
НАУКИ О ЗЕМЛЕ
И ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЕ

Научная статья
УДК 553.411 (235.47)
DOI: 10.7868/S3034530825050015

Текстурно-структурные особенности руд Малиновского месторождения (Южный Сихотэ-Алинь, Дальний Восток России)

В.Н. Бахтина✉, А.А. Гребенникова

Виктория Николаевна Бахтина
аспирант, инженер-исследователь
Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, Владивосток, Россия
bakhtina@fegi.ru
<https://orcid.org/0009-0002-3934-5455>

Анна Александровна Гребенникова
кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник
Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, Владивосток, Россия
anylotina@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-3651-8050>

Аннотация. В работе представлены результаты исследования текстурно-структурных особенностей руд Малиновского месторождения (Южный Сихотэ-Алинь), относящегося к кварц-турмалин-сульфидной формации Au–Bi типа. Геологическая позиция и сложный состав руд объекта создают благоприятные условия для проявления широкого спектра текстур и структур. Установлено, что наиболее распространенными текстурами являются прожилково-вкрапленная, массивная и вкрапленная, среди выделенных видов структур – аллотриоморфно- и гипидиоморфнозернистая, гипидиоморфнометазернистая и порфирикластическая. Характерной особенностью являются их сложные сочетания с образованием комбинированных текстур и структур. Проведенные исследования подтверждают, что рудообразование на Малиновском месторождении протекало в условиях гидротермально-метасоматического процесса, осложненного интенсивными тектоническими деформациями. С технологической точки зрения перспективными для обогащения являются руды с массивными и прожилково-вкрапленными текстурами, содержащие крупнозернистые сульфиды и свободное золото. Особое внимание при разработке месторождения должно быть уделено контролю вредных примесей (As, Sb, глинистые минералы), существенно влияющих на технологический процесс. Рекомендуется дифференцированный подход к переработке различных типов руд с применением комбинированных методов (флотация + цианирование). Полученные результаты имеют важное значение для разработки критериев поиска и оценки подобных объектов с висмутовой минерализацией, а также для оптимизации технологических схем переработки руд.

Ключевые слова: золотовисмутовое оруденение, текстуры, структуры, месторождение Малиновское, Сихотэ-Алинь, Дальний Восток России

Для цитирования: Бахтина В.Н., Гребенникова А.А. Тектурно-структурные особенности руд Малиновского месторождения (Южный Сихотэ-Алинь, Дальний Восток России) // Вестн. ДВО РАН. 2025. № 5. С. 5–19. <http://dx.doi.org/10.7868/S3034530825050015>

Благодарности. Авторы выражают благодарность главному геологу ООО «Малиновское» К.Н. Доброшевскому за предоставленный каменный материал и помощь в проведении полевых работ.

Финансирование. Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России для ДВГИ ДВО РАН.

Original article

Textural and structural features of ores of the Malinovskoye deposit (Southern Sikhote-Alin, Russian Far East)

V.N. Bakhtina, A.A. Grebennikova

Viktoria N. Bakhtina

Postgraduate Student, Research Engineer

Far East Geological Institute, FEB RAS, Vladivostok, Russia

bakhtina@fegi.ru

<https://orcid.org/0009-0002-3934-5455>

Anna A. Grebennikova

Candidate of Sciences in Geology and Mineralogy, Senior Researcher

Far East Geological Institute, FEB RAS, Vladivostok, Russia

anlotina@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0002-3651-8050>

Abstract. The paper presents the results of the study of textural and structural features of ores of the Malinovskoye deposit (South Sikhote-Alin), belonging to the quartz-tourmaline-sulphide formation of Au–Bi type. The geological position and complex composition of ores of the object create favourable conditions for the manifestation of a wide range of textures and structures. It was found that the most common textures are vein-embedded, massive and disseminated, among the identified types of structures are allotriomorphic and hypidiomorphic-grained, hypidiomorphic-metaserrine and porphyroclastic. The characteristic feature is their complex combinations with formation of combined textures and structures. The studies confirm that ore formation at the Malinovskoye deposit occurred in the conditions of hydrothermal-metasomatic process complicated by intensive tectonic deformations. From the technological point of view, ores with massive and vein-embedded textures containing coarse-grained sulphides and free gold are promising for beneficiation. Particular attention should be paid to the control of harmful impurities (As, Sb, clay minerals), which significantly affect the technological process. A differentiated approach to processing different types of ores using combined methods (flotation + cyanidation) is recommended. The results obtained are important for the development of search criteria and evaluation of similar objects with bismuth mineralization, as well as for the optimization of technological schemes of ore processing.

Keywords: gold-bismuth mineralization, textures, structures, Malinovskoye deposit, Sikhote-Alin, Russian Far East

For citation: Bakhtina V.N., Grebennikova A.A. Textural and structural features of ores of the Malinovskoye deposit (Southern Sikhote-Alin, Russian Far East). *Vestnik of the FEB RAS*. 2025;(5): 5–19. (In Russ.). <http://dx.doi.org/10.7868/S3034530825050015>

Acknowledgments. The authors express their gratitude to the chief geologist of Malinovskoye LLC K.N. Dobroshevsky for the provided stone material and assistance in carrying out field work.

Funding. The work was carried out within the framework of the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation for the Far East Geological Institute, FEB RAS.

Введение

Изучение текстурно-структурных особенностей руд является неотъемлемой частью комплексного изучения руд и играет важную роль в определении генезиса месторождений, их технологических свойств и условий формирования. Текстуры и структуры руд отражают условия кристаллизации, метасоматических изменений, тектонических деформаций и последующих преобразований под воздействием различных физико-химических условий. Исследование этих особенностей позволяет реконструировать историю формирования месторождения и подобрать благоприятные схемы обогащения руд [1].

Малиновское месторождение расположено в Дальнереченском районе Приморского края. Оно является одним из представителей гидротермальных месторождений кварц-турмалин-сульфидной формации золотовисмутового геохимического типа в пределах Сихотэ-Алинской золотоносной провинции. Его геологическая позиция в зоне влияния Центрального Сихотэ-Алинского разлома и сложный состав руд создают благоприятные условия для проявления широкого спектра текстур и структур. В рудах месторождения преобладают прожилково-вкрапленные, массивные и вкрапленные текстуры, а также зернистые, коррозионные и катакластические структуры. Золото преимущественно тонкодисперсное, находится в свободной форме и в ассоциации с арсенопиритом, халькопиритом и висмутовыми минералами [2–4].

Целью данной работы является систематизация и анализ текстурно-структурных особенностей руд Малиновского месторождения, выявление их связи с минеральным составом и условиями формирования. Результаты исследования имеют практическое применение при разработке технологий обогащения руд и эксплуатации Малиновского месторождения, а также при поиске и разведке подобных объектов с висмутовой минерализацией как на территории Сихотэ-Алиня, так и в пределах России. Исследование выполнено с применением микроскопического и рентгеноспектрального анализа, что обеспечило высокую достоверность полученных данных.

Краткая геологическая характеристика и минеральный состав руд Малиновского месторождения золота

Месторождение Малиновское расположено в одноименном рудном поле, в верховьях р. Малиновка. Его площадь составляет около 30 км². В геологическом строении района принимают участие аркозовые песчаники и алевролиты раннемелового возраста [2–4] синдвигового турбидитового бассейна Журавлевско-Амурского террейна. От расположенного северо-западнее Самаркинского террейна он отделен системой разрывов крупного левостороннего сдвига – Центрального Сихотэ-Алинского разлома или одного из его ответвлений (рис. 1).

