DOI:10.47765/0869-7175-2023-10014

УДК 553.3`3/`9
© Коллектив авторов, 2023

Пирит эпитермального Au-Ag месторождения Жильное (Чукотский АО): морфология, стадийность образования, продукты преобразования

Месторождение Жильное относится к Амгуэмо-Канчаланской металлогенической зоне, в пределах которой существуют различные по показателю Ag/Au типы золото-серебряных руд. Они были сформированы на различных стадиях минералообразования. Изучение особенностей пирита может быть использовано для понимания условий формирования месторождения и совершенствования методики их прогнозирования в пределах зоны. Цель работы – выделение основных форм нахождения и генераций пирита, воссоздание стадийности минералообразования. В результате были обнаружены разнообразные морфологические типы и формы нахождения пирита (одиночные кристаллы, зёрна округлой формы, сплошные зоны пиритизации, сростки, формы замещения, коррозии и преобразования) и выделены пять его генераций. В пределах месторождения и Амгуэмо-Канчаланской зоны существуют 3 продуктивные стадии минералообразования, из них серебряно-золотые руды месторождения Жильное были сформированы на серебро-сульфидно-полиметаллической стадии.

Ключевые слова: пирит, золото, серебро, руды, эпитермальные месторождения, Охотско-Чукотский вулканический пояс, Чукотка.

ГОЛДЫРЕВ ВИТАЛИЙ НИКОЛАЕВИЧ, геолог[1], аспирант[2], vg121297@yandex.ru

ОСОВЕЦКИЙ БОРИС МИХАЙЛОВИЧ, доктор геолого-минералогических наук, профессор, руководитель центра коллективного пользования уникальным научным оборудованием, заведующий лабораторией[2], opal@psu.ru

НАУМОВ ВЛАДИМИР АЛЕКСАНДРОВИЧ, доктор геолого-минералогических наук, заместитель директора[3], профессор[2], naumov@psu.ru

АРТЕМОВ АРТЕМ ЛЕОНИДОВИЧ, магистрант[2], artiomarteomow@yandex.ru

ЗАВОДОВ АНДРЕЙ ВАЛЕНТИНОВИЧ, магистрант[2], zavodovav_31@mail.ru

[1] ООО «ГРК “Быстринское”», г. Чита

[2] Пермский государственный национальный исследовательский университет (ПГНИУ), г. Пермь

[3] Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт геологии и геохимии им. академика А. Н. Заварицкого, г. Екатеринбург

Pyrite of the epithermal Zhilnoe Au-Ag deposit (Chukotka Autonomous Okrug (AO): the morphology, formation stages, and transformation products

V. N. GOLDYREV[1, 2], B. M. OSOVETSKY[2], V. A. NAUMOV[2, 3], A. L. ARTEMOV[2], A. V. ZAVODOV[2]

[1] GRK “Bystrinskoe”, Chita

[2] Perm State National Research University, Perm

[3] The Zavaritsky Institute of Geology and Geochemistry, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (UB RAS), Yekaterinburg

The Zhilnoye ore deposit belongs to the Amguema-Kanchalan metallogenic zone with gold-silver ores of different types in terms of the Ag/Au index. They were formed at various stages of the mineral formation. Studying the pyrite features can be used to understand the formation conditions of the mineral deposits and to improve the methodology of their forecasting within the zone. The objective of the work is to identify the main occurrence forms of pyrite and the pyrite generations and to reconstruct the staging of the mineral formation. As a result, various morphological types and occurrence forms of the pyrite were found (single crystals; rounded grains; zones of massive pyritization; intergrowths; and forms of substitution, corrosion, and transformation) and 5 pyrite generations were identified. Within the ore deposit and the Amguema-Kanchalan zone as a whole, 3 productive stages of the mineral formation took place, of which the silver-gold ores of the Zhilnoye deposit were formed at the silver-sulfide-polymetallic stage.

Key words: pyrite, gold, silver, ores, epithermal deposits, Okhotsk-Chukotka volcanic belt, Chukotka.

Введение. Месторождение Жильное относится к Амгуэмо-Канчаланской металлогенической зоне [2, 19]. В её пределах расположены три Au-Ag эпитермальных месторождения (Валунистое, Горное, Жильное), а также множество золото-полиметаллических проявлений (Кремовое, Раздольное, Донное, Лунное, Центральное) различных типов минерализации. На 2020 г. суммарные запасы (Indicated + Inferred) условного золота месторождений района составляют около 46,3 т, добыто около 25 т золота. Апробированные ЦНИГРИ прогнозные ресурсы золота Валунистого рудного узла составляют: категории P_1 – 13 т, P_2 – 100 т (при средних содержаниях золота 9,9–10,6 г/т). В сумме ресурсы и запасы (добытые, разведанные и оценённые) составляют 180 т золота. Однако ресурсный потенциал района далеко не исчерпан – результаты полевых работ, выполненных различными предприятиями, свидетельствуют о высокой перспективности данной территории на выявление мелких и средних месторождений золото-серебряных руд, сопоставимых по масштабам с главным месторождением – Валунистое. В то же время нельзя исключать возможности выявления новых крупных объектов.

Руды объектов различаются по показателю Ag/Au: серебряно-золотые руды месторождения Жильное – более 50, золото-серебряные руды месторождений Валунистое и Горное – 10–50. По нашему мнению, данные руды относятся к различным продуктивным стадиям минералообразования.

Настоящая работа направлена на изучение особенностей пирита, актуальна для понимания условий формирования месторождения Жильное и совершенствования методики прогнозирования других проявлений в пределах Амгуэмо-Канчаланской металлогенической зоны. Цель работы – выделение основных морфологических типов и генераций пирита, воссоздание стадийности минералообразования на месторождении Жильное.

Объект исследования. Материалы по геологии района месторождения содержатся в научных работах [1, 2, 4, 15, 16, 19 и др.] и производственных отчётах (В. П. Шабалин, Н. И. Романов, Е. С. Андреева, П. П. Полковой, В. П. Худоногов и др.).

Месторождение Жильное расположено в пределах субширотного сегмента Охотско-Чукотского вулканогенного пояса (ОЧВП), представляющего собой пограничную структуру в области максимального сжатия земной коры на северо-восточной окраине Азии, обусловленного расширением Тихоокеанской плиты. В свою очередь, ОЧВП наложен на вещественные комплексы Кони-Танюрерской складчатой системы Корякско-Камчатской складчатой области [1, 15].

В геологическом строении месторождения принимают участие вулканогенные и вулканогенно-обломочные образования амгеньской толщи (K_2am_3) и локально развитые отложения экитыкинской свиты (K_2ek), прорванные плутоническими интрузивами, субвулканическими телами и дайками экитыкинской вулкано-плутонической ассоциации. Породы рудовмещающей амгеньской толщи представлены лавовыми покровами дацитов с прослоями лапиллиевых туфов и лавобрекчий дацитового состава, породы экитыкинской свиты – вулканитами андезит-базальтового состава.

В геолого-структурном плане месторождение расположено в зоне меридиональных дугообразных разломов, пересекающих фланг вулканокупольной структуры и сопровождаемых полями гидротермально изменённых пород, кварцевыми жилами и зонами прожилкового окварцевания с установленной золото-серебряной минерализацией. Характерной особенностью месторождения Жильное является резкое преобладание Ag над Au. Среднее значение Ag/Au по результатам повариантного подсчёта запасов составляет 237,4–244,9.

На месторождении Жильное распространены чёрные кварц-сульфидные прожилки (рис. 1, А). В центре месторождения находится зона гидротермальных брекчий с сульфидно-кварцевым цементом (см. рис. 1, Б, В). Чёрный цемент этих брекчий представляет собой гидротермальные образования, аналогичные таковым в прожилках. Чёрные кварц-сульфидные прожилки перекрывают более ранние безрудные кварц-адуляровые прожилки предыдущей стадии минералообразования, а также внедряются в них (см. рис. 1, Г). Суммарно они характеризуют развитую на месторождении серебро-сульфидно-полиметаллическую стадию минералообразования.

Предшественники относили брекчии к эксплозивным образованиям и считали их рудовмещающими. Подобные брекчии встречаются на многих вулканогенных объектах [16, 18], в том числе и на соседнем месторождении Валунистое, однако, в отличие от Жильного, их состав пирит-гематитовый.

