

УДК 553.21

УСЛОВИЯ ПЕРЕКРИСТАЛЛИЗАЦИИ РУД ОЗЕРНОГО ПОЛИМЕТАЛЛИЧЕСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ (ЗАПАДНОЕ ЗАБАЙКАЛЬЕ, РОССИЯ)

© 2024 г. Л. Б. Дамдинова^{a, *}, Б. Б. Дамдинов^a, И. В. Викентьев^{a, b}, В. Н. Реутский^c

^a Геологический институт им. Н. Л. Добрецова СО РАН, ул. Сахьяновой, 6а, г. Улан-Удэ, 670047 Россия

^b Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН, Старомонетный пер., 35, Москва, 119017 Россия

^c Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, пр. академика Коптюга, 3, Новосибирск, 630090 Россия

*E-mail: ludamdinova@mail.ru

Поступила в редакцию 08.06.2023 г.

После доработки 11.07.2023 г.

Принята к публикации 21.07.2023 г.

Озерное свинцово-цинковое месторождение — крупнейшее по запасам цинка в России. Установлено, что первичные слоисто-полосчатые, массивные и брекчиевые сульфидные руды подвержены интенсивным пострудным деформациям и перекристаллизации, которые сопровождали динамический и контактовый метаморфизм. Преобразования выражаются в укрупнении размеров минеральных агрегатов и формировании карбонат-кварц-сульфидных жил и прожилков с разными соотношениями слагающих их минералов. Рудные минералы в жилах и прожилках представлены сфалеритом, галенитом и пиритом в разных соотношениях, в меньших количествах присутствуют халькопирит, пирротин, арсенопирит, марказит; изредка встречаются сульфиды и сульфосоли Ag. Жильные минералы — кварц, сидерит, марганцовистый сидерит (олигонит); также присутствуют Ва-содержащий мусковит (эллахерит) и хлорит. Установлено, что перекристаллизация руд происходила при повышенных РТ-параметрах — температуре до 535°C и давлении до 2 кбар, в присутствии относительно высоко концентрированной (солёность до 21.5 мас. % экв. NaCl) флюидной фазы. Преобразования руд в основном обусловлены процессами динамометаморфизма. Остается неопределенность как с возрастом оруденения Озерного месторождения, так и с временем развития метаморфических процессов. Это не позволяет увязать эти процессы с этапами геодинамической эволюции региона.

Ключевые слова: Озерное полиметаллическое месторождение, сульфидные руды, эпигенетические преобразования, динамометаморфизм, изотопный состав, флюидные включения

DOI: 10.31857/S0016777024020037, **EDN:** yrlxzc

ВВЕДЕНИЕ

Озерное свинцово-цинковое месторождение — крупнейшее по запасам цинка в России. Оно было открыто в 1963 г. в результате проверки комплексной геофизической аномалии (Тарасова и др., 1972). Месторождение расположено в Курбино-Еравнинском рудном районе Западного Забайкалья (Гордиенко, Нефедьев, 2015) и является крупнейшим объектом Озернинского рудного узла, в пределах которого известны также около 20 мелких и средних по запасам колчеданно-полиметаллических, золото-полиметаллических, железорудных, медно-баритовых и др. месторождений; в водотоках известны промышленные россыпи золота. Исследования месторождений Озернинского рудного

узла делятся более 60 лет, но до сих пор многие вопросы их происхождения остаются предметом дискуссий.

Озерное месторождение большинством исследователей относится к гидротермально-осадочному типу (Тарасова и др., 1972; Ковалев, Бусленко, 1992; Васильев, 1977 и др.) и характеризуется низкой степенью метаморфизма и относительно хорошей сохранностью первичных текстур сульфидных руд, что выражено в широком развитии их слоистых и брекчиевых разностей (Дистанов, Ковалев, 1975). В то же время отмечается частичная регенерация сульфидных руд в локальных участках динамического и контактового метаморфизма, а также кремнещелочного метасоматоза, однако обычно

считается, что объем связанных с такими процессами руд незначителен (Ковалев, Бусленко, 1992).

Наблюдения показывают, что руды достаточно часто несут признаки эпигенетических преобразований – динамометаморфизма, перекристаллизации; широко развиты карбонат-кварц-сульфидные жилы и прожилки, происхождение и *РТ*-параметры формирования которых остаются неизвестными. При этом следует отметить, что перекристаллизованные руды и кварц-сульфидные прожилки, в отличие от первичных руд, характеризуются крупнокристаллическим либо гнездовым строением, с крупными совместными выделениями сфалерита и галенита, которые становятся преобладающими минералами руд. То есть вторичные преобразования, как правило, приводят к улучшению качественных показателей руд, в том числе, и к природному обогащению полезными компонентами первичных мелко-тонкозернистых гидротермально-осадочных руд. Причем масштабы этих процессов, по-видимому, намного шире, чем представлялось ранее. Для реконструкции геологических процессов, вызывающих эпигенетические преобразования полиметаллических руд, и оценки их влияния на руды месторождения проведено изучение минерального состава наиболее богатых перекристаллизованных руд, карбонат-кварц-сульфидных жил и прожилков, а также выполнены термобарогеохимические исследования флюидных включений в жильных минералах.

ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ

Основная часть Озернинского рудного узла, в состав которого входит Озерное полиметаллическое месторождение, сложена стратифицированными палеозойскими образованиями, слагающими останец (провес кровли) площадью около 250 км² в поле развития позднепалеозойских гранитоидов Ангара-Витимского батолита. В палеотектоническом плане рудный узел входит в состав Удино-Витимской структурно-формационной зоны, реконструированной в качестве палеоостроводужной системы (Гордиенко и др., 2010; Руженцев и др., 2012). Удино-Витимская зона является одним из краевых сегментов Центрально-Азиатского складчатого пояса в южном обрамлении Сибирского кратона. Район характеризуется длительным развитием и включает комплексы каледонского (Є-S_1), раннегерцинского ($\text{S}_2\text{--C}_{1-2}$) и позднегерцинского (PZ_3) структурных этажей (Гордиенко и др., 2010; Руженцев и др., 2012; Минина и др., 2016).

Рудовмещающая толща ранее традиционно относилась к кембрийской олдындинской свите

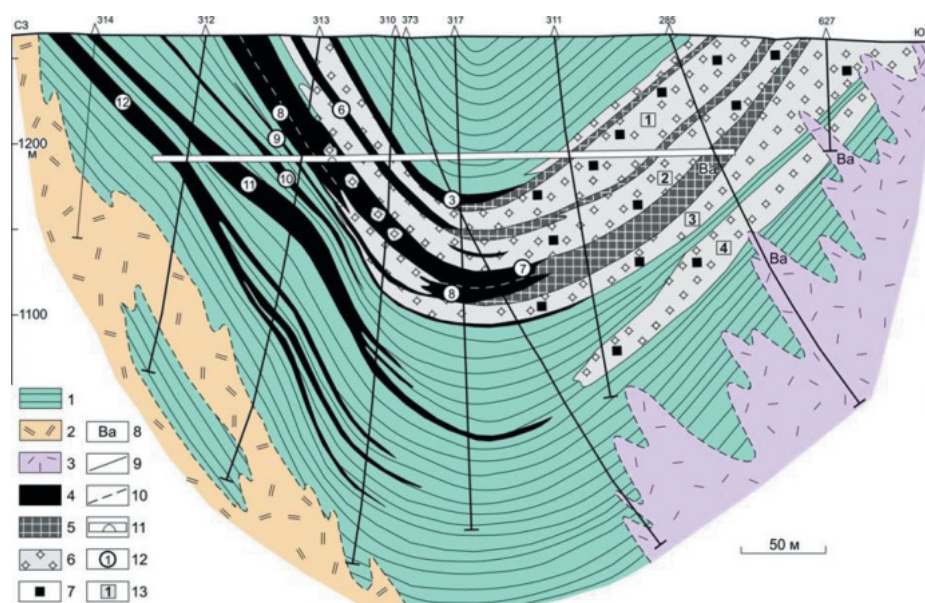
(Тарасова и др., 1972), в составе которой выделялось несколько подсвит. Нижняя подсвита, преимущественно вулканогенная, на Озерном месторождении представлена туфами и лавами риодацитов, переслаивающимися с известняками, туфами и углистыми мелкообломочными туффитами. Верхняя подсвита в рудном поле сложена туфами и лавами среднего и кислого составов, известковистыми и кремнистыми, нередко углистыми мелкообломочными туффитами, серыми слоистыми и массивными известняками, известняковыми брекчиями и гравелитами с туфогенно-карбонатным цементом.

Позднее из состава кембрийской олдындинской свиты были выделены карбонатно-терригенная озернинская ($\text{S}_2\text{?--D}_3\text{f}$), терригенно-туфогенная кыджимитская ($\text{D}_3\text{fm--C}_1\text{t}$) и туфогенно-карбонатно-терригенная ульзутуйская ($\text{C}_1\text{v-s}$) толщи, а также вулканогенные сурхейтинская (C_{2-3}) толща и тамирская свита (P_2) (Руженцев и др., 2012; Минина и др., 2023). Озернинская толща является основанием разреза средне-верхнепалеозойского комплекса и несогласно, с базальными конгломератами, залегает на нижнепалеозойских известняках и вулканитах олдындинской свиты.

