

## Золото-медно-скарновое оруденение Баранчинской площади (Горный Алтай)

**Аннотация.** Определены вещественный состав и последовательность формирования золото-медно-скарнового оруденения, выявленного на Баранчинской площади. Пироксен-гранатовые скарны интенсивно замещены борсодержащим везувианом, который в свою очередь замещается боросиликатами, находящимися в парагенезисе с золото-сульфидной минерализацией. Боросиликаты представлены турмалином, аксинитом, датолитом, а также окаямалитом, впервые выявленном на территории России. Рудные минералы преимущественно представлены халькопиритом, борнитом, виттихенитом, самородным висмутом и электрумом. Оруденение было сформировано щёлочно-хлоридными растворами в интервале температур 385–330 °С при давлении около 1000 бар. В качестве ближайшего аналога рассмотрено месторождение Карагу на Горном Алтае.

**Ключевые слова:** Горный Алтай, Баранча, золото, скарны, аксинит, датолит, окаямалит, флюидные включения.

КРЯЖЕВ СЕРГЕЙ ГАВРИЛОВИЧ, доктор геолого-минералогических наук, начальник отдела <sup>1</sup>, kryazhev@tsnigri.ru

ДВУРЕЧЕНСКАЯ СВЕТЛАНА СТЕПАНОВНА, кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник <sup>1</sup>, dvurechenskaya@tsnigri.ru

ОКУЛОВ АЛЕКСЕЙ ВЯЧЕСЛАВОВИЧ, кандидат геолого-минералогических наук, заместитель начальника отдела <sup>1</sup>, okulov@tsnigri.ru

ФЕДАК СТЕПАН ИВАНОВИЧ, ведущий инженер <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Федеральное государственное бюджетное учреждение «Центральный научно-исследовательский геологоразведочный институт цветных и благородных металлов» (ФГБУ «ЦНИГРИ»), г. Москва

<sup>2</sup> Федеральное государственное бюджетное учреждение «Всероссийский научно-исследовательский геологический институт им. А. П. Карпинского», г. Санкт-Петербург

## Skarn-related gold-copper mineralization of the Baranchinskaya area (Gornyi Altai)

S. G. KRYAZHEV <sup>1</sup>, S. S. DVURECHENSKAYA <sup>1</sup>, A. V. OKULOV <sup>1</sup>, S. I. FEDAK <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Federal State Budgetary Institution "Central Research Institute of Geological Prospecting for Base and Precious Metals" (FSBI "TSNIGRI"), Moscow

<sup>2</sup> Federal State Budgetary Institution "All-Russian Geological Research Institute of A.P. Karpinsky" (Karpinsky Russian Geological Institute), St. Petersburg

**Annotation.** The composition and sequence of formation of skarn-related gold-copper mineralization of the Baranchinskaya area have been determined. The pyroxene-garnet skarns are intensely replaced by boron-containing vesuvianite that in turn is replaced by borosilicates in paragenesis with gold-sulfide mineralization. The borosilicates are represented by tourmaline, axinite, and datolite, as well as by okayamalite first found in Russia. Ore minerals are mainly represented by chalcopyrite, bornite, wittichenite, native bismuth, and electrum. The ore mineralization was formed by alkaline-chloride solutions in the temperature range of 385–330 °C at a pressure of about 1000 bar. The Karagu deposit in the Gornyi Altai is considered as the closest analogue.

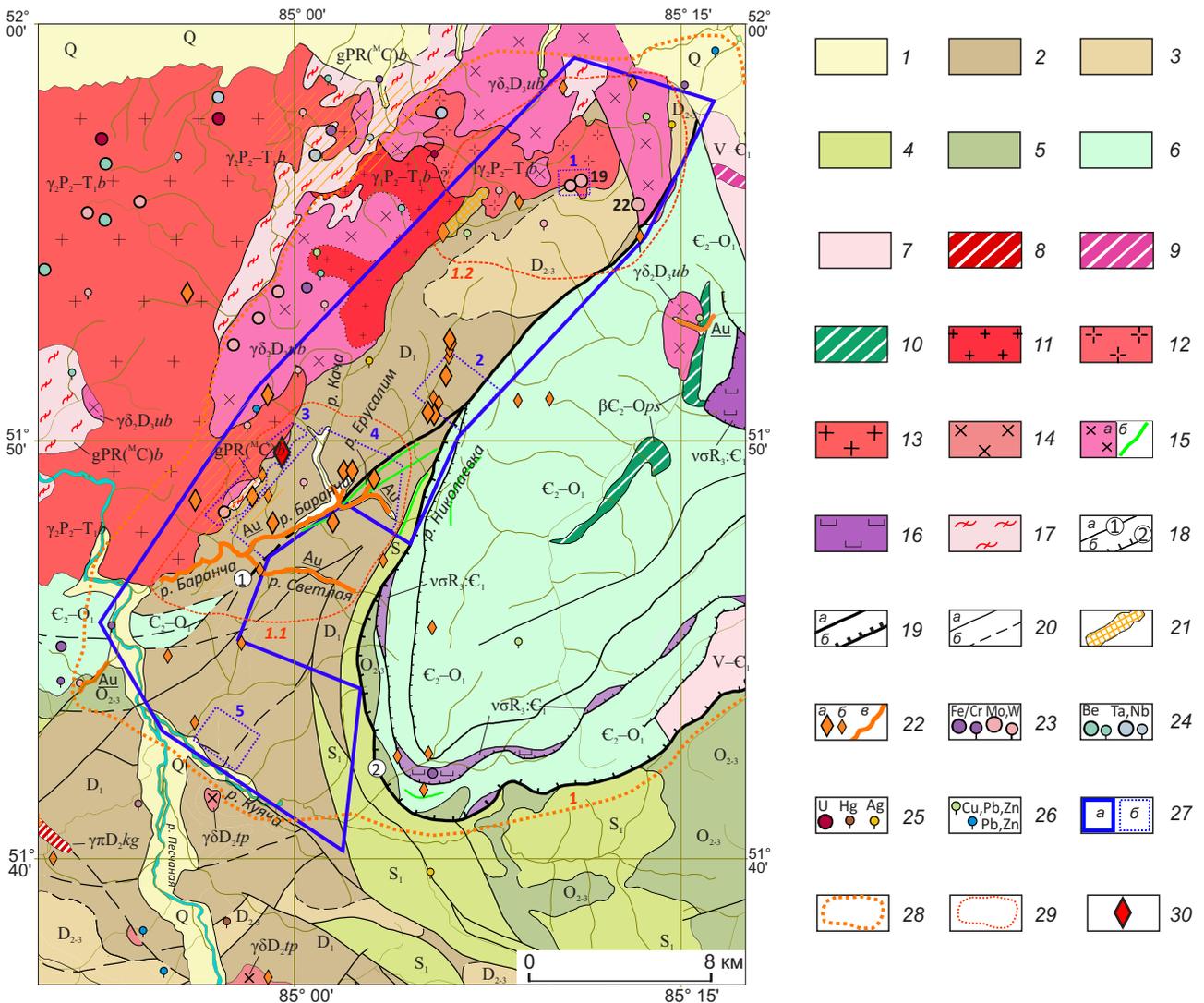
**Key words:** Gornyi Altai, Barancha, gold, skarns, axinite, datolite, okayamalite, fluid inclusions.

**Введение.** Баранчинская площадь находится на границе номенклатурных листов М-45-І и М-45-ІІ, в географическом плане – на северных отрогах Чергинского хребта Горного Алтая, в области перехода структур последнего к Предальтайской равнине.

В металлогеническом отношении площадь приурочена к западной части одноимённого Баранчинского золоторудно-россыпного узла, большая часть которого приходится на лист М-45-ІІ. Согласно тектоническому районированию территории листа М-45-ІІ (Кривчиков, 2001 ф), рудный узел находится в области сложного тектонического строения и приурочен к участку сопряжения структур Ануйского тектонического блока и Каменского аллохтона, частично – Белокурихинского аллохтона ІІ порядка. При этом Баранчинское золото-

рудное и Щемилдовское молибден-вольфрамовое с золотом рудные поля приурочены к структурам Ануйского тектонического блока, «зажатым» между двумя другими (рис. 1).

Ануйский блок сложен главным образом карбонатно-терригенными отложениями барагашской свиты ( $D_1br$ ), нижняя часть которой представлена песчаниками, алевролитами, известняками, в верхней преобладают известняки с прослоями терригенных пород. Формирование этих отложений происходило в условиях шельфа пассивной континентальной окраины. Позднее ограниченно проявился андезитовый вулканизм, в связи с которым сформировались андезиты, андезито-базальты, дациты, риолиты и туфы куяганской свиты ( $D_2kg$ ). Интрузивные образования проявлены весьма ограниченно и представлены дайками диоритовых порфиритов



усть-беловского комплекса ( $\delta\pi D_3ub$ ), ориентировка которых обычно совпадает с простиранием главных разломных структур.

Ануйский блок с востока вдоль зоны Каркылинского надвига граничит с Каменским аллохтоном. Последний сложен флишоидно-вулканогенными отложениями песчанинской толщи ( $\epsilon_1-O_1ps$ ). Отложения представлены пестроцветными песчаниками, алевролитами, филлитами, туффитами, а также базальтоидами, редко риодацитами и яшмоидами, накопление которых отвечает условиям междугового бассейна. Стратифицированным отложениям синхронны силлы долеритов песчанинского базальтового комплекса ( $\beta \epsilon_2-O_1ps$ ). Магматические образования в пределах блока проявлены весьма ограничено и представлены малыми телами диоритовых порфиритов онгудайского комплекса ( $\delta\pi D_{1-2}og$ ) и гранодиоритов усть-беловского комплекса ( $\gamma\delta 2D_3ub$ ). Отложения кембрия–ордовика нарушены чешуйчатым веером надвигов, ориентировка которых повторяет расположение Каркылинского надвига, при этом зоны надвигов маркируются линзовидными телами базит-ультрабазито-

вого состава, которые принято относить к офиолитовой ассоциации ( $\nu\sigma R_3:\epsilon_1$ ).