Выделено два комплекса магматических пород: раннемеловой (интрузивный татибинский: первая фаза – диориты, габбромонцодиориты; вторая фаза – биотитовые гранодиориты, граниты, лейкограниты) и раннепалеогеновый (вулканический богопольский – дациты, риодациты, их туфы, игнимбриты и др.) [2–5].

Структурное формирование месторождения напрямую связано с Центрально-Сихотэ-Алинской сдвиговой системой [6]. Следствием левостороннего движения блоков являются серии сосдвиговых трещин растяжения, которые, вероятно, служили и рудоподводящими каналами [3, 4]. Некоторые исследователи считают, что образование Малиновской золоторудной магматической системы интрузивно-купольной структуры центрального типа (диаметром около 5 км) связано с внедрением Водораздельного интрузива габбромонцодиоритов татибинского комплекса [2, 6, 7]. Согласно датам U–Pb SHRIMP, возраст интрузива составляет 105–103 млн лет [7].

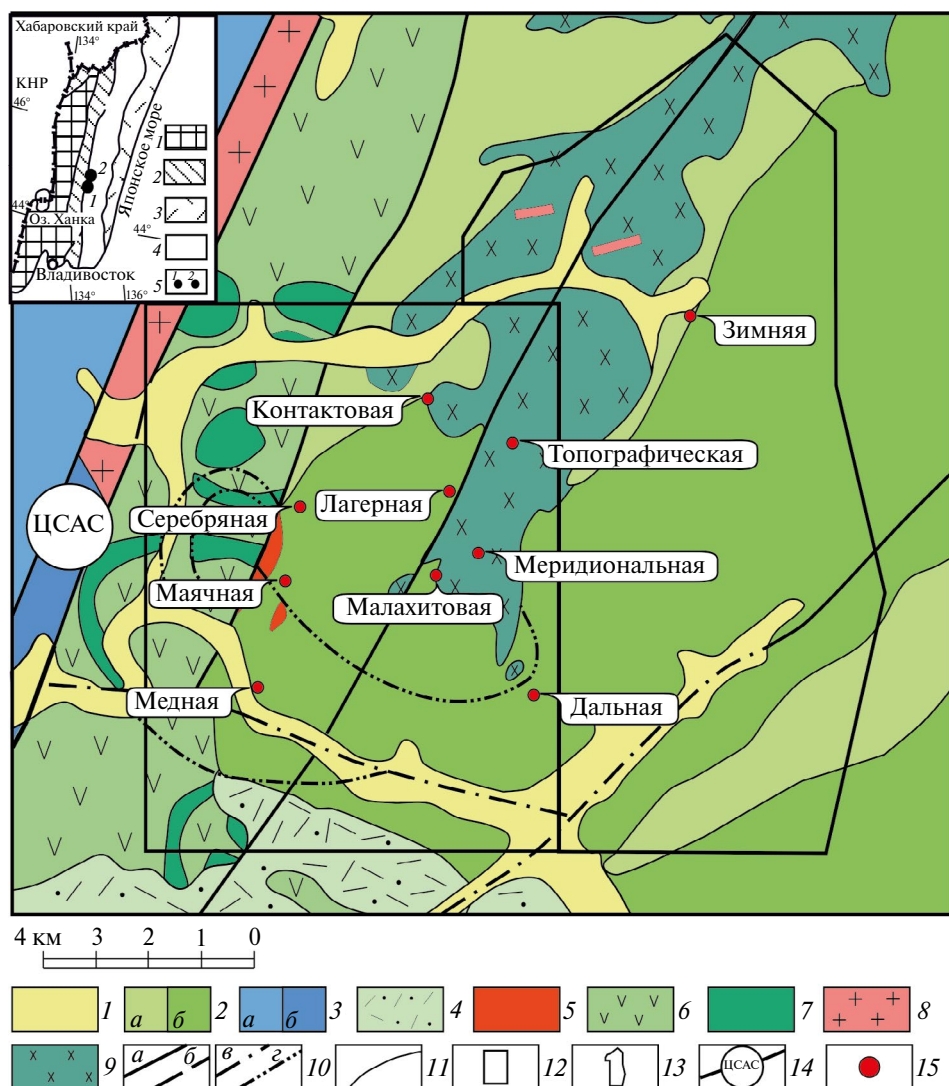


Рис. 1. Геологическая схема Малиновского рудного узла. Составлена по материалам Г.С. Белянского (2012 г.), В.А. Михайлова (1998 г.), К.Н. Доброшевского (2012 г.). 1 – четвертичные отложения (суглинки, супеси, гальки); 2 – нижнемеловые терригенные отложения Журавлевско-Амурского террейна: а – ключевская свита (песчаники, алевролиты, алевроаргиллиты, их переслаивание, линзы гравелитов); б – журавлевская свита (алевроаргиллиты, алевролиты, песчаники); 3 – средне-позднеюрские терригенные отложения Самаркинского террейна: а – самаркинская свита (алевролиты с олистолитами), б – тудовакская свита (кремнисто-глинистые сланцы); 4 – богопольская свита: туфы, туфолавы, туфопесчаники, туффиты, игнимбриты риолитов, реже дациты и лавы риолитов; 5 – богопольский комплекс: дайки риолитов, риодацитов; 6 – дорофеевская свита, верхняя подсвита: андезиты, андезибазальты и их туфы с прослоями туфоалевролитов и туфов риолитов; маастрихтский вулканический комплекс: дайки андезитов, андезибазальтов; 7 – дорофеевский комплекс: дайки андезитов, андезибазальтов; 8, 9 – татибинский комплекс (8 – вторая фаза: граниты до умеренно щелочных лейкогранитов, 9 – первая фаза: монцодиориты, монцобабродиориты); 10 – тектонические нарушения: а – установленные, б – предполагаемые, в – перекрытые аллювием, г – выделенные по дешифрированию аэроснимков; 11 – геологические границы; 12, 13 – контуры лицензионной площади Малиновского и Намовского месторождений; 14 – Центральный Сихотэ-Алинский разлом; 15 – рудные зоны. На врезке – фрагмент схемы террейнов Сихотэ-Алинского орогенного пояса и прилегающих территорий, по данным [8, 9]: 1 – Ханкайско-Буреинский кристаллический массив и его обрамление; 2 – Самаркинская аккреционная призма; 3 – Прибрежный вулканический пояс; 4 – Журавлевский турбидитовый бассейн – юг и Таухинская аккреционная призма – север; 5 – золоторудные месторождения и рудопроявления (1 – Малиновское, 2 – Намовское)

Золоторудная минерализация Малиновского месторождения локализована как в сводовой, так и в периферической части интрузивного купольного поднятия, сложенного габбромонцонитами, габбромонцодиоритами и монцонитами [2–4, 6, 7]. Рудные тела представлены линейными штокверковыми зонами и отдельными жилами сульфид-кварцевого, сульфид-карбонат-кварцевого и сульфидного составов, протяженностью 60–265 м при мощности от 0,1 до 7,5 м. Их форма извилистая и часто невыдержанная по мощности. Простираение преимущественно субмеридиональное и северо-восточное с крутыми углами падения на восток, в отдельных случаях на запад [2–4]. Рудные тела сопровождаются зонами разнообразных околожильных метасоматических изменений пород – грейзенизацией, хлоритизацией, карбонатизацией, турмалинизацией, сульфидизацией, а местами аргиллизацией.