Результаты кернового и бороздового опробования указывают на высокое содержание благородных

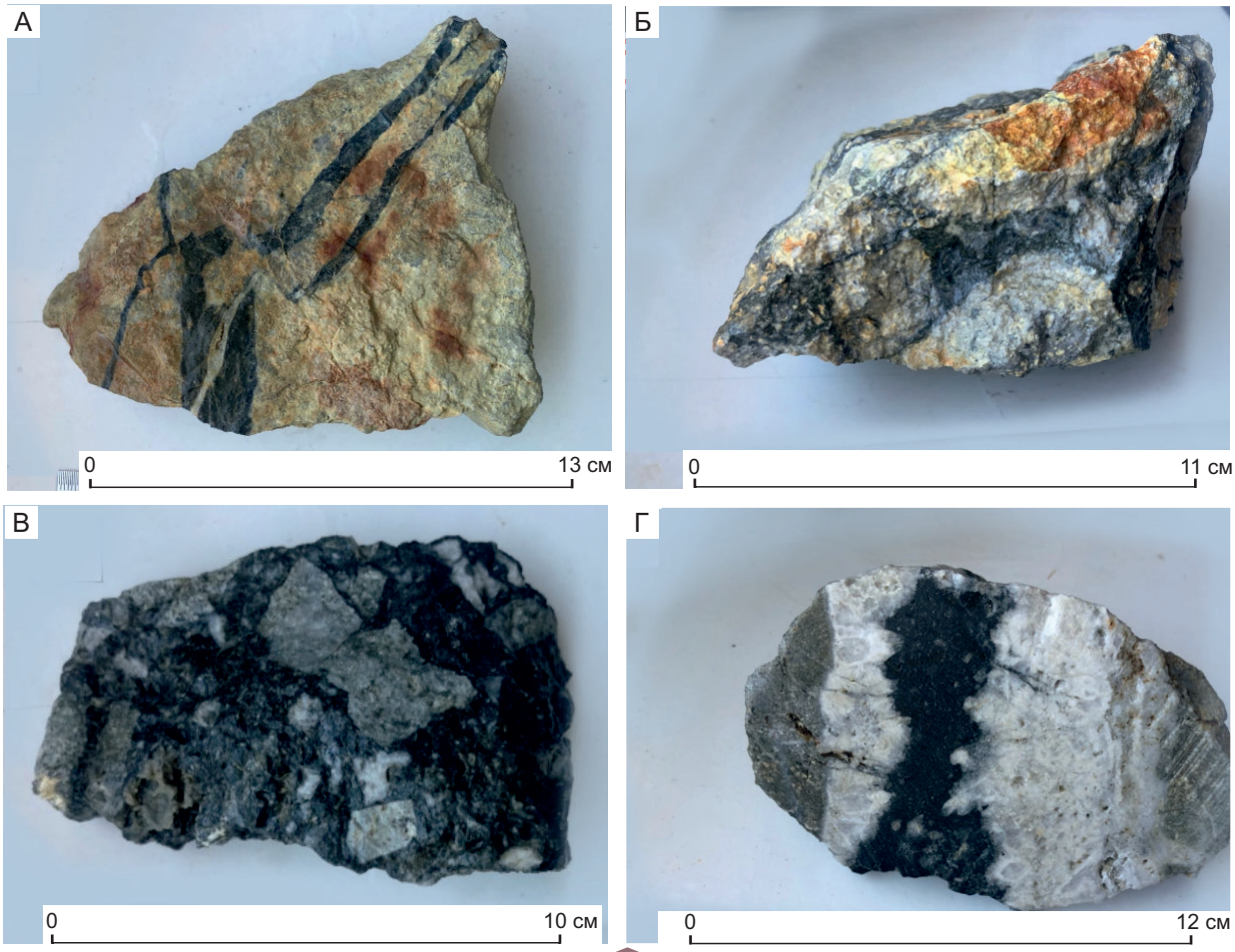


Рис. 1. Проявление серебро-сульфидно-полиметаллической стадии:

А – кварц-сульфидные прожилки; Б, В – кварц-сульфидный цемент гидротермальных брекчий; Г – полосы и просечки в жилах дорудных стадий

металлов в данных брекчиях (в г/т): Au – до 20, Ag – до 3500. Максимальные концентрации $Au_{усл.}$ (40–90 г/т) отмечаются в центральной части трубок брекчий.

Ранее нами [8] было установлено, что существует пространственная связь брекчий и благороднометалльной минерализации, причём брекчии играют роль коллекторов оруденения и могут рассматривать как косвенный поисковый признак.

Методика исследования. Полевые работы на месторождении Жильное были выполнены В.Н. Голдыревым в процессе проведения геологоразведочных работ ООО «Канчалано-Амгуэмская площадь» и включали отбор образцов из полотна траншеи и канав. В частности, были взяты образцы гидротермальных образований (жил, брекчий, зон прожилкования) различных стадий минералообразования, а также вмещающих пород, представленных метасоматически изменёнными дацитами и туфами.

Лабораторные работы были проведены в лаборатории осадочных полезных ископаемых (ЛОПИ) кафедры поисков и разведки полезных ископаемых и в Центре коллективного пользования (ЦКП) Пермского государственного национального исследовательского университета.

Минеральный состав пород определён в шлифах (аналитик Е.М. Томилина) с использованием поляризационного микроскопа Nikon Eclipce LV 100 Pol (Nikon, Япония). Формы нахождения, морфология кристаллов, вещественный состав образцов проанализированы в аншлифах (аналитик

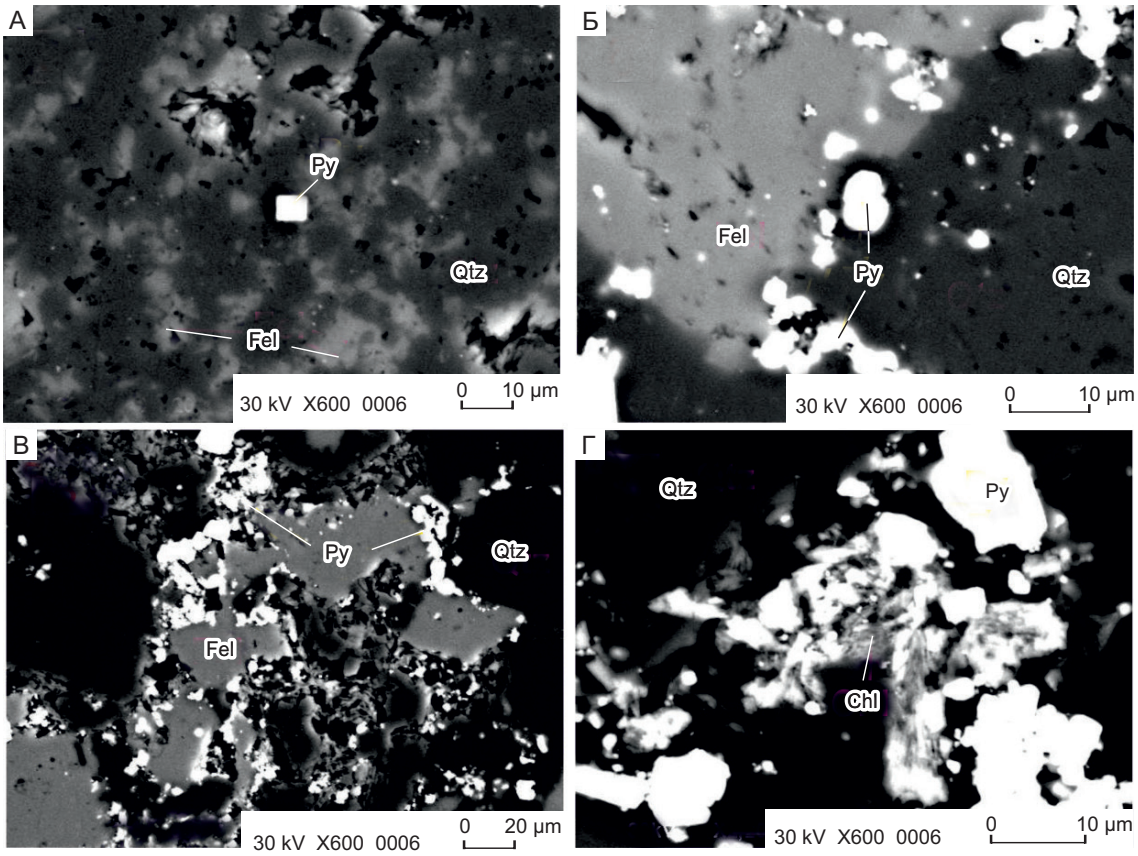


Рис. 2. Выделения пирита:

А – одиночный кристалл пирита кубической формы в кварц-полевошпатовой зоне; Б – скопления мелких зёрен пирита округлой формы на контакте кварца и полевого шпата; В – сплошная зона пиритизации на контакте кварца и полевого шпата; Г – зона интенсивной пиритизации с хлоритом; Py – пирит, Qtz – кварц, Fel – полевой шпат, Chl – хлорит

Б. М. Осовецкий) с использованием СЭМ JSM 7500F (Jeol) с холодной эмиссией и JSM 6390LV (Jeol) с ЭДС INCA ENERGY 350 (Oxford Instruments).

Результаты. Морфологические типы и формы нахождения пирита. Пирит исключительно широко распространён в породе, среднее содержание в рудах составляет 3 %. Были выделены следующие морфологические типы и формы нахождения пирита.