Белокурихинский аллохтон имеет сложное строение, представлен разновозрастными интрузивными породами преимущественно кислого состава ( $D_2, P_2-T_1$ ), однако содержит в себе глыбы метаморфических пород протерозойского фундамента (PR). Последние образованы гнейсами, кристаллосланцами, амфиболитами Белокурихинского полиметаморфического комплекса (gPR ( $^M C$ )b). Интрузивные магматические породы представлены как минимум двумя комплексами – усть-беловским (гранодиориты,  $\gamma\delta 2D_3ub$ ) и белокурихинским (граниты, лейкограниты,  $\gamma P_2-T_1b$ ), который и формирует основной объём магматических пород блока.

*Металлогения* Баранчинского рудного узла и смежных с ним территорий весьма сложна и разнообразна. В западной его части, в контуре Баранчинской площади, выделены 2 рудных поля – на севере Щемиловское (Осокинско-Батунковское) вольфрамное с молибденом и золотом и Баранчинское золоторудно-россыпное в центральной части площади.

**Рис. 1. Схематическая геологическая карта прогнозируемого Баранчинского золоторудного узла и его обрамления.** По материалам (Кривчиков и др., 2001ф; Селин и др., 2016ф), с уточнениями и изменениями авторов:

1 – четвертичные отложения нерасчленённые (Q); 2 – ранний девон ( $D_1$ ), Барагашская свита (песчаники, алевролиты, известняки); 3 – средний–поздний девон ( $D_{2-3}$ ), Куяганская свита (андезиты, андезибазальты, базальты, дациты, риолиты и их туфы, Малафеевская свита (алевролиты, глинистые сланцы, известняки); 4 – ранний силур ( $S_1$ ), Полатинская и Куячинская свиты, Куячинская толща (известняки, известковистые песчаники, алевролиты); 5 – средний–поздний ордовик ( $O_{2-3}$ ), Ханхаринская свита, Верхнеануйская серия (алевролиты, песчаники, прослои известняков); 6 – средний кембрий–ранний ордовик ( $\epsilon_2-O_1$ ), Песчанинская толща (пестроцветные песчаники, алевролиты, филлиты, туффиты, базальты); 7 – венд–ранний кембрий ( $V-\epsilon_1$ ), Каимская свита (филлиты, метаалевролиты, базальты, долериты, известняки); 8 – средний девон ( $\gamma\pi D_2kg$ ), Куяганский комплекс (гранит-порфиры); 9 – ранний–средний девон ( $\delta\pi D_2og$ ), Онгудайский комплекс (диоритовые порфиры); 10 – средний кембрий–ранний ордовик ( $\beta \epsilon_2-O_1ps$ ), Песчанинский комплекс базальтовый (силлы долеритов); 11–13 – средняя пермь–ранний триас, Белокурихинский комплекс; 11 – первая фаза (?) ( $\gamma_1 P_2-T_1b$ ?), меланограниты, 12 – вторая фаза ( $\gamma_2 P_2-T_1b$ ), лейкограниты, 13 – вторая фаза ( $\gamma_2 P_2-T_1b$ ), граниты; 14 – средний девон ( $\gamma\delta D_2tp$ ), топольнинская ассоциация (гранодиориты); 15 – поздний девон, Усть-Беловский комплекс, вторая фаза (гранодиориты) ( $a - \gamma\delta_2 D_3ub$ ,  $b - \delta\pi D_3ub$ ); 16 – позднерифейско(?)–раннекембрийские ( $\nu\sigma R_3:\epsilon_1$ ) мафит-ультрамафитовые (офиолитовые) образования; 17 – протерозой (gPR ( $^M C$ )b), Белокурихинский комплекс полиметаморфический (гнейсы, кристаллослацы, амфиболиты); 18 – разрывные нарушения:  $a$  – сложной кинематики,  $b$  – надвиги (цифрами обозначены: 1 – Сарасинско-Инский разлом, 2 – Каркылинский надвиг); 19 – разрывные нарушения рудоконтролирующие (?):  $a$  – сложной кинематики,  $b$  – надвиги; 20 – геологические границы:  $a$  – достоверные,  $b$  – предполагаемые; 21 – зоны скарнов; 22 – рудопроявления золота ( $a$ ), пункты минерализации золота ( $b$ ), россыпи золота ( $v$ ); 23–24 – рудопроявления и пункты минерализации: 23 – железа, вольфрама, молибдена, 24 – бериллия, тантала, ниобия; 25 – рудопроявления урана, пункты минерализации ртути, серебра; 26 – рудопроявления меди-свинца-цинка, свинца-цинка; 27–29 – контуры: 27 – Баранчинской поисковой площади 2014–2016 гг. ( $a$ ), участков детализационных работ (1 – Щемиловский, 2 – Верхне-Баранчинский, 3 – Лысуха, 4 – Баранчинский, 5 – Барашек) ( $b$ ), 28 – Баранчинского золоторудно-россыпного узла и 29 – рудных полей: Баранчинского (1.1), Щемиловского (1.2); 30 – местоположение канавы 72-1

Золотоносные россыпи на рассматриваемой территории были открыты ещё в первой половине XIX в., их отработка с длительными перерывами продолжалась до конца 1990-х гг. Россыпи золота известны по р. Баранча (среднее и верхнее течение), а также по её левым притокам – рекам Светлая, Николаевка, руч. Иерусалимский (Ерусалим), в нижнем течении её правого притока р. Качи. Золотоносность правых притоков р. Баранча (Подсумный, Светленький, Лысуха) слабая, обычно не превышает десятых–первых сотен мг/м<sup>3</sup> (Николенко, 1995 ф).

Головки россыпей рек Светлая и Николаевка приурочены к зоне Куячинского надвига, золотоносная часть долины р. Баранча и руч. Иерусалим – к зоне Сарасинско-Инского разлома. Примечательно, что зоны разломов подчёркиваются дайками среднего–основного состава усть-беловского комплекса.

В целом суммарная учтённая добыча золота из россыпей бассейна р. Баранча составила почти 500 кг.

Распределение золота россыпи р. Баранча по классам крупности имеет некоторые особенности. Верхний и средний участки характеризуются наиболее высокими содержаниями фракции +1 мм (55–66 %), с заметной тенденцией её убывания вниз по течению; в нижнем участке россыпи наблюдается резкое снижение крупности металла – доля фракции золота +1 мм падает до 12–23 %. Во всех классах преобладают комковатые, лепёшковидные, дендритовидные и друзовидные формы зёрен с шероховатой и ямчатой поверхностью, хорошей, средней, реже плохой окатанностью. В нижнем участке незначительно увеличивается доля хорошо окатанных зёрен. Пробность золота варьирует в пределах 905–980 ‰, составляя в среднем 950 ‰. Золоту из карстовых карманов россыпи свойственна плохая окатанность и повышенная крупность.

Россыпь р. Светлой характеризуется содержанием фракции +1 мм от 63 до 95 % в верхней части, на нижнем участке содержание фракции +1 мм составляет 20–33 %. Встречались самородки весом 18–48 г. Отмечались сростки с кварцем. Из сопутствующих присутствовали осмистый иридий в количестве 3–10 г на 1 кг золота, весовые содержания хромита. Россыпь отрабатывалась вручную открытым и подземным способом. Пробность золота варьирует в пределах 920–940 ‰.

Золото россыпи р. Николаевки характеризуется повышенной крупностью, в нижнем её участке, включая руч. Иерусалим, содержание класса крупности +1 мм составляет 80–91 %. Максимальный размер золотин до 6,9 мм в сечении отмечен в руч. Иерусалим, в р. Николаевка размер зёрен достигает 4,3 мм в сечении. Крупность золота в верхней части россыпи заметно снижается – класс +1 мм в пределах 60–64 %. Пробность золота по р. Николаевка – 900–950 ‰, составляя в среднем 935 ‰, по руч. Иерусалим пробность возрастает до 960 ‰.

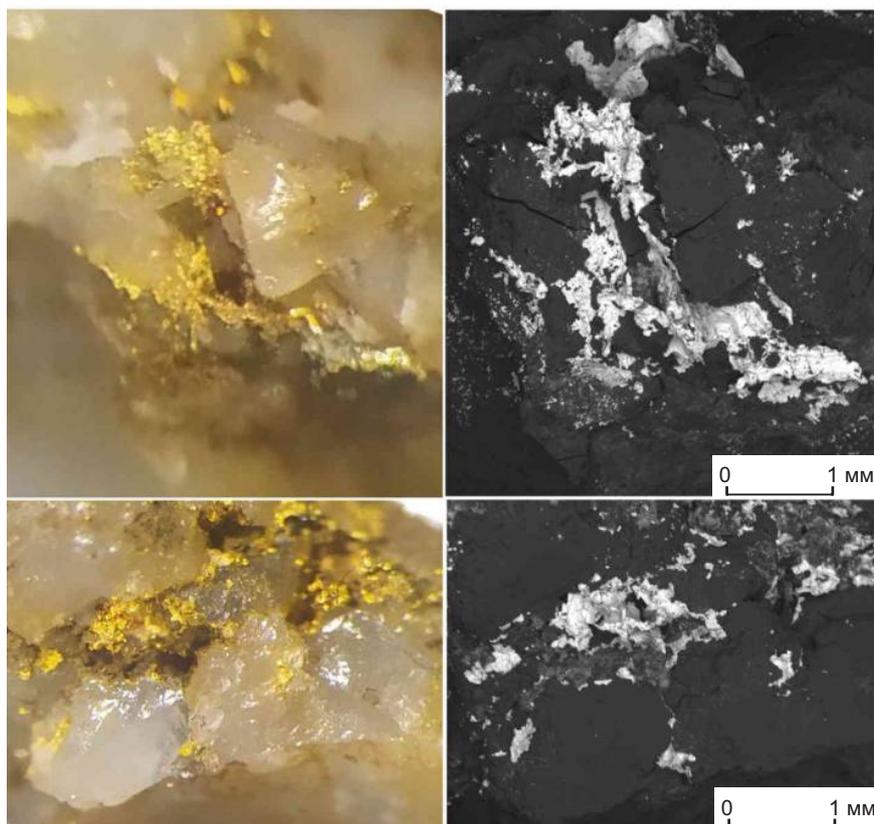
Минеральные выделения осмистого иридия из россыпей бассейна р. Баранчи представлены в виде изометричных окатанных плоских зёрен серебристо-белого цвета с ярким металлическим блеском, размером в доли мм, максимально до 1 мм (Николенко, 1995 ф).