Рудные жилы и прожилки сложены преимущественно жильными минералами (кварц, карбонат, турмалин и хлорит) и сульфидами (табл. 1). Сульфидная минерализация представлена халькопиритом, пиритом, арсенопиритом, пирротинном, сфалеритом, галенитом, молибденитом, висмутином. Реже встречаются сульфосоли (тетраэдрит, кобеллит, Sb-козалит, бурнонит и лиллианит-густавит); самородный висмут, сульфиды висмута (висмутин, икунолит); сульфотеллуриды (группа жозеита) и теллуриды (хедлейит) висмута; интерметаллиды золота (мальдонит); антимонид золота (ауростибит), самородное золото, вольфрамат кальция (шеелит) и плавленый шпат [2–4].

Таблица 1

Краткая геологическая характеристика Малиновского месторождения

Важнейшие признаки	Малиновское месторождение
Орогенный пояс	Сихотэ-Алинский
Терреин	Журавлевско-Амурский
Формационный тип	Золотосульфидно-кварцевый
Вмещающие породы	Монцогаббродиориты, монцодиориты, алевролиты
Возраст оруденения	102,3±1,8 до 106,6±1,7 млн лет (ранний мел, альб) [6], возраст продуктивной рудной минерализации – от 96 до 102 млн лет [3]
Морфология рудных тел	Линейные штокверки
Текстуры руд	Прожилковая, прожилково-вкрапленная, массивная
Жильные минералы	Кварц, карбонаты, хлорит и турмалин, реже шеелит
Рудные минералы	Сульфиды и сульфоарсениды (халькопирит, пирит, арсенопирит, глаукоцит, пирротин, сфалерит и галенит, молибденит) Висмутовые минералы: сульфотеллуриды (группа жозеита) теллуриды и самородные формы (хедлейит, самородный висмут) Сульфиды: (икунолит, висмутин) Сульфосоли: сульфоантимонит меди (тетраэдрит), сложные Pb–Bi–Sb-соединения (кобеллит, Sb-козалит), бурнонит, лиллианит-густавит) Интерметаллиды (мальдонит); антимониды (ауростибит) Прочие минералы: молибденит, самородное золото
Морфология зерен самородного золота	Кристаллические формы (изометричные, удлиненные), интерстиционные выделения
Проба золота	Преобладает 750–775‰ и 825–850‰, редко 620 и 960‰

Примечание. Данные по Малиновскому месторождению из работы [10] по материалам [2–4, 6].

Самородное золото представлено кристаллическими формами (изометричные, удлиненные, интерстиционные). По размеру в основном преобладает мелкое, очень мелкое и тонкодисперсное самородное золото. Оно образует как самостоятельные выделения в арсенопирите или халькопирите, так и сростки с висмутовыми минералами. Пробность золота варьирует в достаточно широких пределах – от 620 до 960‰. Преобладает 750–775‰ и 825–850‰, редко 620 и 960‰ [2, 3].

Материалы и методы исследования

Основой исследования текстурно-структурных особенностей руд послужили образцы, полученные при проведении полевых работ, включающих в себя маршрутные наблюдения, документацию канав и керн разведочных скважин с отбором образцов в пределах Малиновского месторождения.

Исследования полированных шлифов в отраженном свете выполнены при помощи бинокулярного микроскопа Nikon E600 POL Optical Microscope for Geological Studies, Jeol (Япония) в комплекте с цифровой телекамерой.

Определение химического состава рудных минералов выполнено в лаборатории рентгеновских методов Аналитического центра ДВГИ ДВО РАН на рентгеноспектральном микроанализаторе GEOL JXA-8100.

Исследования особенностей внутреннего строения и состава минералов проведены на двухлучевом сканирующем электронном микроскопе Tescan Lyra 3 XMN + EDS AZtec X-Max 80 Standart в лаборатории микро- и наноисследований ДВГИ ДВО РАН и на настольном растровом электронном микроскопе JCM-6000 в молодежной лаборатории (лаборатория общих и синхротронных методов прикладной петрологии, минералогии и синтеза новых материалов на основе природоподобных технологий) ДВГИ ДВО РАН.

Результаты исследования

Текстуры руд. В пределах месторождения Малиновское широко распространены руды с прожилковой и вкрапленной текстурами, иногда с массивной и гнейсовидно-полосчатой, редко встречаются руды с пятнистой, полосчатой, брекчиевой, брекчиевидной и друзовой текстурами.

Массивная текстура встречается в сплошных рудах, слагающих пластообразные маломощные тела с линзовидными раздувами (рис. 2, а, д). Описываемая текстура характеризуется сплошным расположением сульфидной (пирротин-халькопиритовой, пиритовой, арсенопиритовой) массы, иногда в ней наблюдаются зерна кварца и более поздние тонкие просечки сульфид-карбонатного, хлоритового, реже лимонитового составов, рассекающие жилу.

Вкрапленная текстура характеризуется наличием рассеянных зерен рудных минералов и их агрегатов в нерудной массе, слагающей рудные тела жил и прожилков, а также в метасоматически измененных породах (см. рис. 2, в). Руды с описываемой текстурой чаще всего имеют пиритовый и арсенопиритовый состав. В жилах и призальбандовых частях рудных тел наблюдается неравномерное распределение вкрапленников рудных минералов, что приводит к появлению гнездообразной и пятнистой текстур (см. рис. 2, в).

Полосчатая и гнейсовидно-полосчатая текстуры характерны для рудных жил и прожилков. Они представлены чередованием полосок различного минерального состава и наличием линзовидных и полосчатых минеральных агрегатов удлиненного облика, взаимно переходящих друг в друга. Такой текстурный рисунок характерен для халькопирит-пирротиновой массы, реже пиритовой (см. рис. 2, а, б).

На месторождении широко распространены прожилковая и прожилкообразные текстуры. Прожилковая (см. рис. 2, з) характерна для рудных и нерудных прожилков, они имеют четкие границы с вмещающими породами, их мощность варьируется от первых долей миллиметра до 10 см, часто данная текстура тяготеет к зальбандам. Для нерудных текстур характерно присутствие маломощных просечек и прожилков кварцевого, кварц-карбонатного, хлорит-карбонатного, сульфид-карбонатного, хлоритового и карбонатного состава во вмещающих породах. Они имеют беспорядочно ориентированный (ветвящийся, нитеобразный) вид, часто рассекаю-