Рудовмещающие отложения в рудном поле Озерного месторождения полого ($15^\circ\text{--}20^\circ$) падают на юго-восток (Нефедьев, 2009) и слагают крыло крупной синформы, которое осложнено более мелкими складками, образующими цепь глубоких, кулисообразно расположенных брахисинклинальных складок северо-восточного простирания, в том числе Озерной. Складка асимметрична с более крутым ($50^\circ\text{--}85^\circ$) северо-западным крылом и более пологим ($35^\circ\text{--}50^\circ$) юго-восточным. Пачки, слагающие Озерную синклиналь, характеризуются быстрым изменением мощности и фациального состава осадков. Упомянутые признаки позволили сделать вывод о том, что описанные складки являются конседиментационными, а особенности отложений обусловлены неравномерным опусканием морского дна (Васильев, 1977).

Проявления интрузивного магматизма в рудном поле Озерного месторождения представлены силлообразными и секущими телами риолитов и дацитов, дайками андезитовых порфириров, сиенит-порфириров, долеритов и трахидолеритов. Гранитоиды, присутствующие в рудном поле месторождения, отнесены к позднепалеозойскому бичурскому комплексу.

Рудные тела были детально разведаны до глубины 350 м (фиг. 1). Мощность основной продуктивной толщи колеблется от 140 до 230 м. Ее разрез



Фиг. 1. Схематический геологический разрез Озерного месторождения (упрощенно по Ковалеву и др. (2005) с учетом данных Р.С. Тарасовой (1972). 1 – вмещающие вулканогенные и терригенно-карбонатные породы; 2, 3 – автомагматические брекчии дацитов и андезидацитов (2), риолитов и риодацитов (3); 4 – субпластовые тела сульфидных полиметаллических руд; 5 – перекристаллизованные сульфидные полиметаллические руды; 6 – сидериты; 7 – прожилково-вкрапленная сульфидная минерализация; 8 – баритовая минерализация; 9, 10 – геологические границы установленные (9) и предполагаемые (10); 11 – штольня и квершлаг; 12, 13 – номера пластовых залежей полиметаллических руд (12) и сидеритов (13).

включает 12 рудных залежей, представляющих собой серию пластообразных рудных тел, разделенных безрудными слоями осадочных и вулканокластических пород мощностью от 5 до 30 м. Внутреннее строение рудных тел неоднородно, с чередованием слоев колчеданно-полиметаллических руд, туфов, мелкообломочных туффитов и известняковых брекчий, в различной степени обогащенных сульфидами. По морфологии и внутреннему строению выделяют четыре типа рудных тел: 1) пластовые залежи, выдержанные по форме и распределению колчеданного оруденения; 2) лентовидные пластообразные залежи неоднородного внутреннего строения; 3) сложные по форме уплотненные залежи с неравномерным распределением колчеданного оруденения; 4) линзовидные залежи небольших размеров. Сульфидные тела залегают, в целом, согласно с вмещающими породами, границы их в основном резкие. Протяженность рудных тел 1300–2340 м, а мощность меняется от 1 до 30–50 м, возрастая от флангов к центральным частям. Следует отметить, что около одной третьей части объема рудных тел сложено перекристаллизованными рудами, пространственно ассоциирующими с пластовыми телами сидеритовых руд (см. фиг. 1), происхождение которых считается метасоматическим (Ковалев, Бусленко, 1992).

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Петрографические и минераграфические исследования проводились с использованием рудно-петрографических микроскопов марок Olympus BX-51 и Поляр-3. Большинство аналитических исследований выполнены в ЦКП “Геоспектр”, ГИН СО РАН г. Улан-Удэ: химический состав минералов определялся Е.В. Ходыревой и С.В. Кананиным методом рентгеноспектрального микроанализа на сканирующем электронном микроскопе LEO-1430VP с энерго-дисперсионным спектрометром INCA Energy 350; изотопный состав кислорода проанализирован В.Ф. Посоховым и В.Л. Посоховой на масс-спектрометре Finigan MAT 253, погрешность полученных значений составила не более 0.2–0.3‰. Исследование индивидуальных флюидных включений (ФВ) в кварце и карбонатах выполнялось методами термометрии, криометрии и спектроскопии комбинационного рассеяния света (КР-спектроскопии). Для определения температур общей гомогенизации, температур эвтектики и плавления льда водных растворов использовалась микротермокамера THMSG-600 фирмы Linkam с диапазоном измерений температур от –196 до +600°C. Стандартная аппаратурная ошибка измерений составляет ± 0.1 в отрицательной и $\pm 5^\circ\text{C}$ в положительной области температур. Оценку содержания солей во включениях находили

по температуре плавления льда, используя двухкомпонентную водно-солевую систему ($\text{NaCl}-\text{H}_2\text{O}$) через эквивалент NaCl (Bodnar, Vityk, 1994). Преобладающая соль в водном растворе включений определялась по температуре эвтектики, характеризующей водно-солевую систему (Борисенко, 1977).