Наличие в россыпях крупного металла, самородков золота, а также сростков самородного золота с кварцем указывает на то, что источником россыпного золота служили золотоносные кварцевые жилы и зоны жильно-прожилкового окварцевания. При этом, однако, намечается пространственная связь россыпей и разломных зон с телами гипербазитов, которые, вероятно, являются источником осмистого иридия.

В период 2014–2016 гг. на Баранчинской площади выполнялись поисковые работы на рудное золото (Селин, 2016 ф), по результатам которых наличие коренного золотого оруденения было подтверждено только на двух участках (Лысуха и Баранчинский), находящихся в пределах Баранчинского рудного поля.

Участок Баранчинский сложен слабометаморфизованными вулканогенно-терригенно-карбонатными отложениями барагашской свиты. Золотое оруденение участка связано с маломощными, 1–2 м, зонками катаклаза и кварц-кальцитовый минерализации в дайках диоритовых порфириров, гранит-порфириров, реже в окварцованных терригенно-карбонатных породах с максимальными содержаниями золота 4,3 г/т. В плотике р. Светлая известны находки кварцевых жил с видимым золотом (рис. 2), пробность которого составляет 920–950 ‰.

На участке Лысуха золотое оруденение с промышленными содержаниями серебра, меди, висмута и бора связано с зонами скарнов, которые приурочены к области контакта гранитоидов усть-беловского комплекса и терригенно-карбонатных



**Рис. 2. Самородное золото в жильном кварце из плитки россыпи р. Светлая:**

справа – изображение в отражённых электронах

отложений барагашской свиты. Тела скарнов достигают мощности 150 м. При этом золоторудные тела в пределах зон скарнов относительно маломощные (до 3 м), характеризуются средним содержанием 1,3 г/т при максимальных содержаниях золота до 31 г/т и серебра свыше 100 г/т. Содержания меди на уровне 1–2 %, висмута – до 0,05 %, бора ( $B_2O_3$ ) – до 6–8 %. Скарны, очевидно, служили благоприятной средой для формирования руд.

В статье представлены результаты изучения вещественного состава и условий формирования золото-скарновой минерализации, выявленной на участке Лысуха.

**Методика исследований.** Штуфные пробы для исследований массой 0,5–1 кг были отобраны авторами из полотна канавы К72–1, вскрывшей мощную зону развития метасоматитов и рудной минерализации, наиболее представительную по степени проявленности всех стадий минерало-

образования. Номер каждой пробы в знаменателе отражает её положение (в метрах) в канаве 72–1.

Различные по составу метасоматические зоны выпиливали из штуфов. Из срезов были изготовлены прозрачные шлифы и аншлифы. Остатки, раздробленные до фракции –0,5 мм, использовали для анализа минерального и элементного состава пород.

Минеральный состав проб определяли методом рентгенофазового анализа лёгкой, тяжёлой немагнитной и электромагнитной фракции (дифрактометр ДРОН-2), состав рудных минералов уточняли путём просмотра смонтированных аншлифов.

Мультиэлементный ICP-MS анализ проб после 4-х кислотного разложения выполнен в аккредитованном Аналитическом центре «ЦНИГРИ» на масс-спектрометре Elan6100 (аналитик Е. Торина). Содержания Au уточнены методом пробирного анализа с гравиметрическим окончанием.

Минералы	Апоскарновые метасоматиты	
	«Ретроградные» скарны	Пропилиты
Пироксен	1	
Везувиан	1	
Волластонит	1	
Кальцит		2
Эпидот-цоизит		2
Амфибол		2
Сфен		2
Апатит		2
Полевые шпаты		2
Кварц		2
Турмалин		2
Аксинит		2
Датолит		2
Окаямалит		2
Никелин		2
Герсдорфит		2
Леллингит		2
Халькопирит		2
Борнит		2
Халькозин		2
Сфалерит		2
Галенит		2
Тетраэдрит		2
Аннивит		2
Виттихенит		2
Хедлейит		2
Самородный Вi		2
Электрум		2



Рис. 3. Схема последовательности формирования золото-медно-скарновых руд:

минералы: 1 – главные, 2 – второстепенные

Рентгеноспектральный микроанализ рудных минералов выполнен на микронзондовом анализаторе Cameca SX-100, оснащённом волновыми спектрометрами (аналитик Н. Н. Кононкова).

Микротермометрические анализы индивидуальных флюидных включений проводились в прозрачно-полированных пластинках с использованием криотермокамеры УМТК+ конструкции ЦНИГРИ, позволяющей выполнять охлаждение и нагревание препаратов от -180 до +600 °С с измерением температур фазовых переходов во включениях посредством хромель-алюмелевой термопары с точностью ±0,2 °С. Камеру калиб-

ровали при температурах тройной точки чистой CO<sub>2</sub> (-56,6 °С), температурах плавления льда в стандартных растворах NaCl (от -18° до -1 °С), температурах плавления AgNO<sub>3</sub> (210 °С) и K<sub>2</sub>CrO<sub>7</sub> (398 °С).

Изотопный состав кислорода и углерода карбонатов выполнен по стандартной методике [12], включающей реакцию минерала с H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> при 75 °С с последующим анализом CO<sub>2</sub> на изотопном масс-спектрометре МИ-1201. В качестве стандартного образца использовали карбонат КН-2 (аттестованные значения δ<sup>13</sup>C<sub>PDB</sub> +1,97 ‰, δ<sup>18</sup>O<sub>SMOW</sub> +27,8 ‰). Погрешность анализа не превышает ±0,2 ‰ для δ<sup>13</sup>C и ±0,4 ‰ для δ<sup>18</sup>O.

**Результаты исследований.** Изученный фрагмент рудопроявления Лысуха представляет собой тело в различной степени преобразованных диффузионных пироксен-гранатовых скарнов мощностью 8 м (интервал 58–66 м), приуроченное к контакту известняков и алюмосиликатных пород. Скарны сложены мелкозернистым агрегатом граната андрадит-гроссулярового ряда, содержащим неравномерно распределённые скопления мелких кристаллов диопсида. В результате петрографических и минераграфических исследований установлена следующая последовательность формирования наложенного на скарны оруденения (рис. 3).

Среди апоскарновых метасоматитов мы выделяем две разновидности, которые были сформированы последовательно в рамках единого этапа минералообразования.

*Волластонит-везувиановые метасоматиты («ретроградные скарны»)* образуются путём практически полного замещения пироксена и граната сначала везувианом, а затем более локально развитым волластонитом (рис. 4, табл. 1). При этом в породах существенно возрастают содержания только Mg, Ti, As и В. Установлено, что указанные элементы наряду с Ca и Fe на рассматриваемой площади закономерно входят в состав везувиана (табл. 2).

*Пропилиты* накладываются как на скарны, так и на волластонит-везувиановые метасоматиты (рис. 5, см. табл. 1) и сложены эпидот-цоизитом, клиноцоизитом и амфиболом актинолит-тремолитового ряда. В подчинённом количестве отмечаются кварц, альбит, калиевый полевой шпат, аксессуарные минералы представлены апатитом и сфеном. Соответственно, в пропилитах фиксируются повышенные концентрации К и Na. Бор

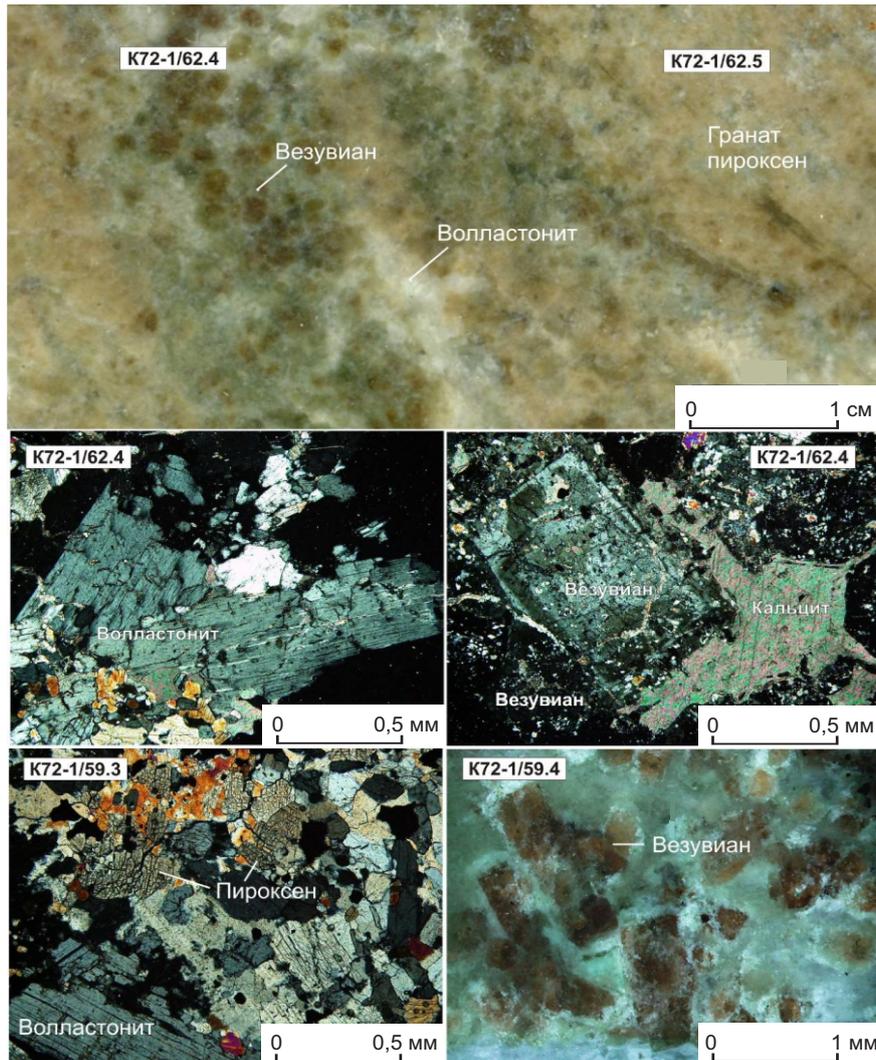


Рис. 4. Замещение пироксен-гранатовых скарнов везувианом и волластонитом

практически полностью выносятся и, возможно, переотлагается во внутренней зоне в форме боросиликатов.