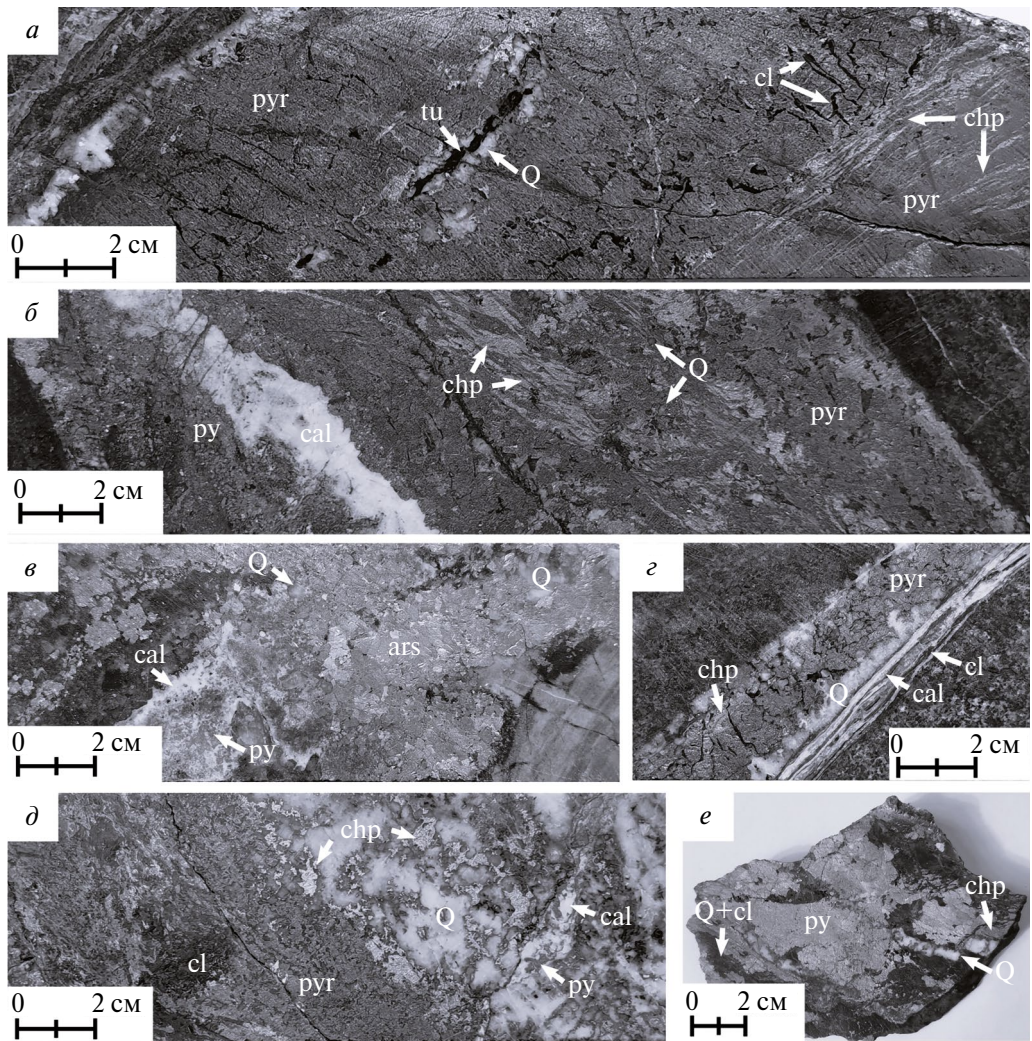


Рис. 2. Текстуры руд Малиновского месторождения: а – фрагмент халькопирит-пирротиновой жилы с редкими вкрапленниками кварца, линзочками турмалин-кварцевого состава и хлоритовыми просечками, массивная и полосчатая текстуры; б – карбонат-кварц-сульфидная жила, чередование полосок и линзочек пирротина и халькопирита, гнейсовидно-полосчатая и прожилковая текстуры; в – фрагмент кварц-сульфидной жилы в пересечении с пирит-карбонатным прожилком, вкрапленная и пятнистая текстуры; г – кварц-сульфидный прожилок с тонкими хлорит-карбонатными просечками в призальбандовой части, прожилковая и полосчатая текстуры; д – кварц-сульфидная жила с неоднородным составом: к левой части тяготеет преимущественно сульфидная пирротин-халькопиритовая масса с гнездами хлорита и редкими вкрапленниками кварца, к правой – кварцевая с вкрапленниками сульфидов, массивная и прожилково-вкрапленная текстуры; е – угловатые обломки пиритовой и пирит-халькопиритовой, сцементированные хлорит-кварцевым жильным материалом, брекчиевидная текстура. Сокращения: ars – арсенипирит, cal – карбонаты, chp – халькопирит, chl – хлорит, py – пирит, pyr – пирротин, tu – турмалин, Q – кварц

щий рудные жилы и прожилки, и направленный облик. Для рудных прожилков характерна неравномерная вкрапленность рудных минералов с сокристаллизационной кварцевой массой. С появлением более мощных жил развиваются прожилкообразные текстуры. Для них характерно метасоматическое замещение вмещающих пород вдоль зальбандов жильными минералами, что приводит к потере четких границ и появлению постепенных переходов.

На месторождении также распространены катакластические текстуры, представленные брекчиевой и брекчиевидной разновидностями. Они установлены в зонах тектонических разломов, реже сопровождают рудные жилы в зальбандовых частях. Обломочный материал брекчий представлен раздробленными вмещающими породами или фрагментами сульфид-кварцевых жил размером от 0,5 до 15 см. Обломки сцементированы жильно-прожилковым материалом хлорит-карбонат-кварцевого состава, сопровождаются вкрапленной минерализацией рудных минералов. Выше по разрезу жилы и прожилки также подвергнуты тектоническим нарушениям и коррозии, что приводит к приобретению брекчиевидной текстуры руд (см. рис. 2, е).

Редки друзовые текстуры. Они встречаются в маломощных жилах и прожилках и представлены мелкими, реже крупными идиоморфными кристаллами кварца и флюорита, покрытыми окислами железа.

Наряду с охарактеризованными выше текстурами часто отмечаются их комбинации, например прожилково-вкрапленная (см. рис. 2, д), прожилково-брекчиевая, прожилково-полосчатая и др.

Структуры руд. Характерной особенностью Малиновского месторождения является разнообразие структур руд, что обусловлено совокупностью геодинамической обстановки и особенностей рудообразующих флюидов. При микроскопическом изучении полированных шлифов выделены следующие группы структур: зернистые, коррозионные, метазернистые, кристаллобластические и катакластические.

В группу зернистых входят установленные аллотриоморфно- и гипидиоморфнозернистые структуры. Преобладают аллотриоморфнозернистые структуры (рис. 3, б), они часто сложены сплошной пирротин-халькопиритовой массой в кварце, также наблюдаются зернистые агрегаты того же состава, выполняющие интерстиции в жильных минералах. Реже эта структура отмечается для арсенопирита и вкрапленников золотин. Гипидиоморфнозернистая структура встречается менее часто (см. рис. 3, а), она характерна для отдельных идиоморфных кристаллов, заключенных в аллотриоморфную массу жильных или рудных минералов, таких как пирит, галенит, блеклая руда.

Группу коррозионных представляют скелетная структура и реакционно-каемочная микротекстура. Скелетная структура встречается редко. Она характерна для замещения халькопирита скородитом (см. рис. 3, д). В рудах, находящихся в зоне окисления, образуются реакционно-каемочные микротекстуры (см. рис. 3, е). Они представлены ковеллином, замещающим халькопирит по границам минералов.

Среди группы метазернистых можно выделить гипидиоморфнометазернистые структуры (см. рис. 3, в). Они представлены идиоморфными и гипидиоморфными кристаллами пирита, реже в них можно наблюдать ситообразное строение. Такие метакристаллы образуют прожилки и вкрапления как в рудных минералах, так и в карбонатном, кварц-карбонатном субстрате. Также можно встретить метакристаллы арсенопирита, которые приурочены к микротрещинам, они наблюдаются в ассоциации с висмутовыми минералами и золотом.

Из группы кристаллобластических установлены структуры распада твердых растворов, к которым относятся эмульсионная, ориентированно-эмульсионная, звездчатая, каплевидная, пламенивидная.