1. Одиночные кристаллы, часто кубической формы размером до 50 мкм (рис. 2, А).

2. Мелкие кристаллики и зёрна округлой формы, образующие различные скопления (см. рис. 2, Б). Округлые, овальные формы пирита характерны для многих месторождений палеогидротермальных рудообразующих систем [14]. Им обычно приписывается метаколлоидное происхождение.

3. Сплошные зоны пиритизации (см. рис. 2, В, Г) в виде цепочек мелких кристалликов или на контакте породообразующих минералов (кварца и полевых шпатов).

4. Сростки с другими минералами: галенитом, халькопиритом, сфалеритом (рис. 3, А). Наиболее часто отмечаются сростки с галенитом.

5. Формы замещения титансодержащих железистых минералов (см. рис. 3, Б–Г). Пирит наблюдается во вмещающих породах в виде зёрен, расположенных по краям выделений (см. рис. 3, Б) титансодержащих минералов (рутила, сфена). При условии более интенсивного замещения описываемый пирит образует скелетообразные зернистые агрегаты с остатками рутила (см. рис. 3, В). Кроме того, встречаются овальные скопления мелких зёрен (см. рис. 3, Г).

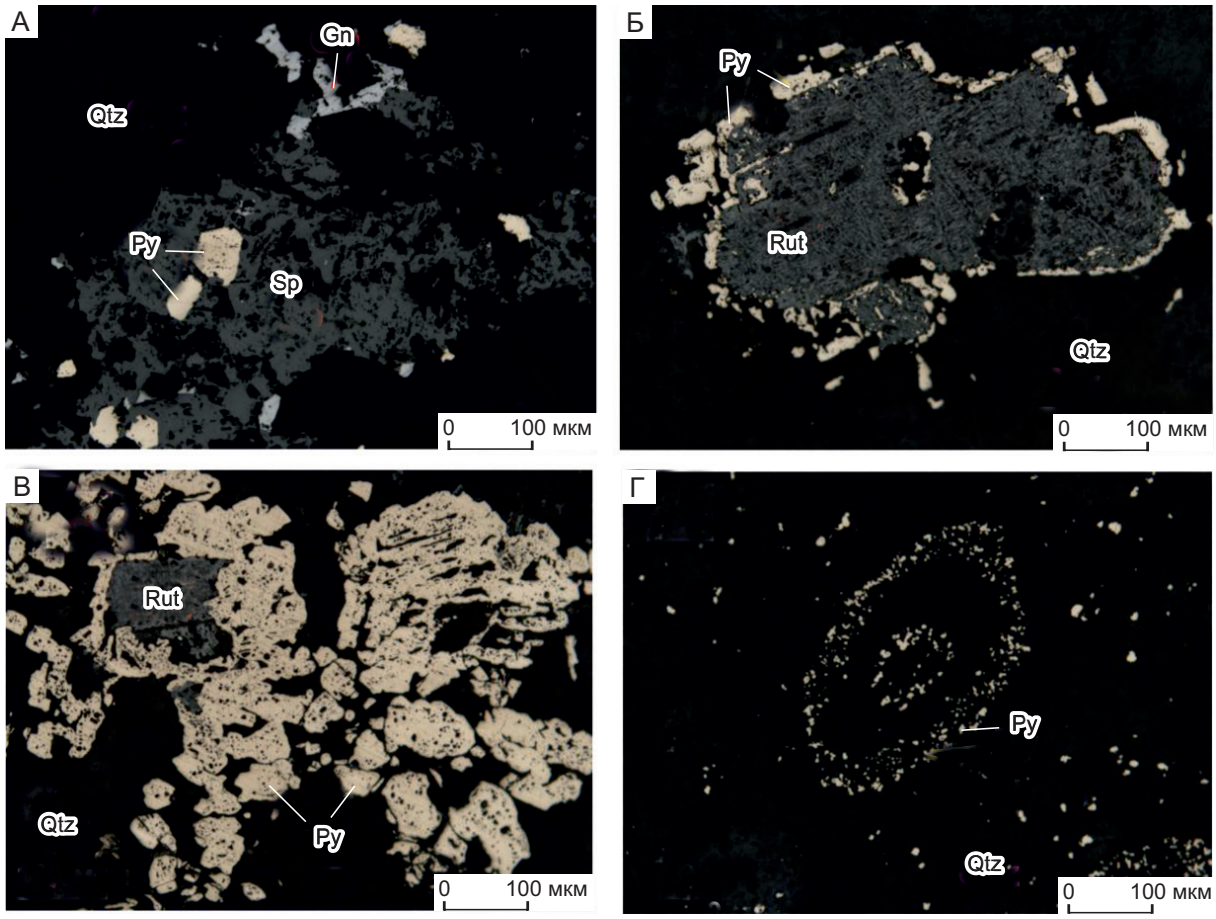


Рис. 3. Выделения пирита:

А – сросток пирита с галенитом и сфалеритом; Б – пирит, расположенный по краю рутилового агрегата; В – зернистый агрегат пирита с остатками рутила; Г – тонкозернистый агрегат пирита в виде «кругов»; Py – пирит, Qtz – кварц, Gn – галенит, Sp – сфалерит, Rut – рутил

6. Корродированные формы. Пирит нередко сильнотрещиноватый, иногда встречаются интенсивно «раздробленные» кристаллы. Трещины в пирите часто заполнены минералами благородных металлов, местами содержат включения и прожилковидные выделения акантита (рис. 4, А) и самородного серебра. Иногда акантит замещает пирит (см. рис. 4, Б) и заполняет пустоты в нём (см. рис. 4, В). Наблюдаются признаки регенерации пирита – обрастания зёрен каймой следующей генерации. Кроме того, пирит образует кристаллы корродированной кубической формы либо их сростки, а также корродированные пентагондодекаэдры (см. рис. 4, Г).

Минералы благородных металлов в пирите. В кристаллах пирита часто наблюдаются включения акантита размером более 10 мкм, которые занимают пустоты (см. рис. 4, В). Вероятно, они были захвачены в процессе роста кристалликов пирита. Нередко акантит также присутствует в кристаллах халькопирита и галенита, обрастает их в виде каёмок, корродирует эти минералы, иногда выполняет промежутки между зёрнами кварца.

Химический состав включений акантита в пирите, определённый микрозондовым методом, несколько искажает истинное соотношение элементов из-за влияния компонентов вмещающего пирита (особенно Fe и S), однако даёт вполне достоверное представление о диагностике данного минерала (табл. 1).

Кроме того, нередко в пирите присутствуют микровключения акантита размером менее 10 мкм.