**Боросиликатная минерализация.** Особенностью апоскарновых метасоматитов, развитых на уч. Лысуха, является присутствие существенного количества минералов бора. За пределами золоторудного тела отмечены чёрный турмалин и розовато-фиолетовый (марганцовистый) аксинит (см. рис. 5). В рудном теле широко развиты датолит  $\text{Ca}_2\text{B}_2[\text{SiO}_4]_2[\text{OH}]_2$  (рис. 6) и окаямалит  $\text{Ca}_2\text{B}_2\text{SiO}_7$  (рис. 7). Указанные минералы отчётливо замещают пироксен, волластонит и везувиан, в ряде случаев содержание боросиликатов достигает 50 % от массы руд.

Окаямалит относится к весьма редким минералам [11], на территории России он встречен впервые. Минерал диагностирован по дифрактограмме (основные линии, Å: 2,65 (100), 2,86 (60), 3,47 (40), 1,92 (40), 1,64 (20), 2,12 (20)) в комплексе с данными ICP-MS анализа (см. табл. 2, содержания кальция и бора близко соответствуют теоретическим).

**Рудные минералы.** Главными рудными минералами служат халькопирит и борнит (рисунки 8, 9 и таблицы 3, 4), которые находятся в тесной парагенетической ассоциации с датолитом и окаямалитом. В рудах минералы меди распределены весьма неравномерно. Среди второстепенных и редких минералов распространены халькозин, виттихенит, самородный висмут, сфалерит, галенит,

Табл. 1. Вещественный состав метасоматитов

Минералы	Номера проб						
	K72-1/62.5	K72-1/62.4	K72-1/65.6	K72-1/65.5	K72-1/59.5	K72-1/59.4	K72-1/59.3
	Зона						
	S	V	V	P	S (+P)	V	P
Содержание, %							
Кальцит	5	10	9	17	4	10	24
Везувиан	–	40	50	–	–	70	5
Гранат	75	10	32	–	50	15	–
Пироксен	15	5	6	35	25	–	< 1
Волластонит	5	35	3	–	–	–	15
Эпидот, цоизит	–	–	–	40	15	–	–
Амфибол	–	–	–	4	–	–	–
Кварц	–	–	–	3	5	–	–
Полевые шпаты	–	–	–	1	1	–	–
Апатит, сфен	–	–	–	< 1	–	–	–
Датолит	–	< 1	–	–	–	5	50
Халькопирит	–	< 1	–	–	–	–	1
Борнит	–	< 1	–	–	–	1	6
Минералы Вi	–	–	–	–	–	–	< 1
Элементы	Содержание, г/т (по данным ICP MS)						
Au	0	0	0	0	0	1	2
Ag	2	1	4	0	0	15	165
As	204	237	460	38	27	529	200
Sb	42	39	129	17	20	119	43
Co	8	10	6	6	5	12	11
Ni	19	23	10	26	12	22	19
Cu	160	88	773	118	164	2641	34 412
Zn	168	221	135	262	153	148	257
Pb	4	5	2	25	5	8	292
Bi	21	24	34	6	3	81	937
W	30	32	5	2	2	4	18
Sn	7	3	62	8	4	22	13
Ba	3	2	1	51	22	1	3
Ti	2134	3187	1806	3027	1415	4512	916
V	57	26	66	115	80	32	19
Cr	21	45	18	62	41	77	16
Mn	1277	862	774	655	1132	606	484
Na	99	86	0	1217	900	49	25
K	122	39	0	2180	997	12	48
Содержание, мас.% (по данным ICP MS)							
Ca	18,2	19,91	19,90	10,02	11,75	17,22	25,20
Mg	1,87	2,63	1,41	2,78	1,00	2,16	1,16
Fe	2,70	1,95	4,93	3,68	2,59	3,06	2,07
B	0,06	0,11	0,60	0,03	0,01	0,72	2,58

Примечание. Метасоматические зоны: S – пироксен-гранатовая, V – волластонит-везувиановая, P – пропилитовая.

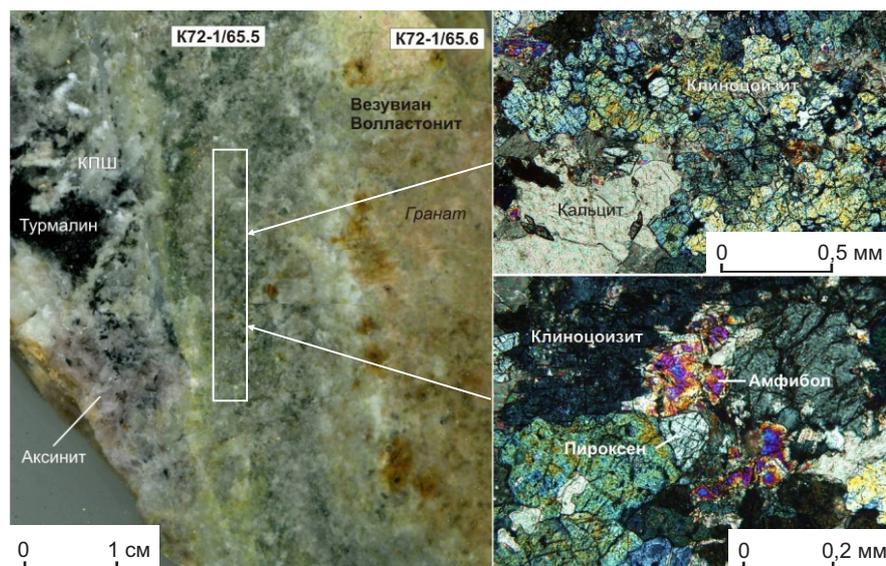


Рис. 5. Замещение скарнов пропилитами

Табл. 2. Химический состав везувиана и окаймалита

№	Минералы	Номера проб		
		K72-1/59.7Н	K72-1/59.7М	K72-1/20М
		Содержание, %		
1	Кальцит	–	7	5
2	Везувиан	–	93	90
3	Пироксен	–	< 1	5
4	Окаймалит	100	–	–
Элементы		Содержание, мас.% (по данным ICP MS)		
5	Ca	28,50	19,20	19,34
6	Mg	0,82	2,55	2,92
7	Fe	0,32	2,83	2,84
8	Ti	0,01	0,29	0,31
9	B	8,20	0,91	0,53
Элементы		Содержание, г/т (по данным ICP MS)		
10	Ag	0,7	6,4	0,9
11	As	146,1	1060,3	893,6
12	Sb	8,6	194,0	49,3
13	Co	6,4	9,4	10,5
14	Ni	6,4	21,2	26,2
15	Cu	154,1	2365,6	119,2
16	Zn	42,6	276,8	336,3
17	Pb	0,0	29,8	10,3
18	Bi	2,4	100,1	26,0

№	Элементы	Номера проб		
		K72-1/59.7Н	K72-1/59.7М	K72-1/20М
		Содержание, г/т (по данным ICP MS)		
19	Se	2,1	7,9	4,7
20	W	2,6	17,7	3,0
21	Sn	0,7	12,0	5,5
22	Ba	0,0	3,9	4,3
23	V	22,8	65,0	64,2
24	Cr	2,2	40,2	33,8
25	Mn	202,4	761,1	813,3
26	Na	0	36	62
27	K	0	108	120
28	Li	0,2	1,2	0,2
29	Rb	0,2	1,0	0,8
30	Sr	17,0	373,8	1080,4
31	Ga	3,1	28,5	23,9
32	Ge	1,6	1,6	1,5
33	Y	2,9	2,5	3,2
34	Zr	64,3	65,9	81,5
35	Nb	0,4	5,4	5,9
36	Hf	1,2	2,4	2,8
37	Ta	0,0	0,5	0,4
38	Be	0,4	0,8	1,2

Примечание. Фракции: Н – немагнитная, М – электромагнитная; обр. K72-1/20 отобран из везувиановых метасоматитов за пределами рудной зоны.

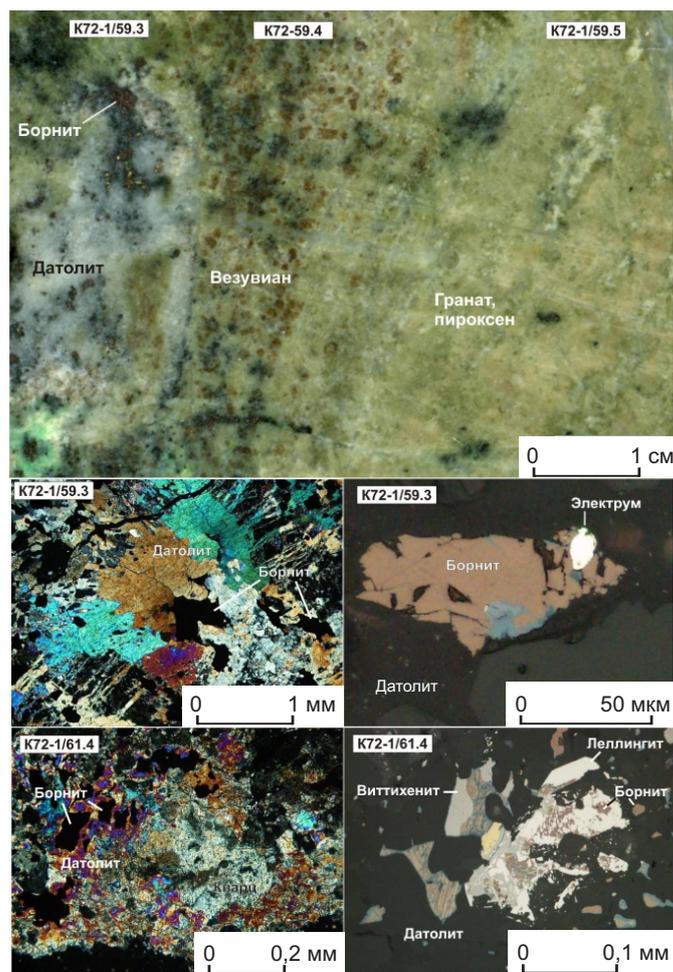


Рис. 6. Замещение скарнов датолитом с золото-сульфидной минерализацией

тетраэдрит, аннивит (Bi-тетраэдрит), никелин, герсдорфит, Со-герсдорфит, Со-Ni-леллингит.

