и минерагения континентальных окраин Севера Пацифики: в 3-х т.: Материалы Всерос. совещ., посвящ. 90-летию акад. Н.А. Шилов (XII годичное собрание Сев.-Вост. отделения ВМО). Магадан, 3–6 июня 2003 г. Магадан: СВКНИИ ДВО РАН, **2003**. Т. 3. С. 132–135.

Свешникова О.Л. О формах вхождения серебра в галенит некоторых свинцово-цинковых месторождений Дальнегорского района Приморья // Новые данные о минералах. 2004. Вып. 39. С. 110—116.

Сидоров А.А. Золото-порфировые месторождения Северо-Востока России / Золотое ору-денение и гранитоидный магматизм Северной Пацифики: в 2 т. Т. 2. Рудная минерализация и петрогенезис: труды Всерос. совещ. Магадан, 4—6 сент. 1997 г. Магадан: СВКНИИ ДВО РАН, 2000. С. 106—109.

Фогельман Н.А., Константинов М.М., Курбанов Н.К. Принципы систематики золоторудных месторождений для прогноза и поисков // Отечественная геология. 1995. № 3. С. 31—41.

Юшкин Н.П., Павлов Л.Г. Изоморфный ряд галенит-клаусталит: первая находка промежуточных членов на Новой Земле / Минералы и минеральные комплексы Европейского Северо-Востока СССР: Труды Института геологии Коми филиала Академии наук СССР. Сыктывкар: Институт геологии Коми филиала АН СССР, 1983. Вып. 40. С. 38—44.

Content OF Bi, Ag, Se and Sb in Galenite as an Indicator of Zonality of Gold Manifestations of the Nizhne-Myakitsky Ore Cluster (Magadan Region)

I. S. Litvinenko * and O. T. Sotskaya **

*North-East Interdisciplinary Scientific Research Institute n. a. N.A. Shilo,
Far East Branch RAS, Magadan, Russia*

**e-mail: litvinenko@neisri.ru*

***e-mail: sotskaya@neisri.ru*

Results of the study of galena from the Berental gold ore system of the RIRGD (Reduced Intrusive Related Gold Deposit) type, associated with the granite stock in the southeastern part of the Yana-Kolyma gold belt, are presented. There is a tendency to change from (1) the mineralization of the bismuth-sulfotelluride type of the apical (intra-intrusive) zone to (2) the mineralization of the sulfide-sulfoarsenide type of the proximal zone and (3) the mineralization of the silver-polysulfide type of the distal zone as one moves away from the Berental intrusive massif outcrop. Galena in the bismuth-sulfotelluride type of ores is characterized by its bismuth geochemical specialization due to bismuthine (Bi_2S_3) microinclusions. In the sulfide-sulfoarsenide type, in addition to bismuth, the presence of silver is noted. It is caused by a solid solution in galena of matildite (AgBiS_2), less often by microinclusions of acanthite (Ag_2S). In some areas it contains gold (due to microinclusions of uyttenbogaardite (Ag_3AuS_2) or native gold). Galena in the silver-polysulfide mineral type of mineralization is characterized by increased concentrations of selenium (solid solution with clausthalite (PbSe)) and (or) antimony and silver (due to miargyrite (AgSbS_2) microinclusions).

Keywords: North-East of Russia, gold mineralization, RIRGD system, zoning, ore types, galena

REFERENCES

Goryachev N.A., Gamyarin G.N. Au-Bismuth (Au-Rare-Metal) Deposits of Russian North-East: Mineral Types and Industrial Prospects. In: *Gold Lodes of East Russia, Proc. of the 3rd Symposium "Gold Reserves of Siberia and Far East: Geology, Geochemistry, Technologies, Economics and Ecology"* (Ulan-Ude, September 21—25, 2004). Magadan: NESCFEB RAS, 2006. P. 50—61 (in Russian).

Goryachev N.A., Kolesnichenko P.P. Granites and Greisens of the Myakit Intrusion as an Example of a Local Ore-Magmatic System. In: *Ore-Magmatic Systems of the North-East USSR* / Eds. by Shilo N.A., Goncharov V.I. Khabarovsk: Khabar. Polytechn. Inst. Publ., 1990. P. 41—53 (in Russian).

Coleman R.G. The natural occurrence of galena — clausthalite solid solution series. *Amer. Miner.* **1959**. Vol. 44. N 1-2. P. 166—175.

Craig J.R. Phase relations and mineral assemblages in the Ag-Bi-Pb-S system. *Miner. Deposita*. **1967**. Vol. 1. N 4. P. 278—306.

Czamanske G.K., Hall W.E. The Ag-Bi-Pb-Sb-S-Se-Te mineralogy of the Darwin lead-silver-zinc deposit, southern California. *Econ. Geol.* **1976**. Vol. 70. P. 1092—1110.

Dobrev S. Peculiarities of Pb-Zn mineralisation in deposits from Yugovo ore field. *Annual of the University of Mining and Geology "St. Ivan Rilski"*. *Geology*. **2002**. Vol. 45. N 1. P. 65—69.

Foord E.E., Shawe D.R. The Pb-Bi-Ag-Cu (Hg) chemistry of galena and some associated sulfosalts: a review and some new data from Colorado, California and Pennsylvania. *Canad. Miner.* **1989**. N 27. P. 363—382.