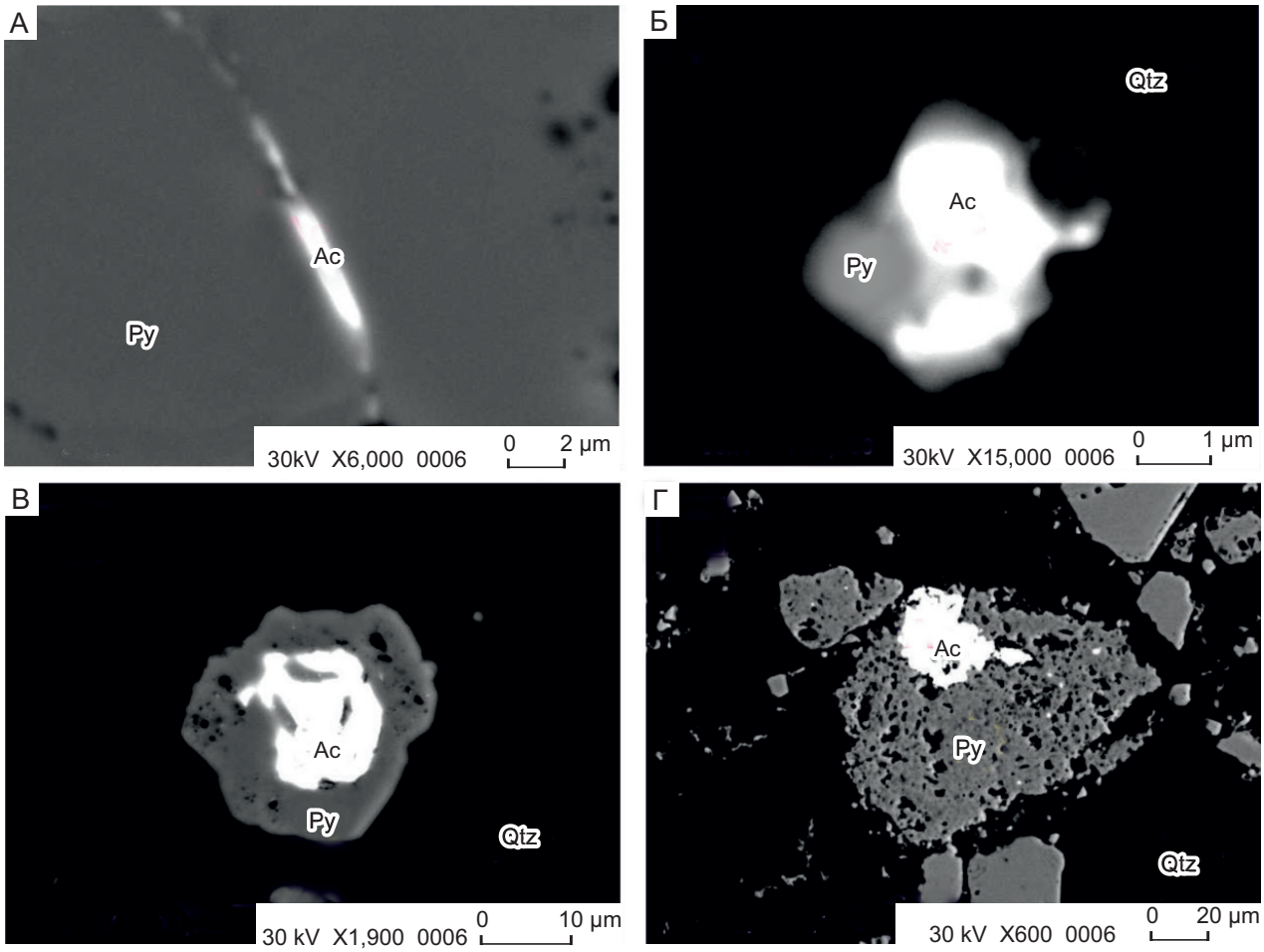


Рис. 4. Акантит в пирите:

А – акантит в трещине пирита; Б – замещение пирита акантитом; В – акантит в пирите; Г – акантит в корродированном пирите; Py – пирит, Qtz – кварц, Arg – акантит

Они обычно имеют неправильную или удлинённую, нередко овальную форму, приурочены к микротрещинам, а также встречаются на контактах зёрен кварца и пирита (см. рис. 4, А). Их диагностика представляет определённые трудности в связи с тем, что основными определяемыми микрозондовым методом элементами являются Fe и S, то есть компоненты матричного пирита. Поэтому диагностика таких включений производилась на основе определения содержаний только двух элементов – Au и Ag. Во всех случаях, кроме одного, из этих элементов во включениях было обнаружено только серебро, что позволяет сделать однозначный вывод о принадлежности включения к акантиту.

Исключением является один анализ, в котором наряду с серебром обнаружено также золото (рис. 5) в соотношении Au:Ag = 1:1,4. Данное включение может быть диагностировано как электрум или кюстелит, возможными вариантами являются также сульфиды Ag и Au (например, петровскаит или ютенбогардтит).

На контактах зёрен пирита и халькопирита встречаются минералы золота, представленные электрумом. Форма обнаруженных золотин чаще всего близка к изометричной, обычно округлая, но присутствуют и удлинённые выделения.

Размер золотин достигает 0,7 мм, но, как правило, колеблется в пределе 1–20 мкм, существуют и более мелкие разности. Нередко наряду с зёрнами

1. Химический состав включений акантита в пирите

Элемент	1	2	3	4	5	6
Fe	0,60	1,14	1,81	1,05	6,69	4,40
S	9,52	9,74	12,69	10,98	15,54	13,41
As	0,63					
Ni						0,09
Co						
Zu		0,13		0,14		0,55
Cu	0,27		0,17			
Hg		0,28				0,24
Bi						0,54
Pb				0,64		0,48
Au	0,45					
Ag	88,53	88,70	84,94	87,19	77,77	76,68
Cd						3,61
Se			0,39			

Примечание. 1–6 – номера выполненных анализов.

размером около 10 мкм «распылены» субмикроскопические частицы, в составе которых присутствуют Au и Ag.

Генерации пирита. Анализ взаимоотношений различных форм нахождения пирита с другими минералами позволил выделить следующие его генерации.

Пирит-1 (первая генерация) представлен зёрнами, расположенными по краям выделений титансодержащих минералов (рутила, сфена). Они распространены во вмещающих породах. Часто встречаются кольцеобразные гнёзда (рис. 6, А).

Пирит-2 (вторая генерация) дорудного комплекса присутствует в виде тонко- и мелковкрапленных скоплений в обломках окварцованных пород. Пирит образует идиоморфные и гипидиоморфные зёрна, вкрапленные во вмещающую породу. Они отчётливо выделяются по характерным прямоугольным и пятиугольным сечениям.

Пирит-3 (третья генерация) раннего рудного комплекса имеет разнообразные формы выделений.

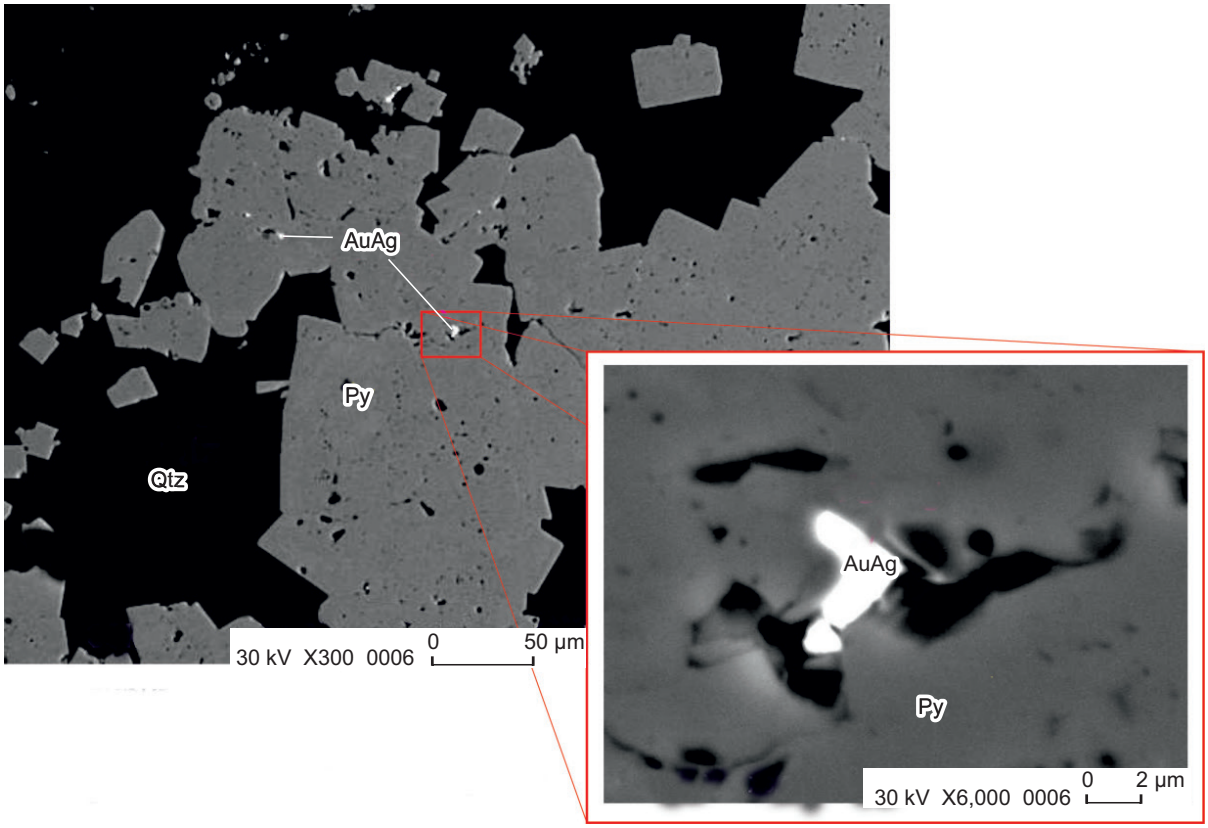


Рис. 5. Высокосеребристое золото в пирите:

Py – пирит, Qtz – кварц, AuAg – высокосеребристое золото

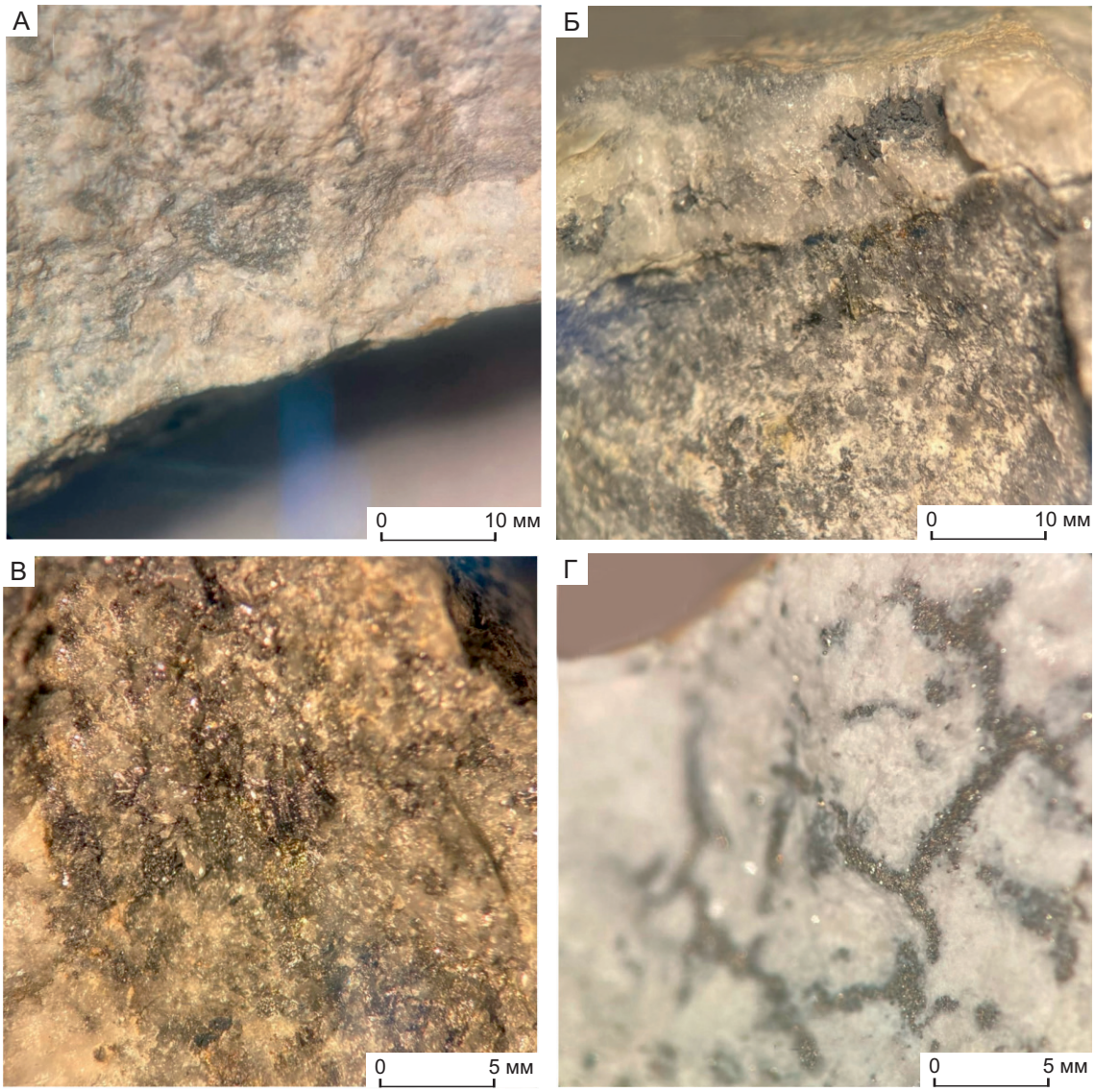


Рис. 6. Генерации пирита:

А – кольцеобразные гнёзда пирита; Б – вкрапленники пирита и галенита в прожилке; В – сростки пирита и галенита; Г – трещины, заполненные пиритом

Как правило, представлен он бластозёрнами с ситовидным сетчатым строением, расположенными по прожилкам (см. рис. 6, Б). Характерны как мономинеральные агрегаты, так и сростки с халькопиритом, сфалеритом и галенитом (см. рис. 6, В). В прожилках отмечен мелкозернистый пирит и халькопирит в тесном срастании с галенитом. Прожилковидные выделения галенита вторичны по отношению к данной генерации пирита и секут его. Пустоты в пирите выполнены вмещающей породой, реже галенитом и крайне редко сфалеритом. Иногда пирит является цементом, заполняя трещины и пустоты во вмещающей породе (см. рис. 6, Г).

Более поздние генерации развиты лишь на отдельных участках месторождения. Их описание даётся с использованием материалов производственных отчётов В. П. Шабалина, В. П. Худоногова.

Пирит-4 (четвёртая генерация) более позднего рудного комплекса отмечается в кварцевых жилах в виде бедной, неравномерно рассеянной мелкой

и тонкой вкрапленности идиоморфных и неправильных мономинеральных зёрен, реже кристаллических сростков. Иногда образует быстро выклинивающиеся послойные тонковкрапленные скопления.

Пирит-5 (пятая генерация) пострудного комплекса отмечается в более поздних минеральных образованиях (кварц-карбонатных жилах и брекчиях). Наряду с редкой рассеянной, преимущественно тонкой вкрапленностью иногда отмечаютсяболее заметные локальные скопления пирита, в том числе в виде умеренной вкрапленности относительно более крупных кристаллов, преимущественно пентагон-додекаэдрической формы.

Наиболее распространёнными генерациями на месторождении являются пирит-2 и пирит-3.

Стадийность рудообразования. Тема стадийности минералообразования в пределах Амгуэмо-Канчаланской металлогенической зоны рассматривалась в научных работах [3, 4, 9] и производственных отчётах по данной территории. Анализ результатов исследований, а также полевые наблюдения и комплексный подход к изучению минерального состава пород и руд и их взаимоотношений друг с другом позволили представить схему очерёдности осаждения рудных минералов в пределах месторождения Жильное, которая включает не менее 6 стадий (табл. 2).

Первая стадия – *постмагматическая* – характеризуется гидротермальными преобразованиями титансодержащих железистых минералов. Формируется пирит первой генерации за счёт титаномагнетита или ильменита, образующего с магнетитом структуры распада твёрдых растворов. Железо выделяется в виде пирита, а титан – в виде рутила и сфена. Пирит наблюдается во вмещающих породах в виде зёрен, расположенных по краям рутиловых агрегатов.

Данные образования обнаружены только в образцах месторождения Жильное. По-видимому, это связано с глубоким эрозионным срезом.

Вторая стадия – *предрудная метасоматическая* – характеризуется хлорит-гидрослюдисто-кварцевым метасоматозом. В эту стадию были образованы типичные кварц-адуляровые жилы и прожилки разнообразной морфологии с широким распространением брекчий, в том числе и эксплозивных. Формирование их сопровождалось пропилитизацией, то есть хлорит-эпидотовыми изменениями пород в околожильном пространстве, что хорошо согласуется с достаточно высокой температурой их образования (до 350 °С), судя по результатам микротермометрических исследований флюидных включений в кварцах [4]. На этой стадии образовались единичные кристаллы пирита второй генерации, как правило, кубической формы. На месторождении стадия представлена наиболее полно и широко, в последующем на неё накладываются продуктивные стадии.

Третья стадия – *серебро-сульфидно-полиметаллическая (продуктивная)* – характеризуется образованием сульфидной рудной минерализации. Вначале происходит неоднократное дробление жил с отложением преимущественно тонкопрожилковой рудной минерализации, и отлагаются сульфиды (пирит третьей генерации, сфалерит, халькопирит, галенит), затем минералы благородных металлов (акантит, полибазит, электрум). Принадлежность минералов благородных металлов к данной стадии подтверждается исследованиями химического состава пирита цемента брекчий – во всех зёрнах присутствует серебро, в единичных случаях было обнаружено золото.

Руды серебро-сульфидно-полиметаллической стадии в пределах Амгуэмо-Канчаланской металлогенической зоны, как правило, представлены мелкозернистыми кварц-адуляровыми жилами с тонкими, нитевидными прожилками и просечками рудных минералов [3, 4]. Высокий показатель Ag/Au (более 50) характерен для руд этой стадии. С этим периодом связано формирование серебряно-золотого оруденения месторождения Жильное.

На флангах месторождения, где эрозионный срез менее глубокий, встречаются образования четвёртой *(золото-серебро-сульфосолевая)* и пятой *(кальцит-флюоритовая)* стадий. Данные стадии также являются продуктивными, однако их вклад в формирование оруденения незначительный.

Четвёртая стадия – *золото-серебро-сульфосолевая* – характеризуется образованием электрума, в составе которого преобладает золото, при значительно меньшем количестве акантита и серебросодержащих сульфосолей, а также самородного серебра, Sb и Se- содержащими сульфосолями и амальгамами Ag и Au [3, 9, 10, 13]. Стадия имеет очевидный реювенационный характер, то есть формировалась в результате разрушения и переотложения рудных образований третьей стадии, что не исключает возможности дополнительного

2. Стадийность формирования рудных минералов месторождения Жильное

Минерал	Процесс					
	Гидротермальный					Экзогенный
	Дорудный		Рудный			
	Стадии					
	Постмагматическая	Предрудная метасоматическая	Серебро-сульфидно-полиметаллическая	Золото-серебро-сульфосолевая	Кальцит-флюоритовая	
Пирит	———	———	▬▬	——	——	
Магнетит	———					
Рутил	———					
Сфен	———					
Марказит			------			
Арсенопирит			------			
Сфалерит			———			
Халькопирит			———			
Галенит			———			
Акантит			▬▬	-----	-----	
Полибазит			———	-----		
Минералы системы Au-Ag			—	----	----	
Гидроксиды железа						▬▬

Примечание. Минерал: ▬▬ – главный, —— – второстепенный, ----- – редкий.