Все рудные минералы находятся в тесной ассоциации и преимущественно наблюдаются в полиминеральных срастаниях. Наблюдения в аншлифах свидетельствуют о том, что наиболее ранними по времени выделения являются минералы мышьяка и никеля, которые корродируются борнитом и халькопиритом. Минералы меди, в свою очередь, замещаются минералами висмута.

*Самородное золото*, тесно ассоциирующее с сульфидами, образует тонкодисперсные (1–10 мкм) микровключения в халькопирите, борните, виттихените. По данным рентгеноспектрального микроанализа (табл. 5), пробность золота низкая (соответствует электруму). Существенные примеси – Ag, Bi, Hg, Cu, Te. В некоторых образцах с относительно низким общим содержанием суль-

фидов, но повышенным количеством виттихенита и самородного висмута в золото-сульфидном концентрате обнаружены частицы *свободного* тонкого золота размерами 50–100 мкм. Форма золотинок неправильная интерстициальная с многочисленными выступами и следами от вмещающего минерала (везувиана). Иногда зёрна имеют отчётливые кристаллографические очертания, свидетельствующие о росте золотинок в свободном пространстве.

*Физико-химические условия рудообразования.* Верхний предел температур образования «ретроградных скарнов» можно определить по границе устойчивости волластонита в 550 °С, нижний – по границе устойчивости клинопироксена в 400 °С [5]. При снижении температуры до 400–300 °С скарновые минералы замещаются пропилитовыми – амфиболом и эпидотом [5].

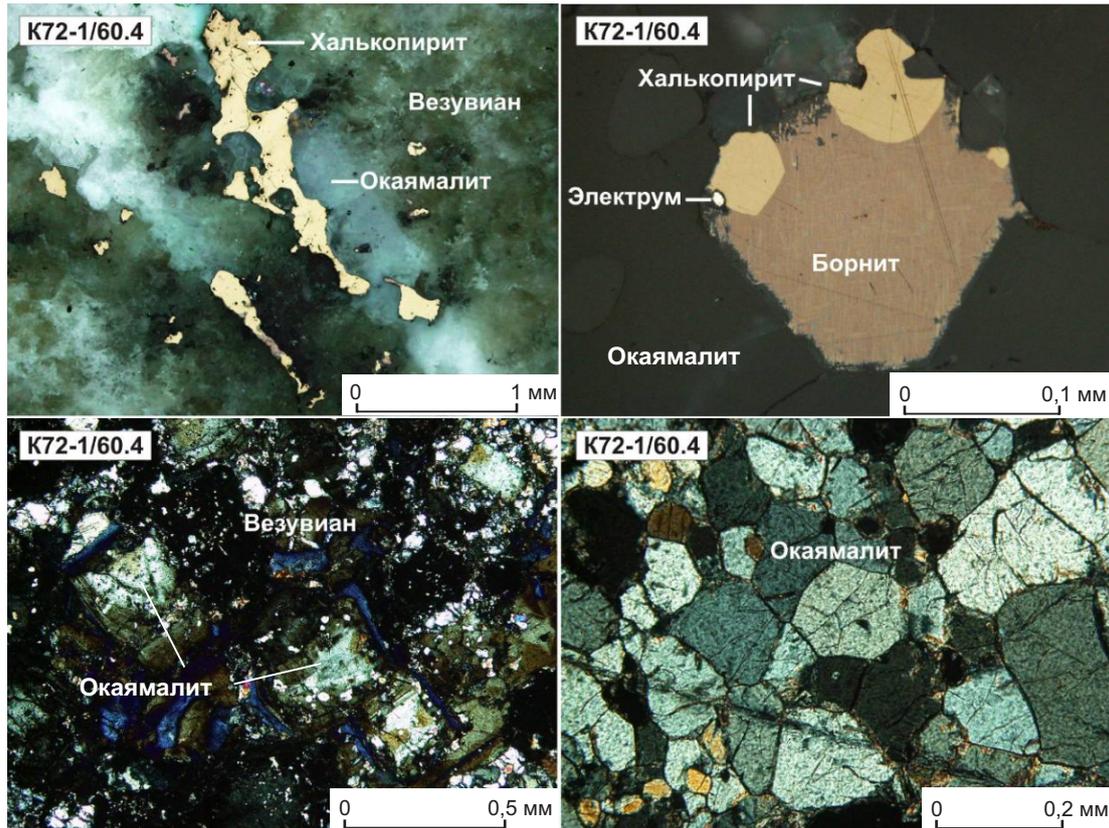


Рис. 7. Окаямалит  $\text{Ca}_2\text{B}_2\text{SiO}_7$ , в парагенезисе с золото-сульфидной минерализацией

Условия формирования рудной минерализации, представленной парагенезисом сульфидов и боросиликатов, изучены по флюидным включениям в аксините и датолите [6].

В крупном ( $3 \times 8$  см) кристалле аксинита (обр. K72-1/65.5) включения расположены закономерно в соответствии с зонами роста минерала-хозяина и отнесены к первичным. Форма включений преимущественно уплощённая с кристаллографическими очертаниями, размеры варьируют от 10 до 20 мкм (рис. 10).

В некоторых вакуолях наблюдаются мелкие твёрдые фазы разнообразной формы с низким двупреломлением, которые не растворяются вплоть до температуры декрепитации включений ( $400\text{--}500$  °С). Ксеноморфное происхождение данных минералов очевидно, поэтому их анализ методом Раман-спектроскопии не выполняли.

Микротермометрические анализы выполнены для десяти включений. Установлено, что все ва-

куоли заполнены щёлочно-хлоридным раствором умеренной концентрации ( $T_{nl}$  эвтектики  $-22,5\text{--}-25,5$  °С,  $T_{nl}$  льда  $-7,0\text{--}-7,8$  °С,  $C = 11 \pm 0,5$  мас.% NaCl-экв.). Температура гомогенизации включений варьирует от  $385\text{--}360$  °С во внутренних зонах до  $350\text{--}330$  °С во внешних. Газовая фаза в наиболее высокотемпературных включениях представлена метаном с примесью азота ( $\text{N}_2$  около 10 мол.%, гомогенизация в критической точке при  $-86$  °С,  $T_{nl}$  газогидрата  $+11,5$  °С).

Содержание метана во флюиде оценивается в 10–13 мол.%. При  $350$  °С такое количество  $\text{CO}_2$  в водно-солевом растворе с концентрацией 10 мас.% NaCl-экв. может растворяться при давлении не менее 1 кбар [7]. Для находящихся в аксините включений данная оценка является минимально возможной, так как растворимость метана в воде ниже, чем растворимость углекислоты. В условиях литостатического градиента давление 1 кбар соответствует глубинам около 4 км от палео-поверхности.