Состав газовой фазы индивидуальных ФВ определен на рамановском спектрометре Horiba LabRam HR800 в РЦ “Геомодель”, аналитик В.Н. Бочаров (НП СПбГУ), при 50× увеличении объектива. Регистрация спектров комбинационного рассеяния выполнена в спектральном диапазоне $4000-100\text{ см}^{-1}$. Источником возбуждения служил аргоновый лазер 514.5 нм с мощностью 1–50 мВт. Калибровка прибора осуществлялась по Si-этало-ну (520.7 см^{-1}). Использовалась дифракционная решетка 1800 ш/мм, диаметр конфокального отверстия 300 мкм. Время накопления данных от 2 до 10 сек с количеством повторов от 2 до 15.

Изотопный анализ серы сульфидов выполнен в “Центре коллективного пользования научным оборудованием многоэлементных и изотопных исследований СО РАН” (ИГМ СО РАН, г. Новосибирск).

МИНЕРАЛЬНЫЙ СОСТАВ РУД ОЗЕРНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Первичные руды

Состав первичных руд изучается с начала геолого-разведочных работ, с 60-х годов прошлого века (Тарасова и др., 1972; Дистанов, Ковалев, 1975; Ковалев, Бусленко, 1992; Викентьев и др., 2023 и др.). Главные рудные минералы Pb-Zn рудных залежей – пирит, сфалерит и галенит, второстепенные – магнетит, халькопирит, марказит, блеклая руда и арсенопирит. К более редким относятся борнит, пирротин и самородное серебро. Среди нерудных минералов преобладают сидерит, кальцит, барит, кварц, доломит, анкерит, серицит и хлорит.

Первичные руды представлены массивными (фиг. 2а), полосчатыми и брекчиевыми разновидностями. К характерным признакам первичных руд месторождения относится широкое развитие полосчатых (слоистых и псевдослоистых) текстур (фиг. 2б), чему способствуют в целом невысокая нарушенность месторождения пострудными пликативными и дизъюнктивными нарушениями. Заметную роль в колчеданных залежах играют брекчиевидные руды (фиг. 2в, г), сложенные обломками известняков, сидеритов, яшмоидов, метасоматитов и сульфидных руд, в том числе слоистых с сульфидным (галенитовым, галенит-сфалеритовым и др.) и сульфидно-карбонатным цементом.

Брекчиевидные, вкрапленные и прожилково-вкрапленные руды составляют около 36% от объема руд.

Перекристаллизованные руды

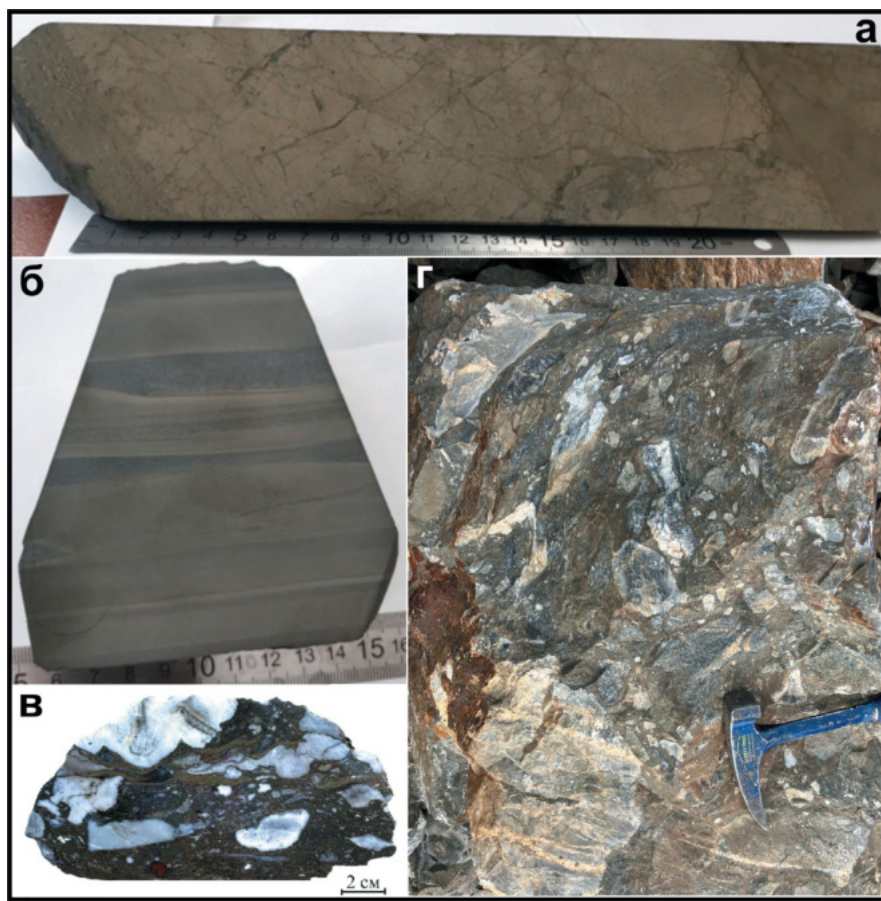
Несмотря на кажущуюся “недеформированность” руд, эпигенетические преобразования первичных слоисто-полосчатых и брекчиевидных руд проявлены достаточно широко. Среди признаков перекристаллизации руд наиболее распространены следующие: укрупнение выделений рудных минералов вплоть до образования сливных рудных агрегатов мономинеральных галенита или сфалерита (фиг. 3а, в), наличие деформационных текстур, указывающих на динамометаморфизм руд, развитие жильной и прожилковой минерализации.