Hart C.J.R. Reduced Intrusion-Related Gold Systems. In: *Mineral Deposits of Canada: A Synthesis of Major Deposit Types, District Metallogeny, the Evolution of Geological Provinces, and Exploration Methods*. Ed. by Goodfellow W.D. Geol. Assoc. of Canada, Mineral Deposits Division, Special Publication, **2007**. N 5. P. 95—112.

Ivasenko R.N., Popov Yu.V., Fomina M.I., Mikhailitsyna T.I., Skilskaya E.D. Mineral Associations of Gold-Ore Occurrences, Berental Ore Cluster (North-East of Russia). *Bull. Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Nat. Sci.* **2020**. N 1. P. 53—61 (in Russian).

Konstantinov M.M., Nekrasov E.M., Sidorov A.A., Strujkov S.F. Gold Giants of Russia and World. Moscow: Nauchniy mir, **2000**. 272 p. (in Russian).

Kuznetsov V.M., Goryachev N.A., Zhigalov S.V., Savva N.E. Structural Setting and Ore Minerals of the Myakit-Khurchan Mineral District. *Bull. NESCFEB RAS*. **2011**. N 4. P. 37—51 (in Russian).

Lang J.R., Baker T. Intrusion-Related Gold Systems: the Present Level of Understanding. *Miner. Deposita*. **2001**. N 6. P. 477—489.

Litvinenko I.S., Shilina L.A. Reconstruction of Placer Hard Rock Sources in the Lower Myakit Ore-Placer Knot (Russia's North-East) Based on Studies of Native Gold. *Bull. NESCFEB RAS*. **2020**. N 1. P. 30—46 (in Russian).

Litvinenko I.S., Shilina L.A. Geochemical features of native gold of the Nizhne-Myakitsky ore-placer cluster (North-East of Russia). *Bull. Far Eastern Branch of RAS*. **2022**. N 1. P. 21—33 (in Russian).

Ontoev D.O., Nissenbaum P.N., Organova N.I. Origin of the High Bismuth and Silver Contents in Galena from the Bukukin Deposit and Some Problems of Isomorphism in the RbS—Ag₂S—Bi₂S₃ System. *Geochemistry*. **1960**. N 5. P. 414—426 (in Russian).

Pozdnyakova N.N., Ivasenko R.N., Rodnov Yu.N., Popov Yu.V. Native Gold Typomorphism at Berental-skoie Ore Field Mineral Occurrences, Magadan Region. *Ores and Metals*. **2019**. N 3. P. 61—70 (in Russian).

Savva N.E., Parfyonov M.I., Komina V.I. Genetic Character of Gold Fineness Bimodal Distribution in Heavy Concentrations from Platsdarm Creek Placer (Southern Spurs of Myakitsky Intrusion). In: *Geodynamics, Magmatism and Mineralogy of Continental Edges of the Northern Pacific; Acad. N.A. Shilo Conference Proc. in 3 Volumes. Magadan, June 3—6, 2003*. Magadan: NEISRI FEB RAS, **2003**. Vol. 3. P. 132—135 (in Russian).

Sidorov A.A. Gold-porphyry Deposits of the North-East of Russia. In: *Gold Mineralization and Granitoid Magmatism of the North Pacific: 2 vols. Vol. 2. Ore Mineralization and Petrogenesis; Proc. of the All-Russian Meeting. Magadan, September 4—6, 1997*. Magadan: NEISRI FEB RAS, **2000**. P. 106—109 (in Russian).

Simanenko L.F. Modes of trace element occurrence in galena from the Partizansky base metal-skarn deposit, Primorye. *Russian J. Pacific Geol.* **2007**. Vol. 1. N 2. P. 144—152.

Sveshnikova O.L. On the modes of silver occurrence in galena from some Pb—Zn Deposits of the Dal'negorsk region in Primorye. *New Data on Minerals*. **2004**. N 39. P. 110—116 (in Russian).

Thompson J.F.H., Newberry R.J. Gold Deposits Related to Reduced Granitic Intrusions. *Soc. Econ. Geol., Rev. Econ. Geol.* **2000**. N 13. P. 377—400.

Van Hook H.J. The ternary system Ag₂S—Bi₂S₃—PbS. *Econ. Geol.* **1960**. Vol. 55. N 4. P. 759—788.

Vogelman N.A., Konstantinov M.M., Kurbanov N.K. Principles of Systematics of Gold Lode Deposits for Their Prospecting and Exploration. *Native Geology*. **1995**. N 3. P. 31—41 (in Russian).

Wernick J.H. Constitution of the AgSbS_2 — PbS , AgBiS_2 — PbS and AgBiS_2 — AgBiSe_2 systems. *Amer. Miner.* **1960**. N 45. P. 591—598.

Yushkin N.P., Pavlov L.G. Galena-clausthalite isomorphic series: the first discovery of intermediate members on Novaya Zemlya. In: *Minerals and mineral complexes of the European North-East of the USSR: Proc. of the Institute of Geology of the Komi Branch of the USSR Acad. Sci.* Syktyvkar, **1983**. Iss. 40. P. 38—44 (*in Russian*).

Zimenko M.I., Karelin Yu.P., Zimenko E.A., Zhigulina A.S., Voropaev V.S. State Geological Map of the Russian Federation at a Scale of 1:200000 (second edition). Sugoiskaya Series. Sheet P-56-XXI (Myakit). Explanatory Letter. Saint Petersburg: VSEGEI Cartographic Factory, **2018**. 192 p. (*in Russian*).