Эмульсионная и ориентированно-эмульсионная структуры представлены округлыми частицами сфалерита в халькопирите и халькопирита в сфалерите (рис. 4, а). Для кристаллов сфалерита часто отмечается ориентированное расположение эмульсий халькопирита по кристаллографическим осям и по зональности и увеличение их количества к краям минерала. Звездчатая структура встречается редко и представлена мелкими звездчатыми выделениями сфалерита в халькопирите (см. рис. 4, б). Отмечены единичные случаи звездочек и эмульсий сфалерита в пирите. Размер таких включений очень мелкий, не превышает 1–2 мкм. Каплевидная структура характерна для более крупных выделений халькопирита в сфалерите, также отмечены каплевидные включения самородного золота и мальдонита в данаите размером до 3 мкм (см. рис. 4, в). Пламенивидная структура свойственна для минералов золотовисмутовой ассоциации, которая часто встречается в арсенопирите, реже кварце и халькопирите (см. рис. 4, в).

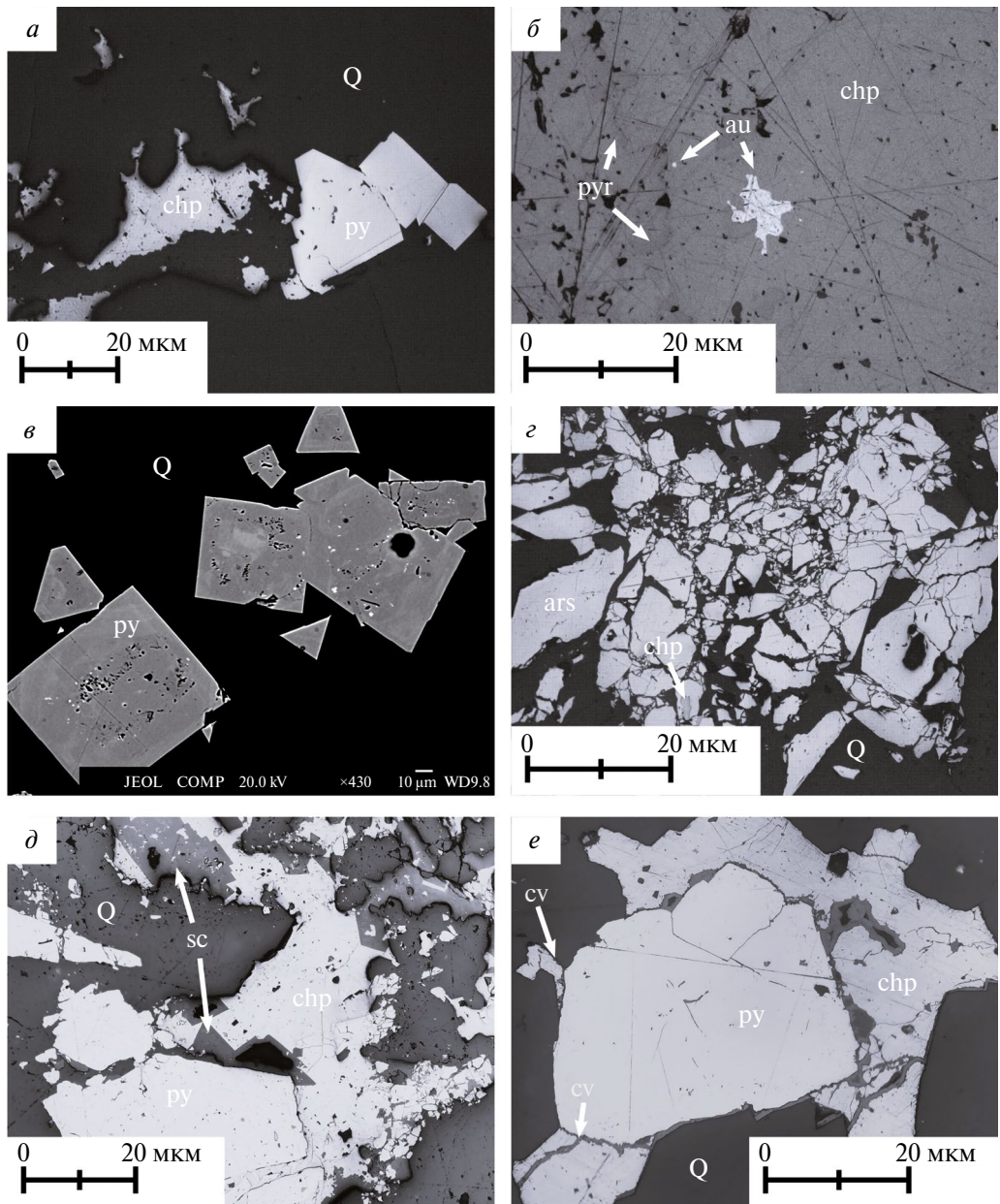


Рис. 3. Структуры руд Малиновского месторождения: а – идиоморфные кристаллы пирита в сростании с аллотриоморфным халькопиритом в кварце, гипидиоморфнозернистая структура; б – аллотриоморфное выделение золота в халькопирите, аллотриоморфнозернистая структура; в – метакристаллы пирита со слабо выраженным зональным и секториальным строением, с неравномерным распределением включений галенита, гипидиоморфнометазернистая структура; г – агрегат арсенопирита, раздробленного и сцементированного кварцем, порфирохлассическая структура; д – замещение халькопирита скородитом, скелетная коррозионная структура; е – замещение халькопирита ковеллином по трещинам и по границам минерала, реакционно-каемочная структура (микротекстура). Сокращения: au – золото, ars – арсенопирит, chp – халькопирит, cv – ковеллин, py – пирит, pyr – пирротин, Q – кварц, sc – скородит