Жилы (фиг. 4а) и прожилки развиваются по пластовым сульфидным рудам и могут иметь секущие взаимоотношения с первичными рудами, а также залегать субсогласно со слоистостью руд. Жилы характеризуются кварц-карбонат(сидерит)-сульфидным составом, с разными соотношениями перечисленных минералов (фиг. 4б–е), от карбонатно-кварцевых с гнездами сульфидов, до существенно-сульфидных, с небольшим количеством кварца и карбоната в интерстициях.

Обычно главный жильный минерал представлен кварцем, который имеет светлую окраску, от практически молочно-белой до светло-серой (фиг. 4б, в, г). Кварц образует либо сплошные скопления (фиг. 4б), либо встречается в виде округлых, овальных или изометричных зерен, пространство между которыми заполнено рудными минералами, карбонатами и др. (фиг. 4в, д).

Карбонаты в жилах и прожилках имеют ксеноморфный облик, заполняют интерстиции между другими минералами, участками находятся в тесном срастании с агрегатами хлорита (фиг. 5в). По химическому составу они представлены сидеритом и марганцовистым сидеритом (олигонитом) с содержанием Mn до 10.8 мас. % и Mg до 3.3 мас. %.

Слюда в рудах представлена мусковитом, который встречается в виде единичных зерен вытянутой таблитчатой формы размером до 300 мкм (фиг. 5а, б, г), либо в виде скоплений агрегатов таблитчатой формы с ярко-выраженной зональностью (фиг. 5в). Мусковит практически всегда содержит примесь ВаО (5.08–7.66 мас. %) и относится к бариевой разновидности – розовому мусковиту (эллахериту); содержания K_2O в нем несколько ниже теоретического состава мусковита, от 8.73 до 10.26 мас. % (за счет замещения барием), содержания MgO варьируют от 0.75 до 1.77 мас. %. Зональность мусковита обусловлена вариациями в распределении



Фиг. 2. Фотографии первичных руд. а — образец зерна первичной массивной руды; б — слоисто-полосчатая руда; в — образец брекчиевой руды; г — глыба брекчиевых руд.

бария и железа. Так, более светлые полосы (фиг. 5в) содержат относительно повышенные концентрации BaO (≥ 7 мас.%) и FeO (6.2–7.3 мас.%), относительно темные участки зерен обеднены BaO (до 5.7 мас.%) и FeO (≤ 4.9 мас.%).