привноса гидротермальными растворами благородных металлов и других элементов: ртуть, селен, сурьма и др. В любом случае при пространственном их совмещении отмечается появление бонанцовых рудных интервалов с высоким содержанием золота.

Для стадии характерны типичные для эпитермальных месторождений колломорфно-полосчатые и параллельно-зональные текстуры [21–23], низкие значения индикаторного отношения Ag/Au, главным образом 10–50, то есть доминирование золота в рудах, а также появление проб (локальных интервалов) с высокими содержаниями золота (более 100 г/т). Рудные образования этой стадии слабо развиты в пределах месторождения Жильное, однако они являются доминирующими в пределах Амгуэмо-Канчаланской металлогенической зоны.

Кальцит-флюоритовая стадия характеризуются образованием карбонат-кварцевых, флюорит-карбонат-кварцевых жил и прожилков, появление которых связывают [3] с очередным тектоническим импульсом. В ходе данного процесса не происходят заметные преобразования рудных минералов, так как содержащаяся в кальците рудная минерализация (пирит, сфалерит, иногда электрум), вероятно, являются реликтовыми, а не продуктами переотложения. Однако среди минералогических типов гидротермальных образований месторождения Жильное наиболее высокие содержания серебра и золота (в среднем соответственно 275,7 и 1,16 г/т) фиксируются именно

3. Преобразование минерального состава в результате криогенеза

Минерал	Содержание, мас.%		
	Исходный состав	Состав в результате промораживания-оттаивания	Разница
Пирит	77	28	-49
Сфалерит	2	1	-1
Марказит	10	3	-7
Халькопирит	3	1	-2
Магнетит	8	8	0
Гидроксиды	0	59	+59
Сумма	100	100	

в кальцит-кварцевых жилах. Не исключено, что гидротермальные растворы данной стадии также привносили благороднометалльную минерализацию.

Шестая стадия – *гипергенная* – характеризуется образованием гидроксидов железа как продуктов окисления пирита. Гипергенные изменения руд на месторождении Жильное проявлены относительно слабо. Вода в ручье, размывающем рудную зону, имеет бурую окраску. Таким образом, бурожелезняковые образования (коры выветривания, ржавые выделения, кирасы) могут рассматриваться в качестве косвенного поискового признака на оруденение в пределах изучаемой территории и других районах Северо-Востока России [5, 7, 6].

Преобразование пирита. Нами был проведён эксперимент по промораживанию-оттаиванию рудных минералов месторождения Жильное, моделирующий характерные особенности климата и их влияние на гипергенную стадию минералообразования на данной территории. В результате длительного воздействия агентов выветривания минеральный состав концентрата значительно изменился (табл. 3). По данным рентгенофлюоресцентного анализа, процентное содержание сульфидов заметно сократилось (в %): пирита – на 49, марказита – на 7, халькопирита – на 2, сфалерита – на 1. Количество магнетита осталось неизменным. Пирит является наименее устойчивым в гипергенных условиях минералом месторождения. Произошло массовое образование гидроксидов железа, содержание которых после 8 циклов промораживания-оттаивания составило более 50 %.

Образовавшиеся в ходе эксперимента гидроксиды железа представлены следующими морфологическими группами (рис. 7).

1. Псевдоморфозы по сульфидным минералам (пирит, сфалерит, марказит, халькопирит, магнетит). Окраска, как правило, ярко-бурая, красновато-бурая (см. рис. 6, В, Г). Представлены натёчно-почковидными агрегатами, часто образуют рыхлые и комковатые скопления, иногда плотные массы. Данные образования цементируют мелкие зёрна сульфидов, в результате чего образуются агрегаты размером более 1 мм.

2. Агрегаты тёмно-бурого цвета. Разрушаются при надавливании иглой.

3. Железистые плёнки и налёты. Окраска, как правило, буровато-чёрная. Местами плёнки прозрачные. Иногда налёты полностью капсулируют мелкие минералы [12, 20]. В них могут содержаться минералы благородных металлов как наиболее устойчивые к гипергенным процессам [11].

Заключение. На месторождении Жильное формы нахождения пирита достаточно разнообразны: одиночные кристаллы (куб и пентагон-додекаэдр), зёрна округлой формы, сплошные зоны пиритизации, сростки с другими минералами. Широкое развитие форм замещения и корродированных форм говорит о многостадийной минерализации, которая развивалась в тесной связи с гидротермальным процессом.

Пирит является самым распространённым рудным минералом на месторождении и сквозным минералом в рудно-формационном процессе, поскольку входит в состав генетически разнородных комплексов минералообразования. Всего выделены

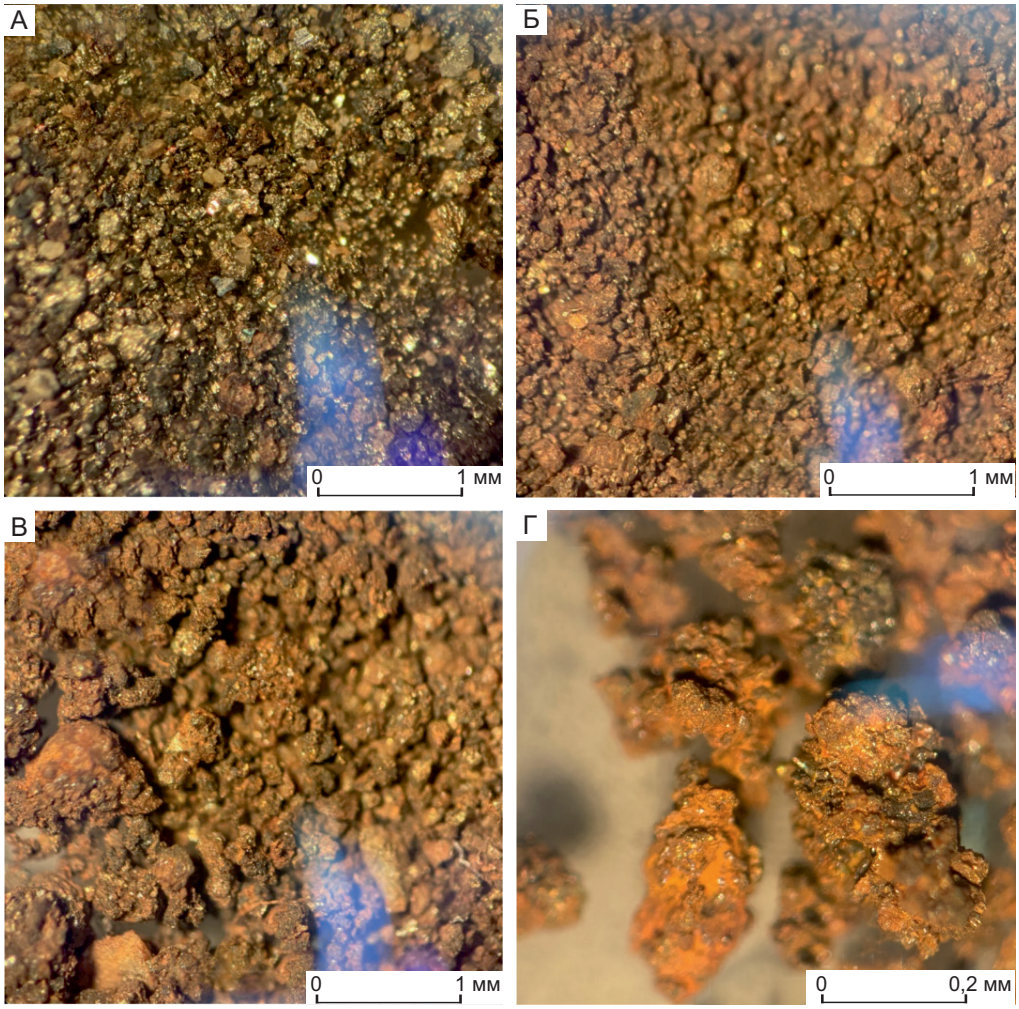


Рис. 7. Внешний вид исходных и преобразованных концентратов сульфидов:

А – исходный состав концентрата; Б – изменённый состав; В, Г – сцементированные железистым цементом сульфиды

пять генераций пирита. По результатам микроскопических исследований было продемонстрировано, что третья генерация пирита (пирит-3) связана с благороднометалльной минерализацией. Формы выделений пирита-3 разнообразны: идиоморфные и неправильные зёрна без выраженных кристаллических ограничений, кристаллические сростки и тонкозернистые выделения. Среди очень тонких вкрапленных скоплений пирита, обычно приуроченных к обломкам окварцованных пород, часто наблюдаются округлые формы метаколлоидного происхождения. Именно зёрна пирита третьей генерации часто бывают корродированы. Пустоты и трещины в кристаллах нередко заполнены акантитом.