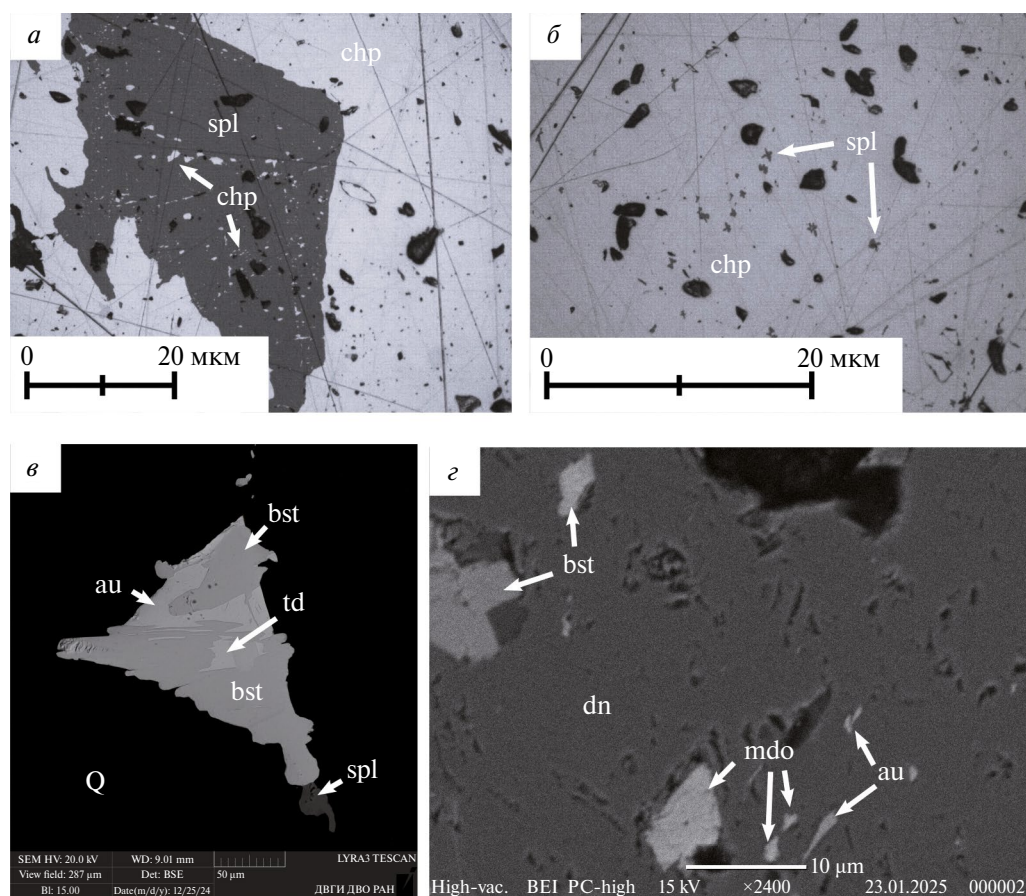


Рис. 4. Структуры распада твердых растворов: *а* – эмульсионная вкрапленность халькопирита в сфалерите; *б* – звездчатые и эмульсионные выделения сфалерита в халькопирите; *в* – пламенивидное срастание золота, висмутита и тетрадимита в кварце; *з* – каплевидные выделения мальдонита и самородного золота в данаите. Сокращения: au – золото, bst – висмутин, chp – халькопирит, dn – данаит, mdo – мальдонит, spl – сфалерит, td – тетрадимит, Q – кварц

Катакластические структуры наблюдаются главным образом у хрупких рудных и жильных минералов, наиболее отчетливо отмечаются у зерен арсенопирита и пирита. По трещинам дробления можно отметить замещение, например, арсенопирит замещается более поздним халькопиритом.

Обсуждение результатов

Для руд Малиновского месторождения установлены разнообразные морфогенетические группы и морфологические виды текстур и структур.

На основании исследований выявлена связь между морфологией структур и минеральным составом руд Малиновского месторождения (табл. 2).

Как отмечено, преобладают прожилково-вкрапленные, прожилковые и массивные текстуры (см. табл. 2), которые свидетельствуют о заполнении трещин и пустот гидротермальными растворами, для массивных – концентрированными растворами.

Наличие полосчатых и гнейсовидно-полосчатых текстур, характеризующихся чередованием полос и линзочек различного минерального состава, подчеркивает процессы дифференциации, перекристаллизации и ориентированного роста минералов под воздействием высоких температур и давлений.

Таблица 2

Текстуры руд Малиновского месторождения и составляющие их минералы

Морфогенетические группы	Морфологические виды	Типовые минералы	
		Рудные	Жильные
Массивные	Массивная	Арсенопирит, пирит, пирротин, халькопирит	Кварц
Пятнистые	Вкрапленная	Арсенопирит, данаит, пирит	Кварц
	Пятнистая	Арсенопирит, данаит, пирит	Кварц
Удлиненные	Полосчатая	Пирротин, халькопирит, реже пирит	Кварц, карбонаты, хлорит, турмалин
	Гнейсовидно-полосчатая	Пирротин, халькопирит	—
	Прожилковая	Пирротин, халькопирит, пирит, арсенопирит	Кварц, карбонаты, хлорит, турмалин
	Прожилкообразная	Пирротин, халькопирит, пирит, арсенопирит	Кварц, карбонаты, хлорит
Друзовые	Друзовая	—	Кварц, флюорит
Катакластические	Брекчиевая	Пирит, реже арсенопирит	Кварц, карбонаты, хлорит, турмалин
	Брекчиевидная	Пирит, халькопирит, арсенопирит	Кварц, карбонаты, хлорит

Выделенные нами брекчиевая и брекчиевидная текстуры, относящиеся к группе катакластических, указывают на проявление разнонаправленных тектонических напряжений, при которых катаклазу подверглись ранее сформированные рудные тела и создавались благоприятные условия для проникновения рудоносных растворов.

Редкие друзовые текстуры, представленные прожилками, выполненными идиоморфными кристаллами кварца и флюорита, свидетельствуют о более поздних стадиях гидротермальной активности.

Структуры руд Малиновского месторождения, выявленные при микроскопическом изучении полированных шлифов, представлены в табл. 3.

Зернистые структуры указывают на одновременные или близко одновременные условия кристаллизации минералов на начальной стадии рудообразования из гидротермального раствора. Аллотриоморфнозернистые структуры формируются при интенсивной кристаллизации в высокотемпературных условиях, гипидиоморфнозернистые структуры – при уменьшении скорости роста кристаллов, что может быть связано с изменением состава флюидов или температуры.

Коррозионные структуры подчеркивают влияние гидротермальных растворов. Вторичные изменения характеризуются воздействием более поздних флюидов на ранние минералы, что привело к их частичному растворению или замещению. Реакционно-каемочные микро-текстуры, характерные для зоны окисления, также указывают на влияние поверхностных процессов на преобразование руд.

Метазернистые структуры, представленные гипидиоморфнометазернистыми кристаллами пирита и арсенопирита, отражают процессы перекристаллизации и метасоматоза. Отмечено, что для метакристаллов характерна ассоциация с золотовисмутовой минерализацией, что подчеркивает роль флюидов в транспортировке и отложении рудного вещества.

Таблица 3

Структуры руд Малиновского месторождения и слагающие их минералы

Морфогенетические группы	Морфологические виды	Типовые минералы	
		Жильные	Рудные
Зернистые	Аллотриоморфнозернистая	Кварц	Пирротин, халькопирит, арсенопирит, золото
	Гипидиоморфнозернистая	Кварц, карбонаты	Пирит, пирротин, галенит, блеклая руда
Коррозионные	Структура разъедания	Кварц	Арсенопирит, данаит, халькопирит, висмутин
	Реакционно-каемочная микротекстура	—	Халькопирит, ковеллин
Метазернистые	Гипидиоморфнометазернистая	Кварц	Арсенопирит, пирит, Bi-Sbсульфосоли
Кристаллобластические (распада твердых растворов)	Эмульсионная	—	Халькопирит, сфалерит, редко пирит
	Ориентированно-эмульсионная	—	Халькопирит, сфалерит, редко пирит
	Звездчатая	—	Сфалерит
	Каплевидная	—	Халькопирит, золото, мальдонит
	Пламеневидная	—	Золото, висмутин, тетрадимит
Катакластические	Порфиروкластическая	Кварц, карбонаты	Арсенопирит, пирит

Структуры распада твердых растворов, образующиеся при изменении температурного режима, служат геологическими термометрами. В процессе перекристаллизации они распадаются на более простые химические соединения. Так, эмульсионные, ориентированно-эмульсионные, звездчатые, каплевидные структуры сфалерита в халькопирите и халькопирита в сфалерите формируются при температурах от 350 до 500 °С. Каплевидные выделения самородного золота и висмута, мальдонита, установленные в арсенопирите, являются эвтектической ассоциацией, образовавшейся при 241 °С в системе Au–Bi. Как известно [11–16], устойчивость мальдонита сохраняется в температурном диапазоне 371–116 °С. Исследования флюидных включений в кварце Малиновского месторождения показали, что образование продуктивных жил происходило в среднетемпературных условиях (275–371 °С) [17]. Поэтому, учитывая текстурно-структурные особенности, минеральный состав, флюидные включения, можно предположить, что формирование Малиновского месторождения проходило в пределах от 275 до 500 °С. Возникновение пламеневидных структур связано с быстрым изменением физико-химических параметров.