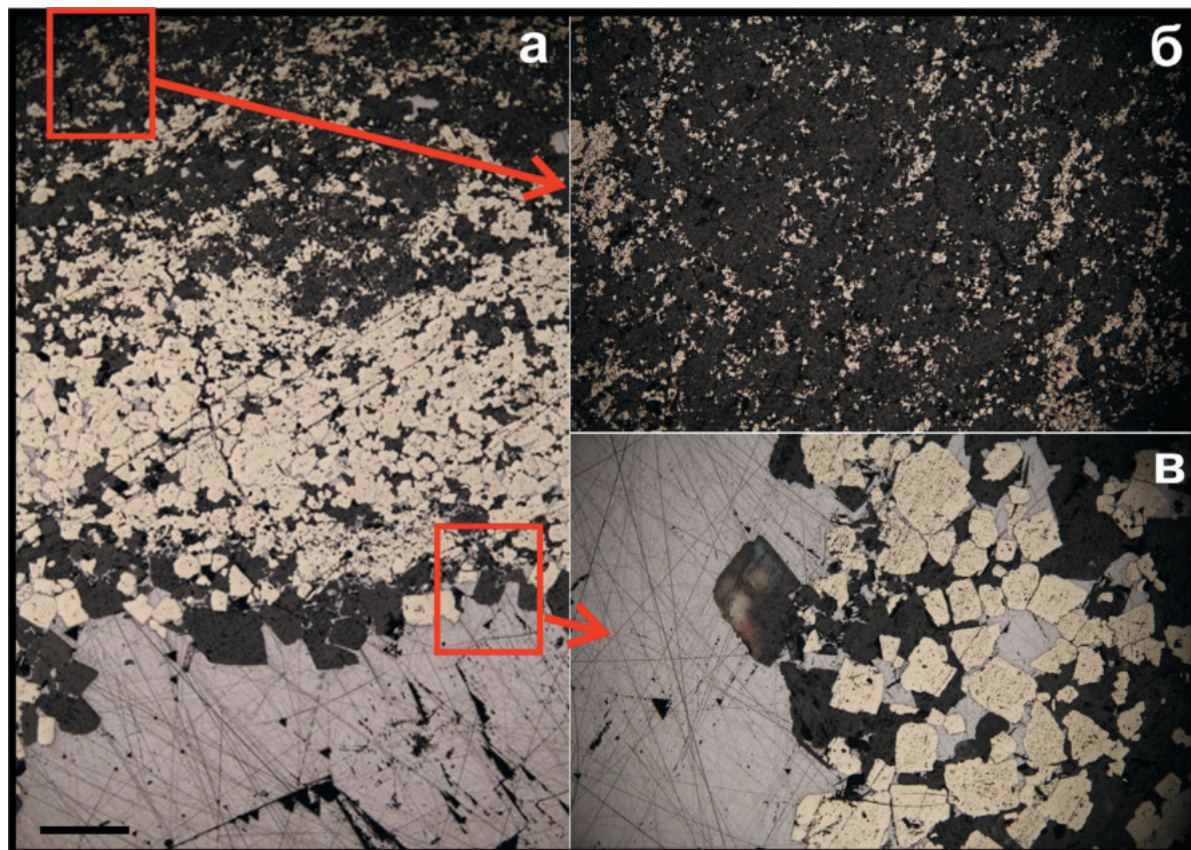
Хлорит образует агрегаты неправильной ксеноморфной формы, нередко в тесном сростании с сидеритом (фиг. 5в). Кроме этого, в сплошных рудах отмечаются единичные гипидиоморфные кристаллы фосфата РЗЭ — рабдофана вытянутой формы (фиг. 5г). Кристаллы частично корродированы пиритом.

Рудные минералы прожилков представлены сульфидами: сфалеритом, галенитом и пиритом в разных соотношениях (фиг. 3, 4, 5), в меньших количествах присутствуют халькопирит, пирротин, арсенопирит, марказит, сульфиды и сульфосоли Ag . Пирит участками образует сплошные, практически сливные агрегаты с более мелкими включениями галенита и сфалерита (фиг. 5г), иногда пирит присутствует в виде скоплений мелких кристаллов кубической формы (фиг. 5а). Галенит в основном образует ксеноморфные выделения (фиг.

5а, б) или включения в агрегатах пирита. Сфалерит встречается в виде выделений в агрегатах пирита или в виде мелких одиночных зерен. В некоторых участках отмечаются ксеноморфные полиминеральные агрегаты акантита Ag_2S и пиростильпнитита Ag_3SbS_3 (фиг. 5а, б) в сростании с галенитом и сфалеритом, заполняющие пространства между гипидиоморфными кристаллами пирита.

ИЗОТОПНЫЙ СОСТАВ СЕРЫ И КИСЛОРОДА

Изотопный состав серы в сульфидах из прожилков характеризуется относительным обогащением тяжелым изотопом, но значения $\delta^{34}\text{S}$ сильно варьируют в пределах 8.2–25‰ (табл. 1, фиг. 6), что свидетельствует о гетерогенном источнике серы. Расчет температур образования сульфидов по изотопному геотермометру (по парам галенит—сфалерит и пирит—галенит) показал интервал значений 430–450°C; по флюидным включениям (см. ниже) параметры близкие.



Фиг. 3. Микрофотографии руды Озерного месторождения. а — общий вид руд, где при перекристаллизации происходит укрупнение минеральных зерен и появляются участки сплошных галенитовых агрегатов; б — увеличенный фрагмент аншлифа (красный квадрат) с участком мелкозернистой руды, в — увеличенный фрагмент участка аншлифа, где наблюдается переход к сливным галенитовым рудам. Длина линейки — 0.2 мм.

Значения $\delta^{18}\text{O}$ в кварце составляют 16.9–17.9‰ (табл. 2). Расчет изотопного состава равновесного флюида для температуры 450°C показал значения $\delta^{18}\text{O}_{\text{фл}} = 13.6\text{--}14.6\text{‰}$, что соответствует значениям, характерным для метаморфических вод (фиг. 7).

ТЕРМОБАРОГЕОХИМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

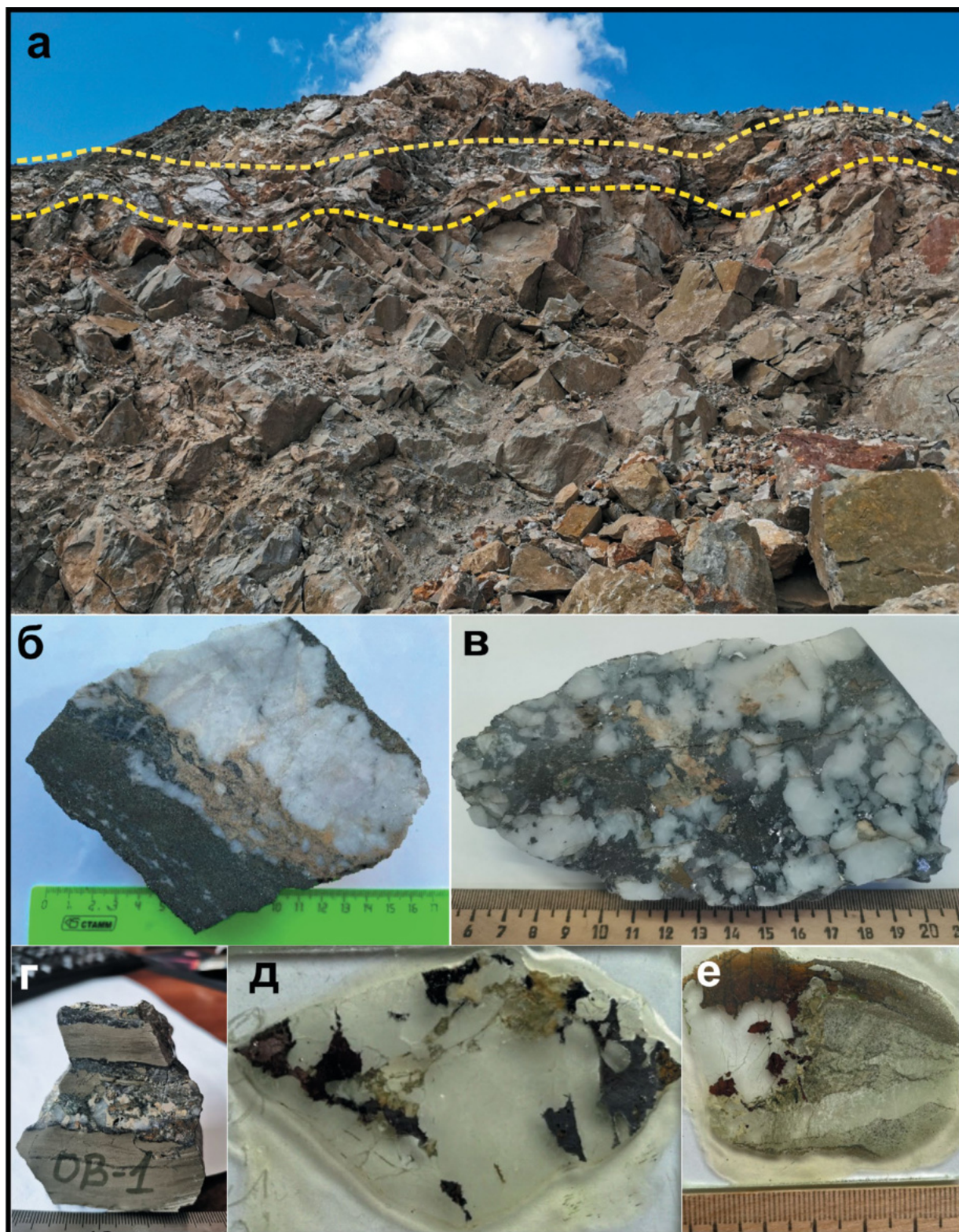
Для выяснения условий перекристаллизации руд были проведены исследования флюидных включений (ФВ) в кварце и сидерите из вышеописанных сидерит-кварц-сульфидных жил и прожилков. Были изучены первичные ФВ, отобранные согласно известным критериям первичности (Реддер, 1987). Все изученные включения имеют двухфазовый состав (газ > жидкость) и размеры в интервале от первых до 10 мкм, в единичных случаях до ~20 мкм.