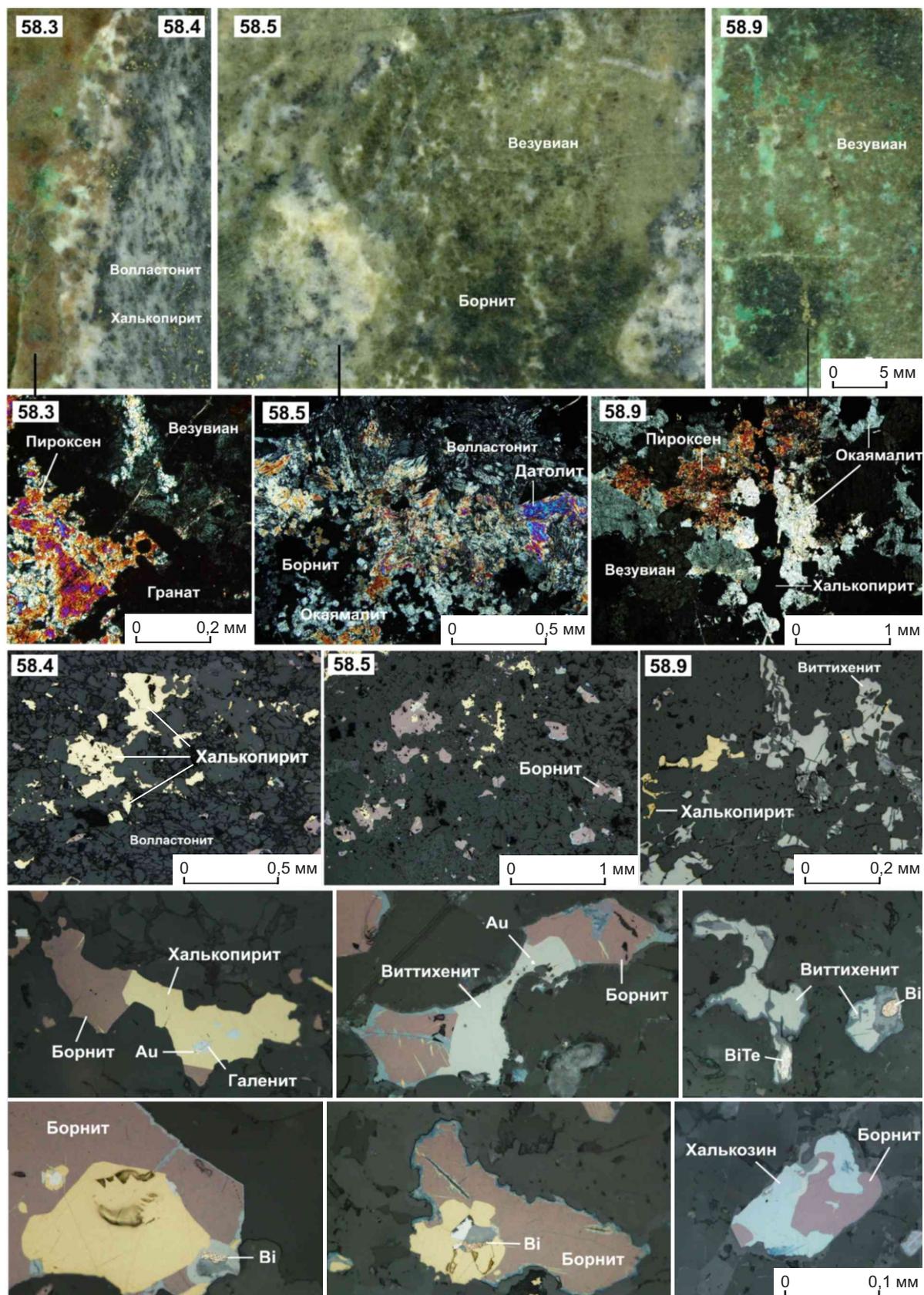


Рис. 8. Золотоносная минерализация в скарнах

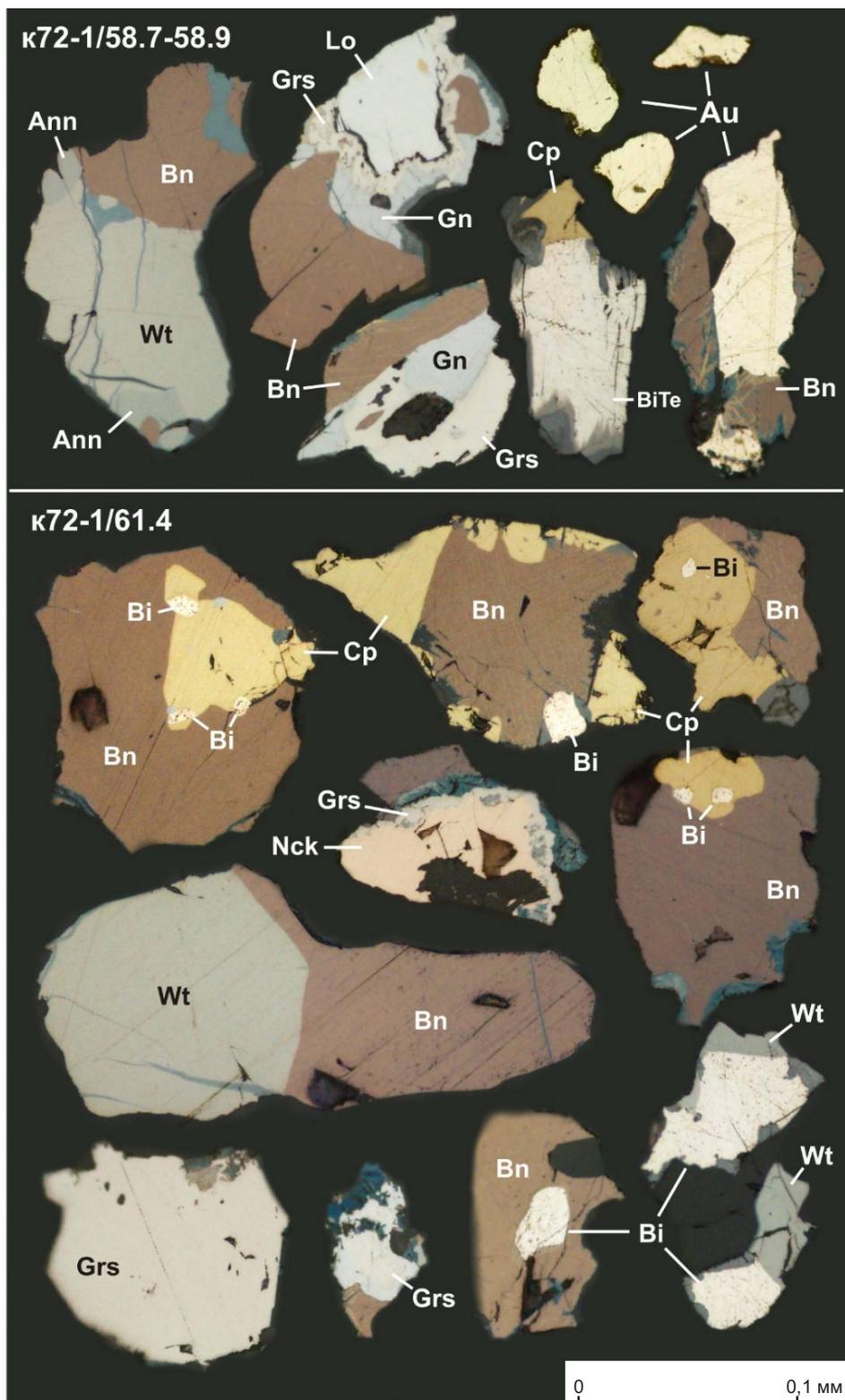


Рис. 9. Рудные минералы в монтированных аншлифах:

Bn – борнит, Cp – халькопирит, Gn – галенит, Wt – виттихенит, Ann – аннит, Lo – Co-Ni-лёллингит, Hrs – герсдорфит, Nck – никелин, BiTe – хедлейит, Bi – самородный висмут, Au – электрум

Табл. 3. Вещественный состав руд и золото-сульфидных концентратов

Номера проб	K72-1/58.4		K72-1/58.5		K72-1/58.7		K72-1/58.9		K72-1/61.4	
	Р	К	Р	К	Р	К	Р	К	Р	К
Au*, г/т	1,9	–	1,2	–	2,3	–	7,6	–	< 0,2	–
<b>Минералы</b>	<b>Содержание, %</b>									
Кальцит	< 1	–	3	–	16	5	7	1	29	3
Гранат	1	–	–	–	2	–	–	–	< 1	–
Пироксен	10	1	–	–	1	–	10	5	10	–
Везувиан	1	–	20	1	56	28	55	26	45	22
Волластонит	61	29	15	1	–	–	Сл	–	–	–
Кварц	10	32	–	–	–	–	–	–	–	–
Датолит	7	3	20	2	7	2	17	1	14	4
Окаямалит	–	–	40	3	14	3	5	1	–	–
Халькопирит	10	33	Сл	35	2	30	4	55	< 1	5
Борнит	< 1	2	2	57	2	30	1	1	2	65
Минералы Vi	–	< 1	–	1	< 1	2	1	10	< 1	1
<b>Элементы</b>	<b>Содержание, г/т (по данным ICP MS)</b>									
Au	2	7	1	105	2	10	10	210	1	2
Ag	280	546	160	4598	68	846	858	6541	88	1665
As	77	285	568	778	801	537	660	1147	253	237
Sb	47	36	42	28	68	47	225	205	36	20
Co	22	137	15	207	16	29	6	22	6	11
Ni	25	270	12	204	28	29	17	41	16	30
Mo	0	1	0	3	7	1	9	30	1	0
Se	84	208	14	363	24	296	67	339	13	393
Te	39	33	9	110	19	97	263	986	9	61
W	2	32	10	15	10	6	41	31	3	1
Sn	23	40	13	21	16	23	10	9	3	4
Cd	36	54	7	55	13	65	6	40	6	31
In	1	2	0	1	0	0	0	1	0	1
Ba	7	6	2	5	5	11	7	41	4	10
Sr	67	34	217	52	542	169	335	147	527	84
Ti	758	1247	2177	517	1612	924	4347	3964	791	581
V	34	49	94	65	48	35	139	162	29	36
Cr	19	24	45	22	26	19	54	39	13	13
Mn	1151	845	1226	1011	786	409	658	523	581	219
Na	269	73	158	40	17	269	139	286	0	348
K	98	95	90	119	114	468	145	403	43	620
<b>Элементы</b>	<b>Содержание, мас.% (по данным ICP MS)</b>									
Cu	3,85	12,40	1,32	49,76	1,94	28,81	2,49	20,37	1,23	40,65
Fe	5,33	12,66	3,51	10,70	2,94	10,38	3,74	6,82	1,10	6,78
Zn	0,23	0,20	0,02	0,34	0,10	0,24	0,18	0,19	0,03	0,02
Pb	0,03	0,04	0,01	0,14	0,01	0,06	0,83	5,58	0,01	0,08
Bi	0,15	0,24	0,03	0,76	0,04	0,31	1,45	9,37	0,05	0,37
B	0,49	0,20	5,34	0,40	1,99	0,51	1,96	0,32	1,83	0,42
Ca	16,10	8,16	18,24	3,99	22,94	9,11	17,00	6,21	25,23	6,38
Mg	3,93	1,34	3,77	0,49	2,20	1,01	2,39	1,27	2,10	0,97

Примечание. Au\* – содержание Au по данным пробирного анализа; Р – исходная руда; К – золото-сульфидный концентрат.