Катакластические структуры, часто наблюдаемые в разновременных кристаллах и агрегатах арсенопирита и пирита, трещины дробления и замещение арсенопирита халькопиритом подчеркивают длительность тектонических деформаций, которые сопровождали весь период рудообразования.

Анализ текстур и структур рудных образований играет ключевую роль в оценке технологических свойств руд. Данные характеристики определяют пространственное распределение полезных компонентов, их взаимосвязь с нерудными минералами, а также особенности раскрытия минеральных зерен при дроблении, что существенно влияет на эффективность извлечения ценных металлов.

Среди выделенных текстур и структур руд наиболее благоприятными являются массивные текстуры (пирротин-халькопиритовые, пиритовые), характеризующиеся высокой концентрацией сульфидов, что способствует эффективной флотации и гравитационному обогащению; прожилково-вкрапленные текстуры с равномерным распределением рудных минералов в кварцевой массе, обеспечивающие хорошее раскрытие зерен при дроблении, а также аллотриоморфные зернистые структуры, где крупные зерна сульфидов (пирит, халькопирит) легко отделяются от жильных минералов.

К неблагоприятным для обогащения текстурам и структурам руд относятся катакластические (брекчиевидные) текстуры, требующие тонкого измельчения из-за сильного дробления минералов, что увеличивает энергозатраты и снижает выход концентратов; тонковкрапленные структуры с размерами зерен менее 10 мкм, затрудняющие извлечение даже при тонком помоле, а также реакционно-каемочные микротекстуры (например, замещение халькопирита ковеллином), ухудшающие флотационные свойства минералов вследствие изменения их поверхностных характеристик [1].

При переработке руд Малиновского месторождения ключевыми вредными примесями являются три группы минералов: мышьяксодержащие (арсенопирит) создают токсикологическую опасность и требуют специальной очистки; сурьмяные минералы (тетраэдрит, бурнонит) и сульфосоли висмута ухудшают качество концентратов из-за сложных сростаний; глинистые (хлорит, карбонаты) и окисленные минералы (лимонит, ковеллин) осложняют флотацию, образуя шламы и изменяя поверхностные свойства [18].

Заключение

Проведенные исследования позволили установить, что наиболее распространенными текстурами руд являются прожилково-вкрапленная, массивная и вкрапленная, среди выделенных видов структур – аллотриоморфно- и гипидиоморфнозернистая, гипидиоморфнометазернистая и порфиروкластическая. Стоит отметить, что вышеописанные текстуры и структуры руд очень редко встречаются в изолированном, или «чистом», виде. Довольно часто они плавно переходят одна в другую, образуя комбинированные текстуры, такие как прожилково-вкрапленная, прожилково-брекчиевая, прожилково-полосчатая и др. При изучении структур также выявлены различные сочетания, например, в группе зернистых наблюдается совместное присутствие аллотриоморфнозернистой и гипидиоморфнозернистой структур, сочетание эмульсионной, звездчатой и каплевидной структур распада твердого раствора. Часто устанавливается наложение катакластических структур на другие, более ранние, например порфирокластическая структура в метакристалле арсенопирита.

Комплексное изучение текстурно-структурных особенностей руд Малиновского месторождения свидетельствует о сложном процессе их формирования. Преобладание руд с прожилково-вкрапленной и массивной текстурами отражает кристаллизацию минеральных ассоциаций из насыщенных гидротермальных растворов, тогда как развитие в них зернистых и метасоматических структур указывает на последующую перекристаллизацию в изменяющихся физико-химических условиях. Широкое распространение катакластических текстур и структур руд связано с интенсивными тектоническими деформациями, которые создавали благоприятные условия для миграции поздних рудоносных флюидов. Проведенные исследования подтверждают, что рудообразование на Малиновском месторождении протекало в условиях гидротермально-метасоматического процесса, осложненного интенсивными тектоническими деформациями.

Руды Малиновского месторождения перспективны для обогащения, особенно участки с массивными и прожилково-вкрапленными текстурами, где преобладают крупнозернистые сульфиды (халькопирит, пирит) и свободное золото. Однако наличие катакластических и тонковкрапленных структур требует комбинированных методов переработки (флотация + цианирование). Вредные примеси (мышьяк, сурьма, глинистые минералы) могут увеличить затраты на очистку. Для эффективной разработки месторождения рекомендуется дифференцированный подход к переработке руд с различными текстурно-структурными особенностями и обязательный контроль содержания вредных примесей на всех стадиях технологического процесса.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Исаенко М.П. Определитель текстур и структур руд. М.: Недра, 1983. 261 с.
2. Гвоздев В.И., Доброшевский К.Н., Вах А.С., Горячев Н.А., Степанов В.А., Федосеев Д.Г. Малиновское месторождение – новый тип золоторудной минерализации в Приморском крае, Россия (геология, минералогия, генезис) // Тихоокеанская геология. 2016. Т. 35 (1). С. 37–53. <https://doi.org/10.30911/0207-4028-2021-40-3-28-40>
3. Доброшевский К.Н., Гвоздев В.И., Шлыков С.А., Степанов В.А., Федосеев Д.Г. Вещественный состав и геохимические особенности руд Малиновского золоторудного месторождения (Приморский край) // Тихоокеанская геология. 2017. Т. 36 (5). С. 59–74.
4. Доброшевский К.Н., Горячев Н.А. О возрасте и геодинамических факторах формирования золоторудного оруднения Малиновского месторождения (Сихотэ-Алинская золотоносная провинция, Россия) // Тихоокеанская геология. 2021. Т. 40 (3). С. 28–40. <https://doi.org/10.30911/0207-4028-2021-40-3-28-40>
5. Grebennikov A.V., Kasatkin S.A. Paleocene A-type igneous suites in the Sikhote-Alin (the East Asian continental margin): Petrological, geochronological, isotopic, and geodynamic constraints // *Geoscience Frontiers*. 2023. Vol. 14 (6). 101673. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2023.101673>
6. Степанов В.А., Бельченко Е.Л., Доброшевский К.Н., Гвоздев В.И. Малиновское золоторудное месторождение, Приморский край // Руды и металлы. 2013. № 3. С. 26–34.
7. Сахно В.Г., Степанов В.А., Гвоздев В.И., Доброшевский К.Н. Малиновская золоторудная магматическая система Центрального Сихотэ-Алия: геохронология, петрогеохимический состав и изотопная характеристика магматических комплексов (Приморье, Россия) // Докл. РАН. 2013. Т. 452 (1). С. 61–69. <https://doi.org/10.7868/S0869565213260174>
8. Голозубов В.В. Тектоника юрских и нижнемеловых комплексов северо-западного обрамления Тихого океана. Владивосток: Дальнаука, 2006. 239 с.
9. Геодинамика, магматизм и металлогения Востока России / под ред. А.И. Ханчука. Владивосток: Дальнаука, 2006. Кн. 1. 572 с.
10. Гребенникова А.А. Геологическая позиция и особенности состава, строения и генезиса золоторудных (с висмутовой минерализацией) месторождений Сихотэ-Алия // Вестник ДВО РАН. 2024. № 5. С. 62–82. <https://doi.org/10.31857/S0869769824050056>
11. Некрасов И.Я. Экспериментальное изучение условий образования интерметаллидов серебра и золота // Минералогический журнал. 1985. Т. 7 (2). С. 61–71.
12. Некрасов И.Я. Геохимия, минералогия и генезис золоторудных месторождений. М.: Наука, 1991. 302 с.
13. Гамянин Г.Н., Некрасов И.Я., Самусиков В.П. Мальдонит из золоторудных проявлений Восточной Якутии // Минералогический журнал. 1986. Т. 8 (3). С. 65–71.
14. Tooth B., Brugger J., Ciobanu C.L., Liu W. Modeling of gold scavenging by bismuth melts coexisting with hydrothermal fluids // *Geology*. 2008. Vol. 36. P. 815–818.
15. Tooth B., Ciobanu C.L., Green L., O'Neill B., Brugger J. Bi-melt formation and gold scavenging from hydrothermal fluids: An experimental study // *Geochim. Cosmochim. Acta*. 2011. Vol. 75. P. 5423–5443.
16. Tooth B., Etschmann B., Pokrovski G.S., Testemale D., Hazemann J., Grundler P.V., Brugger J. Bismuth speciation in hydrothermal fluids: an X-ray absorption spectroscopy and solubility study // *Geochim. Cosmochim. Acta*. 2013. Vol. 101. P. 156–172.
17. Бахтина В.Н., Гребенникова А.А., Доброшевский К.Н., Федосеев Д.Г., Горячев Н.А. Физико-химические условия формирования рудной минерализации Малиновского месторождения (Южный Сихотэ-Алинь) // III Молодежная научная конференция-школа с международным участием «Геология на окраине континента». Владивосток, 2024. С. 119–122.
18. Абрамов А.А. Переработка, обогащение и комплексное использование твердых полезных ископаемых. Т. 1. Обогащительные процессы и аппараты. М.: Изд-во Московского государственного горного университета, 2004. 470 с.