На месторождении Жильное, в отличие от других известных объектов Амгуэмо-Канчаланской зоны, в химическом составе минералов благородных металлов доминирует серебро. Вероятно, руды месторождения Жильное и других объектов (Валунистое, Горное) были сформированы на различных стадиях минералообразования. До сих пор в большинстве фондовых материалов существовали представления об одной (золото-серебро-сульфосолевой) продуктивной стадии минералообразования в пределах металлогенической зоны.

Анализ результатов геологоразведочных работ на территории месторождения Жильное и материалов минералого-петрографического изучения отобранных образцов позволил авторам данного

исследования выделить три продуктивные стадии минералообразования. Кроме того, было установлено широкое развитие полисульфидной минерализации, которая характерна для объектов с глубоким эрозионным срезом.

Серебряно-золотые руды (серебряно-золотое отношение более 50) месторождения Жильное были сформированы на серебро-сульфидно-полиметаллической стадии минералообразования. Кварц-сульфидные жилы и брекчии данной стадии играют роль коллектора оруденения, на них местами накладывались последующие (золото-серебро-сульфосолевая и кальцит-флюоритовая) стадии минералообразования. Данные стадии слабо развиты в пределах месторождения, что объясняется глубоким эрозионным срезом.

Наиболее значительное преобразование пирита происходит на гипергенной стадии, для которой характерна дезинтеграция пирита с формированием гидроксидов железа. Таким образом, интенсивность преобразования пирита в настоящее время обусловлена криогенными процессами. Сформированные на территории бурожелезняковые образования несут признаки рудной минерализации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Белый В. Ф.* Геология Охотско-Чукотского вулканогенного пояса. – Магадан : СВКНИИ ДВО РАН, 1994. – 76 с.
2. *Волков А. В., Гончаров В. И., Сидоров А. А.* Месторождения золота и серебра Чукотки. – Магадан : СВКНИИ ДВО РАН, 2006. – 221 с.
3. *Волков А. В., Прокофьев В. Ю., Винокуров С. Ф.* и др. Эпитермальное Au-Ag месторождение Валунистое (Восточная Чукотка, Россия): геологическое строение, минералого-геохимические особенности и условия рудообразования // Геология рудных месторождений. – 2020. – Т. 62, № 2. – С. 107–133.
4. *Волков А. В., Прокофьев В. Ю., Сидоров А. А.* и др. Условия формирования эпитермальной Au-Ag минерализации Амгуэмо-Канчаланского вулканического поля (Восточная Чукотка) // Вулканология и сейсмология. – 2019. – № 5. – С. 68–80.
5. *Голдырев В. Н.* Прогнозирование и поиск золотого оруденения в Амгуэмо-Канчаланской металлогенической зоне (Чукотка) // Вестник Пермского университета. Геология. – 2022. – Т. 21, № 1. – С. 72–89.
6. *Голдырев В. Н., Артемов А. Л., Заводов А. В., Коротаев В. С.* Аргиллизированные породы как критерий прогнозирования золотого оруденения в пределах рудного поля Кумроч (Центральная Камчатка) // Аэрокосмические методы в геологии : сборник научных статей IV Всероссийской научно-практической конференции с международным участием / Под ред. И. С. Копылова. – Пермь : ПГНИУ, 2022в. – С. 103–111.
7. *Голдырев В. Н., Наумов В. А., Хусаинова А. Ш.* Бурожелезняковые образования – косвенный поисковый признак золотой эпитермальной минерализации // Проблемы минералогии, петрографии и металлогении. Научные чтения памяти П. Н. Чирвинского. – 2022б. – № 25. – С. 46–54.
8. *Голдырев В. Н., Осовецкий Б. М., Наумов В. А.* Золотоносные эксплозивные брекчии месторождения Жильное (Чукотка) // Металлогения древних и современных океанов. – 2022а. – Т. 28. – С. 129–133.
9. *Елманов А. А., Прокофьев В. Ю., Волков А. В., Сидоров А. А., Воскресенский К. И.* Первые данные об условиях формирования Ag-Ag эпитермальной минерализации месторождения Жильное (Восточная Чукотка) Россия // ДАН. – 2018. – Т. 480, № 6. – С. 693–697.
10. *Журавкова Т. В., Пальянова Г. А., Калинин Ю. А., Горячев Н. А., Зинина В. Ю.* Физико-химические условия образования минеральных парагенезисов золота и серебра на месторождении Валунистое (Чукотка) // Геология и геофизика. – 2019. – Т. 60, № 11. – С. 1565–1576.
11. *Наумов В. А.* Минерагения, техногенез и перспективы комплексного освоения золотоносного аллювия : специальность 25.00.11 «Геология, поиски и разведка твёрдых полезных ископаемых, минерагения» : автореф. дис. на соискание учён. степ. д-ра геол.-минерал. наук / Наумов Владимир Александрович. – Пермь : Пермский государственный университет, 2010. – 42 с.
12. *Наумов В. А., Хусаинова А. Ш.* Влияние сезонного промораживания и прогревания сульфидов на частицы золота в техногенно-минеральных образованиях // Цветные металлы и минералы : сборник докладов IX междунар. конгресса. – Красноярск : Научно-инновационный центр, 2017. – С. 942–951.
13. *Новоселов К. А., Котляров В. А., Белогуб Е. В.* Сульфоселенид серебра из руд Валунистого золото-серебряного месторождения (Чукотка) // Зап. РМО. – 2009. – Ч. 138, Вып. 6. – С. 56–61.
14. *Округин В. М., Яблокова Д. А., Андреева Е. Д.* Новые данные о пирите современных и палеогидротермальных систем Камчатского края // Материалы ежегодной конференции, посвящённой Дню вулканолога «Вулканизм и связанные с ним процессы». –

Петропавловск-Камчатский : ИВиС ДВО РАН, 2014. – С. 324–329.
15. *Полин В. Ф.* Петрология контрастной серии Амгуэмо-Канчаланского вулканического поля Чукотки. – Владивосток : ДВО АН СССР, 1990. – 228 с.
16. *Савва Н. Е., Колова Е. Е., Фомина М. И.* и др. Золото-полиметаллическое оруденение в эксплозивных брекчиях: минералого-генетические аспекты (месторождение Сентябрьское, СВ, Чукотка) // Вестник СВНЦ ДВО РАН. – 2016. – № 1. – С. 16–36.
17. *Сахно В. Г., Полин В. Ф., Акинин В. В., Сергеев С. А., Аленичева А. А., Тихомиров П. Л., Молл-Столкап Е. Дж.* Разновременность формирования Амгуэмо-Канчаланского и Энмываамского вулканических полей ОЧВП по данным изотопного датирования // ДАН. – 2010. – Т. 434, № 2. – С. 365–371.
18. *Сидоров А. А., Сидоров В. А., Волков А. В.* Золотоносные эксплозивные брекчии штока Ванин – новый тип оруденения на Северо-Востоке России // ДАН. – 2010. – Т. 435, № 6. – С. 780–785.
19. *Стружков С. Ф.* Провинция Охотско-Чукотского вулканогенного пояса // Золоторудные месторождения России. – М. : Акварель, 2010. – С. 213–242.
20. *Хусаинова А. Ш.* Поведение золота в техногенно-минеральных образованиях месторождений золото-сульфидного типа. : специальность 25.00.11 «Геология, поиски и разведка твёрдых полезных ископаемых, минерагения» : автореф. дис. на соискание учён. степ. канд. геол.-минерал. наук / Хусаинова Альфия Шамилевна. – Новосибирск : ИГМ СО РАН, 2020. – 19 с.
21. *Hedenquist J. W., Browne P. R. Allis R. G.* Epithermal gold mineralization. – New Zeland : Wairakei,. 1988. – 169 p.
22. *Simmons F. A., White N. C., John D. A.* Geological Characteristics of Epithermal Precious and Base Metal Deposits // Economic Geology. – 2005. – 100th Anniversary Volume. – P. 485–522.
23. *Sowkins F. J.* Metal Deposits in Relation to Plate Tectonics. 2-d Revised. – Berlin : Springer Verlag, 1990. – 461 p.