Табл. 4. Химический состав (мас.%) рудных минералов. По данным рентгеноспектрального микроанализа

Точка	S	Fe	Cu	Zn	Pb	Sb	As	Co	Ni	Ag	Bi	Te	Сумма
1	18,81	0,06	38,52	0,00	0,04	0,09	0,04	–	–	0,80	41,51	–	99,87
2	18,73	0,01	38,46	0,00	0,13	0,08	0,02	–	–	1,09	41,37	–	99,89
3	17,98	0,14	35,56	0,04	0,07	0,02	0,00	–	–	7,28	38,56	–	99,65
4	23,11	0,19	36,63	6,81	0,15	21,94	0,00	–	–	0,67	10,35	–	99,85
5	15,97	0,07	0,55	0,00	0,00	0,44	48,15	0,05	34,71	–	–	–	99,94
6	17,17	0,22	0,58	0,07	0,00	0,00	42,85	3,05	36,02	–	–	–	99,96
7	17,57	2,93	1,04	0,02	0,37	0,11	42,80	22,76	12,39	–	–	–	99,99
8	0,78	16,56	0,29	0,00	0,00	0,03	67,75	6,98	7,57	–	–	–	99,96
9	12,57	0,09	0,77	0,10	85,47	0,00	0,00	0,00	0,10	–	–	–	99,10
10	12,14	0,27	0,84	0,01	85,83	0,08	0,00	0,34	0,38	–	–	–	99,89
11	26,72	12,02	61,19	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	–	–	–	99,93
12	0,06	0,18	0,47	0,00	0,03	0,53	50,30	0,42	47,91	–	–	–	99,90
13	0,10	0,00	0,10	0,00	0,17	0,00	0,00	0,00	0,00	–	79,21	20,40	99,98

Кристаллохимические формулы

№ п/п	Название минерала	Фимическая формула
1	Виттихенит	$(\text{Cu}_{3,03}\text{Ag}_{0,04})_{3,07}\text{Bi}_{0,99}\text{S}_{2,94}$
2	Виттихенит	$(\text{Cu}_{3,03}\text{Ag}_{0,05})_{3,08}\text{Bi}_{0,99}\text{S}_{2,93}$
3	Ag-Виттихенит	$(\text{Cu}_{2,85}\text{Ag}_{0,34})_{3,17}\text{Bi}_{0,94}\text{S}_{2,86}$
4	Аннивит	$\text{Cu}_{10,18}(\text{Zn}_{1,84}\text{Fe}_{0,06}\text{Pb}_{0,01})_{1,91}(\text{Sb}_{3,18}\text{Bi}_{0,87})_{4,05}\text{S}_{12,73}$
5	Герсдорфит	$(\text{Ni}_{1,02}\text{Cu}_{0,01})_{1,03}\text{As}_{1,11}\text{S}_{0,86}$ (каймы)
6	Герсдорфит	$(\text{Ni}_{1,03}\text{Cu}_{0,02})_{1,05}\text{As}_{0,96}\text{S}_{0,90}$ (середина)
7	Со-герсдорфит	$(\text{Co}_{0,65}\text{Ni}_{0,35}\text{Cu}_{0,03})_{1,03}\text{As}_{0,96}\text{S}_{0,92}$
8	Со-Ni-лёллингит	$(\text{Fe}_{0,6}\text{Ni}_{0,26}\text{Co}_{0,24})_{1,1}(\text{As}_{1,85}\text{S}_{0,05})_{1,9}$
9	Галенит	$\text{Pb}_{1,03}\text{S}_{0,97}$
10	Галенит	$\text{Pb}_{1,04}\text{S}_{0,96}$
11	Борнит	$\text{Cu}_{4,79}\text{Fe}_{1,07}\text{S}_{4,14}$
12	Никелин	$\text{Ni}_{1,10}\text{As}_{0,90}$
13	Хедлейит	$\text{Bi}_{2,0}\text{Te}_{1,0}$

В датолите, ассоциирующем с золото-сульфидной минерализацией (обр. K72–1/58.9), обнаружены редкие мелкие (около 5 мкм) хаотично расположенные газовой-жидкие включения. Для них удалось определить только температуру гомогенизации (около 330 °С, 5 определений), которая соответствует нижнему пределу температур гомогенизации включений в аксините.

Присутствие в рудах самородного висмута может свидетельствовать о том, что рудоотложение завершилось при более низкой температуре (< 270 °С), но в целом надо отметить относительно

высокотемпературный характер оруденения, выявленного на уч. Лысуха.

Изотопный анализ кальцитов из трёх образцов (K72/1–58.7, 61.4 и 65.5) показал их полную идентичность:  $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}} = +18,5 \text{ ‰}$ ,  $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}} = -3,5 \text{ ‰}$ . Этот факт свидетельствует о принадлежности всей карбонатной минерализации к единой (пропилитовой) стадии рудообразования. Расчёт изотопных характеристик флюида, равновесного с кальцитом при  $350 \pm 30 \text{ °C}$ , показывает следующие значения:  $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2} \cong -1 \text{ ‰}$ ,  $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}} \cong +14 \text{ ‰}$  [9]. Обогащение флюидов тяжёлым изотопом углерода, вероятнее

Табл. 5. Химический состав (мас.%) самородного золота

Образцы	Зерно	Au	Ag	Bi	Hg	Cu	Te	Se	Sb	Сумма
К72/58.7	1	57,77	41,05	0,17	0,26	0,15	0,07	0,03	0,00	99,50
К72/58.9	1	53,38	46,01	0,11	0,28	0,06	0,13	0,01	0,00	99,98
К72/58.9	2	53,05	46,12	0,20	0,40	0,05	0,19	0,00	0,04	100,05
К72/58.9	3	53,30	46,04	0,13	0,32	0,05	0,15	0,01	0,00	100,00

всего, обусловлено его заимствованием из вмещающих известняков, хотя нельзя полностью исключить вероятность изотопного обмена в системе  $\text{CO}_2\text{-CH}_4$ . Изотопный состав кислорода указывает на вероятную связь водной составляющей флюидов с коровыми гранитоидами.

**Обсуждение результатов.** По комплексу признаков (табл. 6) изученное оруденение можно уверенно отнести к золото-медно-скарновому типу, широко проявленному на Горном Алтае [1, 4, 8]. Наиболее известным и хорошо изученным объектом является Синюхинское месторождение, которому посвящены многочисленные публикации, в том числе и авторов данной статьи [2, 10, 11]. В то же время золотоносные скарны на уч. Лысуха имеют ряд существенных отличительных особенностей, преимущественно в части вещественного состава рудной минерализации и околорудных метасоматитов:

- везувиановый состав вмещающих метасоматитов;
- наличие боросиликатного оруденения;
- присутствие значительного количества минералов висмута;
- низкая пробность самородного золота;
- высокие содержания серебра, отношения  $\text{Cu/Ag}$  и  $\text{Cu/Au}$  указывают на близость оруденения к так называемым «сереброносным» скарнам, представителем которых на Горном Алтае служит потенциальное месторождение Карагу [3].

Прогнозируемое золоторудное поле Карагу находится в южной части Уйменского прогиба и локализовано в экзоконтактовой зоне массива гранитоидов белокурухинского комплекса. Выявленное здесь олово-медно-золотое проявление Восточный Карагу сложено гранат-везувиан-геденбергитовыми скарнами мощностью до 10 м и протяжённостью до 300 м. Характерна высокая насыщенность скарнов везувианом в виде вкрапленности и гнёзд. Более поздние пропилютоподобные метасоматиче-

ские изменения представлены прожилками кварца, эпидота и тремолита мощностью 0,5–2 см. Местами метасоматиты образуют сплошные мусковит-кварцевые линзы размером 1–5 м. В них наблюдается вкрапленность турмалина, шеелита, датолита, касситерита. В дистальной фации увеличивается количество датолита и везувиана, образующих местами гнёзда размерами до 20–60 см.

Прожилки кварца мощностью 1–5 см содержат вкрапленность пирита, борнита, халькозина, халькопирита, сфалерита, галенита, самородного золота. Шеелит и касситерит кристаллизовались раньше сульфидов и золота в прожилках кварца с альбитом и калиевым полевым шпатом. Свободное золото выявлено в хвостах борзодовых проб в обогащённой медью зоне. Содержание золота от 1,5 до 5,9 г/т. Золотины имеют низкую пробность (580–650 ‰).

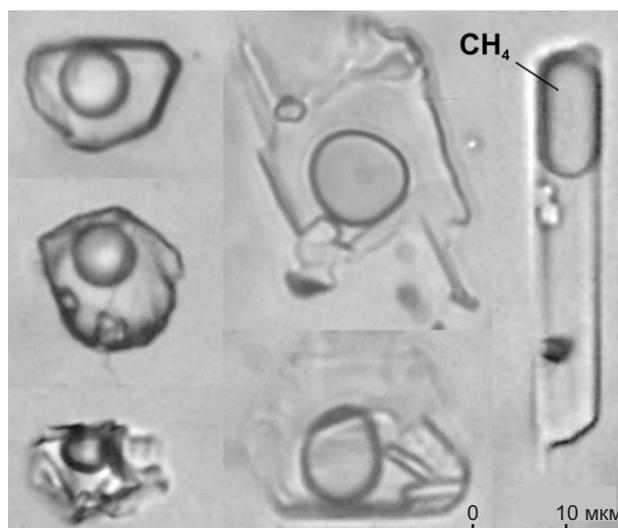


Рис. 10. Первичные флюидные включения в аксините (обр. К72-1/65.5)

Табл. 6. Сравнительная характеристика золото-медно-скарновых объектов

Геолого-структурные и минералого-геохимические характеристики	Золото-медно-скарновые объекты		
	Синюхинское месторождение	уч. Лысуха	уч. Карагу
Геолого-структурная позиция	Тектонически нарушенная область экзоконтакта массива гранитоидов в терригенно-вулканогенно-карбонатных толщах		
Ассоциирующие магматитические образования	Диориты, монцодиориты синюхинского комплекса	Граниты белокурихинского комплекса	
Вмещающие породы	Пироксен-гранатовые и волластонитовые скарны	Везувиановые скарны	
Рудосопровождающие апоскарновые метасоматиты	Кальцит-кварц-эпидотовые	Кварц-эпидотовые и боросиликатные	Кварц-мусковит-КПШ-эпидотовые и боросиликатные
Морфология рудных тел	Залежи, гнёзда, лентовидные тела сложной морфологии		
Содержание компонентов в рудах:			
Au, г/т	1–35	1–7,5	1,5–5,9
Ag, г/т	20–100	50–850	250
Cu, %	2–3,5	1,3–3,9	1
Bi, %	0,01	0,06	0,002
B, %	< 0,1	0,5–5	> 1
As, г/т	30	600	500
Сопутствующие элементы	Pb, Te	Pb, Te, Zn	Pb, Zn, Li, Be
Главные рудные минералы	Сульфиды меди (халькопирит, борнит ± халькозин)		
Второстепенные минералы	Теллуриды	Самородный висмут, виттихенит	Шеелит, касситерит, пирит
Самородное золото	Высокопробное (800–990)	Низкопробное (электрум 550–650)	
Примеси в золоте	Ag, Cu, Bi	Ag, Cu, Bi, Te, Hg	Ag, Cu, Bi, Sn

Таким образом, по аналогии наблюдаемые особенности золото-медно-скарнового оруденения на уч. Лысуха можно рассматривать как указание на его связь с гранитами белокурихинского комплекса. Возможно, этим объясняется относительно низкая золотоносность проявленных на участке апоскарновых метасоматитов.