REFERENCES

1. Isaenko M.P. *Opredelitel' tekstur i struktur rud*. Moscow: Nedra; 1983. 261 p. (In Russ.).
2. Gvozdev V.I., Dobroshevskii K.N., Vakh A.S., Goryachev N.A., Stepanov V.A., Fedoseev D.G. Malinovskoe mestorozhdenie – novyi tip zolotorudnoi mineralizatsii v Primorskom krae, Rossiya

(geologiya, mineralogiya, genezis). *Tikhookeanskaya Geologiya*. 2016;35(1):37–53. (In Russ.). <https://doi.org/10.30911/0207-4028-2021-40-3-28-40>

3. Dobroshevskii K.N., Gvozdev V.I., Shlykov S.A., Stepanov V.A., Fedoseev D.G. Veshchestvennyi sostav i geokhimicheskie osobennosti rud Malinovskogo zolotorudnogo mestorozhdeniya (Primorskii kraj). *Tikhookeanskaya Geologiya*. 2017;36(5):59–74. (In Russ.).

4. Dobroshevskii K.N., Goryachev N.A. O vozraste i geodinamicheskikh faktorakh formirovaniya zolotogo orudneniya Malinovskogo mestorozhdeniya (Sikhoteh-Alin'skaya zolotonosnaya provintsiya, Rossiya). *Tikhookeanskaya Geologiya*. 2021;40(3):28–40. (In Russ.). <https://doi.org/10.30911/0207-4028-2021-40-3-28-40>

5. Grebennikov A.V., Kasatkin S.A., Paleocene A-type igneous suites in the Sikhote-Alin (the East Asian continental margin): Petrological, geochronological, isotopic, and geodynamic constraints. *Geoscience Frontiers*. 2023;14(6):101673. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2023.101673>

6. Stepanov V.A., Bel'chenko E.L., Dobroshevskii K.N., Gvozdev V.I. Malinovskoe zolotorudnoe mestorozhdenie, Primorskii kraj. *Rudy i Metally*. 2013;(3):26–34. (In Russ.).

7. Sakhno V.G., Stepanov V.A., Gvozdev V.I., Dobroshevskii K.N. Malinovskaya zolotorudnaya magmaticheskaya sistema tsentral'nogo Sikhoteh-Alinya: geokhronologiya, petrogeokhimicheskii sostav i izotopnaya kharakteristika magmaticheskikh kompleksov (Primor'e, Rossiya). *Dokl. RAN*. 2013;452(1):61–69. (In Russ.). <https://doi.org/10.7868/S0869565213260174>

8. Golozubov V.V. Tektonika yurskikh i nizhnemelovykh kompleksov severo-zapadnogo obramleniya Tikhogo okeana. Vladivostok: Dal'nauka; 2006. 239 p. (In Russ.).

9. Khanchuk A.I. (Ed.). Geodinamika, magmatizm i metallogeniya Vostoka Rossii. Vladivostok: Dal'nauka; 2006. Vol. 1. 572 p. (In Russ.).

10. Grebennikova A.A. Geologicheskaya pozitsiya i osobennosti sostava, stroeniya i genezisa zolotorudnykh (s vismutovoi mineralizatsiei) mestorozhdenii Sikhoteh-Alinya. *Vestnik of the FEB RAS*. 2024;(5):62–82. (In Russ.). <https://doi.org/10.31857/S0869769824050056>

11. Nekrasov I.Ya. Eksperimental'noe izuchenie uslovii obrazovaniya intermetallidov serebra i zolota. *Mineralogicheskii Zhurnal*. 1985;7(2):61–71. (In Russ.).

12. Nekrasov I.Ya. Geokhimiya, mineralogiya i genezis zolotorudnykh mestorozhdenii. Moscow: Nauka; 1991. 302 p. (In Russ.).

13. Gamyanin G.N., Nekrasov I.Ya., Samusikov V.P. Mal'donit iz zolotorudnykh proyavlenii Vostochnoi Yakutii. *Mineralogicheskii Zhurnal*. 1986;8(3):65–71. (In Russ.).

14. Tooth B., Brugger J., Ciobanu C.L., Liu W. Modeling of gold scavenging by bismuth melts coexisting with hydrothermal fluids. *Geology*. 2008;36:815–818.

15. Tooth B., Ciobanu C.L., Green L., O'Neill B., Brugger J. Bi-melt formation and gold scavenging from hydrothermal fluids: An experimental study. *Geochim. Cosmochim. Acta*. 2011;75:5423–5443.

16. Tooth B., Etschmann B., Pokrovski G.S., Testemale D., Hazemann J., Grundler P.V., Brugger J. Bismuth speciation in hydrothermal fluids: an X-ray absorption spectroscopy and solubility study. *Geochim. Cosmochim. Acta*. 2013;101:156–172.

17. Bakhtina V.N., Grebennikova A.A., Dobroshevskii K.N., Fedoseev D.G., Goryachev N.A. Fiziko-khimicheskie usloviya formirovaniya rudnoi mineralizatsii Malinovskogo mestorozhdeniya (Yuzhnyi Sikhoteh-Alin'). In: III Molodezhnaya nauchnaya konferentsiya-shkola s mezhdunarodnym uchastiem: *Geologiya na okraine kontinenta*. Vladivostok; 2024. P. 119–122. (In Russ.).

18. Abramov A.A. Pererabotka, obogashchenie i kompleksnoe ispol'zovanie tverdykh poleznykh iskopaemykh. Vol. 1. Obogatitel'nye protsessy i apparaty. Moscow: Izdatel'stvo Moskovskogo Gosudarstvennogo Gornogo Universiteta; 2004. 470 p. (In Russ.).