REFERENCES

1. *Belyy V. F.* Geologiya Okhotsko-Chukotskogo vulkanogennogo poyasa [Geology of the Okhotsk-Chukotka volcanogenic belt], Magadan, SVKNII DVO RAN publ., 1994, 76 p. (In Russ.)
2. *Volkov A. V., Goncharov V. I., Sidorov A. A.* Mestorozhdeniya zolota i serebra Chukotki [Gold and silver deposits of Chukotka], Magadan, SVKNII DVO RAN publ., 2006, 221 p. (In Russ.)
3. *Volkov A. V., Prokof'yev V. Yu., Vinokurov S. F.* et al. Epitermal'noye Au-Ag mestorozhdeniye Valunistoye (Vostochnaya Chukotka, Rossiya): geologicheskoye stroyeniye, mineralogo-geokhimicheskiye osobennosti i usloviya rudoobrazovaniya [Epithermal Au-Ag deposit Valunistoye (Eastern Chukotka, Russia): geological structure, mineralogical and geochemical features and conditions of ore formation]. Geologiya rudnykh mestorozhdeniy, 2020, V. 62, No. 2, pp. 107–133. (In Russ.)
4. *Volkov A. V., Prokof'yev V. Yu., Sidorov A. A.* et al. Usloviya formirovaniya epitermal'noy Au-Ag mineralizatsii Amguemo-Kanchalanskogo vulkanicheskogo polya (Vostochnaya Chukotka) [Conditions for the formation of epithermal Au-Ag mineralization of the Amguemo-Kanchalan volcanic field (Eastern Chukotka)]. Vulkanologiya i seysmologiya, 2019, No. 5, pp. 68–80. (In Russ.)
5. *Goldyrev V. N.* Prognozirovaniye i poisk zolotogo orudeneniya v Amguemo-Kanchalanskoy metallogenicheskoy zone (Chukotka) [Forecasting and prospecting for gold mineralization in the Amguemo-Kanchalan metallogenic zone (Chukotka)]. Vestnik Permskogo universiteta. Geologiya, 2022, V. 21, No. 1, pp. 72–89. (In Russ.)
6. *Goldyrev V. N., Artemov A. L., Zavodov A. V., Korotayev V. S.* Argillizirovannyye porody kak kriteriy prognozirovaniya zolotogo orudeniya v predelakh rudnogo polya Kumroch (Tsentral'naya Kamchatka) [Argillized rocks as a criterion for predicting gold mineralization within the Kumroch ore field (Central Kamchatka)]. Aerokosmicheskiye metody v geologii, sbornik nauchnykh statey IV Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiyem, Perm', PGNIU publ., 2022, pp. 103–111. (In Russ.)
7. *Goldyrev V. N., Naumov V. A., Khusainova A. Sh.* Burozheleznyakovyye obrazovaniya – kosvennyy poiskovyy priznak zolotoy epitermal'noy mineralizatsii [Brown-iron formations are an indirect search sign of epithermal gold mineralization]. Problemy mineralogii, petrografii i metallogenii. Nauchnyye chteniya pamyati P. N. Chirvinskogo, 2022, No. 25, pp. 46–54. (In Russ.)
8. *Goldyrev V. N., Osovetskiy B. M., Naumov V. A.* Zolotonosnyye eksplozivnyye brekchii mestorozhdeniya Zhil'noye (Chukotka) [Gold-bearing explosive breccias of the Zhilnoye deposit (Chukotka)]. Metallogeniya drevnikh i sovremennykh okeanov, 2022, V. 28, pp. 129–133. (In Russ.)
9. *Yelmanov A. A., Prokof'yev V. Yu., Volkov A. V., Sidorov A. A., Voskresenskiy K. I.* Pervyye dannyye ob usloviyakh formirovaniya Ag-Ag epitermal'noy mineralizatsii mestorozhdeniya Zhil'noye (Vostochnaya

Chukotka) Rossiya [First data on the formation conditions of Ag-Ag epithermal mineralization of the Zhilnoye deposit (Eastern Chukotka) Russia]. DAN, 2018, V. 480, No. 6, pp. 693–697. (In Russ.)
10. *Zhuravkova T. V., Pal'yanova G. A., Kalinin Yu. A., Goryachev N. A., Zinina V. Yu.* Fiziko-khimicheskiye usloviya obrazovaniya mineral'nykh paragenezisov zolota i serebra na mestorozhdenii Valunistoye (Chukotka) [Physical and chemical conditions for the formation of gold and silver mineral paragenesis at the Valunistoye deposit (Chukotka)]. Geologiya i geofizika, 2019, V. 60, No. 11, pp. 1565–1576. (In Russ.)
11. *Naumov V. A.* Minerageniya, tekhnogenez i perspektivy kompleksnogo osvoyeniya zolotonosnogo allyuviya [Minerageny, technogenesis and prospects for the in-tegrated development of gold-bearing alluvium]. Perm', Permskiy gosudarstvennyy universitet publ., 2010, 42 p. (In Russ.)
12. *Naumov V. A., Khusainova A. Sh.* Vliyaniye sezonnogo promorazhivaniya i progrevaniya sul'fidov na chastitsy zolota v tekhnogenno-mineral'nykh obrazovaniyakh [Influence of seasonal freezing and heating of sulfides on gold particles in technogenic mineral formations]. Krasnoyarsk, Nauchno-innovatsionnyy tsentr publ., 2017, pp. 942–951. (In Russ.)
13. *Novoselov K. A., Kotlyarov V. A., Belogub Ye. V.* Sul'foselenid serebra iz rud Valunistogo zoloto-serebryanogo mestorozhdeniya (Chukotka) [Silver sulfoselenide from ores of the Valunisty gold-silver deposit (Chukotka)]. Zap. RMO, 2009, Ch. 138, Is. 6, pp. 56–61. (In Russ.)
14. *Okrugin V. M., Yablokova D. A., Andreyeva Ye. D.* Novyye dannyye o pirite sovremennykh i paleogidrotermal'nykh sistem Kamchatskogo kraya [New data on pyrite of modern and paleohydrothermal systems of the Kamchatka region], Petropavlovsk-Kamchatskiy, IViS DVO RAN publ., 2014, pp. 324–329. (In Russ.)
15. *Polin V. F.* Petrologiya kontrastnoy serii Amguemo-Kanchalanskogo vulkanicheskogo polya Chukotki [Petrology of the contrast series of the Amguemo-Kanchalan volcanic field of Chukotka], Vladivostok, DVO AN SSSR publ., 1990, 228 p. (In Russ.)
16. *Savva N. Ye., Kolova Ye. Ye., Fomina M. I.* et al. Zolotopolimetallicheskoye orudeneniye v eksplozivnykh brekchiyakh: mineralogo-geneticheskiye aspekty (mestorozhdeniye Sentyabr'skoye, SV, Chukotka) [Gold-polymetallic mineralization in explosive breccias: mineralogical and genetic aspects (Sentyabrskoye de-posit, SV, Chukotka)]. Vestnik SVNTS DVO RAN, 2016, No. 1, pp. 16–36. (In Russ.)
17. *Sakhno V. G., Polin V. F., Akinin V. V., Sergeyev S. A., Alenicheva A. A., Tikhomirov P. L., Moll-Stolkap Ye. Dzh.* Raznovremennost' formirovaniya Amguemo-Kanchalanskogo i Enmyvaamskogo vulkanicheskikh poley OCHVP po dannym izotopnogo datirovaniya [OChVB volcanic fields according to isotope dating]. DAN, 2010, V. 434, No. 2, pp. 365–371. (In Russ.)
18. *Sidorov A. A., Sidorov V. A., Volkov A. V.* Zolotonosnyye eksplozivnyye brekchii shtoka Vanin – novyy tip orudeneniya na Severo-Vostoke Rossii [Gold-bearing explosive breccias of the Vanin stock – a new type of mineralization in the North-East of Russia]. DAN, 2010, V. 435, No. 6, pp. 780–785. (In Russ.)
19. *Struzhkov S. F.* Provintsiya Okhotsko-Chukotskogo vulkanogennogo poyasa [The province of the Okhotsk-Chukotka volcanogenic belt]. Zolotorudnyye mestorozhdeniya Rossii, Moscow, Akvarel' publ., 2010, pp. 213–242. (In Russ.)
20. *Khusainova A. Sh.* Povedeniye zolota v tekhnogenno-mineral'nykh obrazovaniyakh mestorozhdeniy zoloto-sul'fidnogo tipa [Behavior of gold in technogenic-mineral formations of deposits of gold-sulfide type], Novosibirsk, IGM SO RAN publ., 2020, 19 p. (In Russ.)
21. *Hedenquist J. W., Browne P. R. Allis R. G.* Epithermal gold mineralization, New Zeland, Wairakei publ., 1988, 169 p.
22. *Simmons F. A., White N. C., John D. A.* Geological Characteristics of Epithermal Precious and Base Metal Deposits. Economic Geology, 2005, 100th Anniversary Volume, pp. 485–522.
23. *Sowkins F. J.* Metal Deposits in Relation to Plate Tectonics. 2-d Revised, Berlin, Springer Verlag publ, 1990, 461 p.

Статья поступила в редакцию 20.04.23; одобрена после рецензирования 15.06.23; принята к публикации 15.06.23.
The article was submitted 20.04.23; approved after reviewing 15.06.23; accepted for publication 15.06.23.