**Заключение.** Золотоносная минерализация, проявленная на участке Лысуха, приурочена к полосе развития пироксен-гранатовых скарнов и по комплексу минералого-геохимических критериев в полной мере соответствует оруденению зо-

лото-медно-скарнового типа. С точки зрения рудно-формационной и геолого-промышленной систематики его аналогами могут служить золото-медно-скарновые объекты Горного Алтая, в том числе Синюхинское месторождение. Специфической особенностью оруденения участка Лысуха является необычный состав окolorудных метасоматитов (борсодержащий везувиан, боросиликаты – да-толит  $Ca_2B_2[SiO_4]_2[OH]_2$  и окаямалит  $Ca_2B_2SiO$ ), повышенное содержание висмута (в самородной форме и в виттихените), мышьяка (леллингит, герсдорфит), а также весьма высокое отношение

Ag/Au в рудах и в самородном золоте. Приведённые особенности указывают на парагенетическую связь оруденения с гранитами белокурухинского комплекса. Возможно, этим обусловлена относительно низкая золотонность апоскарновых метасоматитов. В качестве потенциально рудоносного блока на участке следует принять область ближнего экзоконтакта гранитного массива.

Как следует из анализа россыпной золотонности Баранчинской площади, основным источником золота в россыпях служили кварцевые жи-

лы и зоны жильно-прожилковой золото-кварцевой минерализации, приуроченные к разломным (в том числе надвиговым) зонам, которые территориально локализованы в верховьях р. Баранча и её левых притоков. Это подтверждается находками кварцевых жил с видимым высокопробным золотом в плитковой части россыпи р. Светлая. Оруденение золото-медно-скарнового типа характеризуется тонкодисперсным и тонким низкопробным золотом, его вклад в формирование россыпей был, по-видимому, незначительным.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Вахрушев В. А.* Минералогия, геохимия и образование месторождений скарново-золоторудной формации. – Новосибирск : Наука, 1972. – 240 с.
2. *Гусев А. И.* Геология и золото-медно-скарновое оруденение Синоухинского рудного поля в Горном Алтае // Руды и металлы. – 1998. – № 2. – С. 79–90.
3. *Гусев А. И.* Типизация золотосодержащих скарновых объектов Горного Алтая // Успехи современного естествознания. – 2013. – № 11. – С. 108–112.
4. *Гусев Н. И., Гусев А. И.* Золотогенерирующие рудно-магматические системы Горного Алтая // Руды и металлы. – 1998. – № 2. – С. 67–78.
5. *Жариков В. А., Русинов В. Л., Маракушев А. А., Зарайский Г. П., Омеляненко Б. И., Перцев Н. Н., Расс И. Т., Андреева О. В., Абрамов С. С., Подлесский К. В.* Метасоматизм и метасоматические породы. – М. : Научный мир, 1998. – 492 с.
6. *Кряжев С. Г., Кряжев В. С., Васюта Ю. В.* Условия формирования боросиликатного оруденения скарнов по флюидным включениям в аксините // Материалы XVII Всероссийской конференции по термобарогеохимии. – Улан-Удэ : Изд-во БНЦ СО РАН, 2016. – С. 81–83.
7. *Кряжев С. Г., Фридовский В. Ю.* Флюидный режим формирования орогенных золоторудных месторо-
- ждений Яно-Колымского пояса // Тихоокеанская геология. – 2023. – Т. 42, № 6. – С. 118–130.
8. *Федак С. И., Туркин Ю. А., Гусев А. И., Шокальский С. П.* [и др.] Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1 : 1 000 000 (третье поколение). Серия Алтае-Саянская. Лист М-45. Горно-Алтайск. Объяснительная записка. – СПб. : Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2011. – 567 с.
9. *Фор Г.* Основы изотопной геологии. – М. : Мир, 1989. – 590 с.
10. *Ettlinger A. D., Meinert L. D.* Copper-gold skarn mineralization at the Veselyi Mine Siniukhinskoe District, Siberia, USSR // *Economic Geology*. – 1991. – V. 86. – P. 185–194.
11. *Matsubara S., Miyawaki R., Kato A., Yokoyama K., Okamoto A.* *Okayamalite*, Ca<sub>2</sub>B<sub>2</sub>SiO<sub>7</sub>, a new mineral, boron analogue of gehlenite // *Mineral. Mag.* – 1998. – 62. – P. 703–706.
12. *McCrea J. M.* On the isotopic chemistry of carbonates and a paleotemperature scale // *J. Chem. Phys.* 1950. – 18. – P. 849–857.
13. *Soloviev S. G., Kryazhev S. G., Dvurechenskaya S. S., Uyutov V. I.* Geology, mineralization, fluid inclusion, and stable isotope characteristics of the Sinyukhinskoe Cu-Au skarn deposit, Russian Altai, SW Siberia // *Ore Geology Reviews*. – 2019. – V. 112. – P. 103039. – DOI : <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2019.103039>

### REFERENCES

1. *Vakhrushev V. A.* Mineralogiya, geokhimiya i obrazovaniye mestorozhdeniy skarnovo-zolotorudnoy formatsii [Mineralogy, geochemistry and formation of deposits of skarn-gold ore formation], Novosibirsk, Nauka publ., 1972, 240 p. (In Russ.)
2. *Gusev A. I.* Geologiya i zoloto-medno-skarnovoye orudneniye Sinyukhinskogo rudnogo polya v Gornom Altaye [Geology and gold-copper-skarn mineralization of the Sinyukhinsky ore field in the Altai Mountains], *Rudy i metally*, 1998, No. 2, pp. 79–90. (In Russ.)
3. *Gusev A. I.* Tipizatsiya zolotosoderzhashchikh skarnovykh obyektov Gornogo Altaya [Typification of gold-bearing skarn objects of the Altai Mountains], *Uspekhi sovremennogo yestestvoznaniya*, 2013, No. 11, pp. 108–112. (In Russ.)
4. *Gusev N. I., Gusev A. I.* Zolotogeneriruyushchiye rudno-magmaticheskiye sistemy Gornogo Altaya [Gold-generating ore-magmatic systems of the Altai

- Mountains], *Rudy i metally*, 1998, No. 2, pp. 67–78. (In Russ.)
5. *Zharikov V. A., Rusinov V. L., Marakushev A. A., Zharaisky G. P., Omelyanenko B. I., Pertsev N. N., Rass I. T., Andreeva O. V., Abramov S. S., Podlesky K. V.* Metasomatizm i metasomaticheskiye porody [Metasomatism and metasomatic rocks], Moscow, Nauchnyy mir publ., 1998, 492 p. (In Russ.)
  6. *Kryazhev S. G., Kryazhev V. S., Vasyuta Yu. V.* Usloviya formirovaniya borosilikatnogo orudneniya skarnov po flyuidnym vklyucheniyam v aksinite [Conditions of formation of borosilicate mineralization of skarns by fluid inclusions in axinite], *Materialy XVII Vserossiyskoy konferentsii po termobarogeokhimii*, Ulan-Ude, BNTS SO RAN publ., 2016, pp. 81–83. (In Russ.)
  7. *Kryazhev S. G., Fridovskiy V. Yu.* Flyuidnyy rezhim formirovaniya orogennykh zolotorudnykh mestorozhdeniy Yano-Kolymnskogo poyasa [Fluid regime of formation of orogenic gold ore deposits of the Yana-Kolyma belt], *Tikhookeanskaya geologiya*, 2023, V. 42, No. 6, pp. 118–130. (In Russ.)
  8. *Fedak S. I., Turkin Yu. A., Gusev A. I., Shokalskiy S. P.* [et al.] Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossiyskoy Federatsii. Masshtab 1, 1 000 000 (tretye pokoleniye). Seriya Altaye-Sayanskaya. List M-45. Gorno-Altaysk. Obyasnitelnaya zapiska [State Geological Map of the Russian Federation. Scale 1, 1,000,000 (third generation). Altai-Sayan Series. Sheet M-45. Gorno-Altaysk. Explanatory note], St. Petersburg, Kartograficheskaya fabrika VSEGEI publ., 2011, 567 p. (In Russ.)
  9. *For G.* Osnovy izotopnoy geologii [Fundamentals of isotope geology], Moscow, Mir publ., 1989, 590 c. (In Russ.)
  10. *Ettlinger A. D., Meinert L. D.* Copper-gold skarn mineralization at the Veselyi Mine Siniukhinskoe District, Siberia, USSR, *Economic Geology*, 1991, V. 86, pp. 185–194.
  11. *Matsubara S., Miyawaki R., Kato A., Yokoyama K., Okamoto A.* Okayamalite,  $\text{Ca}_2\text{B}_2\text{SiO}_7$ , a new mineral, boron analogue of gehlenite, *Mineral. Mag.*, 1998, 62, pp. 703–706.
  12. *McCrea J. M.* On the isotopic chemistry of carbonates and a paleotemperature scale, *J. Chem. Phys.* 1950, 18, pp. 849–857.
  13. *Soloviev S. G., Kryazhev S. G., Dvurechenskaya S. S., Uytov V. I.* Geology, mineralization, fluid inclusion, and stable isotope characteristics of the Sinyukhinskoe Cu-Au skarn deposit, Russian Altai, SW Siberia, *Ore Geology Reviews*, 2019, V. 112, pp. 103039. – DOI : <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2019.103039>

Статья поступила в редакцию 11.04.25; одобрена после рецензирования 05.05.25; принята к публикации 05.05.25.  
The article was submitted 11.04.25; approved after reviewing 05.05.25; accepted for publication 05.05.25.