Большая часть изученных включений находится в зернах кварца (фиг. 8а–в, г, е). Такие ФВ часто имеют округлую или изометричную форму и относительно крупную газовую фазу. Большая

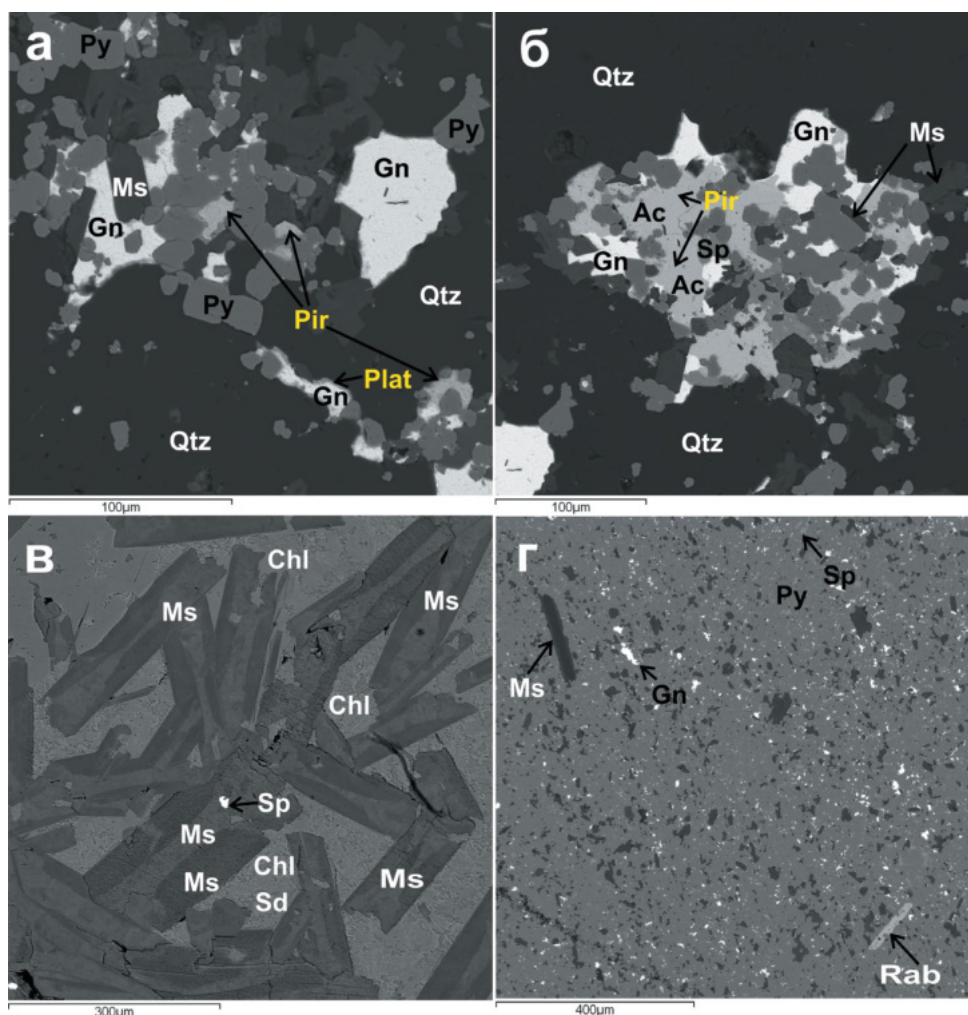
часть таких включений гомогенизируется в жидкую фазу (фиг. 8а, б) при температурах гомогенизации в интервале от 420 до 200°C, единичные включения при температуре 505°C (фиг. 9). Кроме этого, в некоторых зернах кварца отмечаются более редкие включения овальной или изометричной формы (фиг. 8в, г), которые гомогенизируются в газовую фазу при относительно более высоких температурах от 535–390°C и одно ФВ — при 300°C (см. фиг. 9).

Температуры плавления льда во включениях в кварце менялись от –18.7 до –5 °C, соответственно соленость растворов варьировала в диапазоне от 21.5 до 7.9 мас. % экв. NaCl. Температуры эвтектики соответствуют двум диапазонам –21.2...–23.4 и –38...–55°C. Такие значения наиболее соответствуют солевым системам NaCl–H₂O, NaCl–KCl–H₂O, MgCl₂–KCl–H₂O и CaCl₂–NaCl–H₂O.

В некоторых зернах кварца в пределах одной зоны роста отмечаются группы мелких ($\leq 2\text{--}5$ мкм) сингенетических существенно-газовых (С-Г) и существенно-водных (С-В) флюидных включений (фиг. 8е). Наличие таких ФВ является свидетельством периодов



Фиг. 4. Жилы и прожилки с полиметаллической сульфидной минерализацией в рудных телах Озерного месторождения. а – кварц-сульфидная жила мощностью до 2 м (обозначена пунктиром) в западной стенке Восточного карьера; б, в, г – образцы кварц-карбонат-сульфидных прожилков; д, е – полированные пластины из кварц-карбонат-сульфидных прожилков.



Фиг. 5. Микрофотографии руд в обратно-рассеянных электронах. а, б — взаимоотношения минералов в кварц-сульфидных жилах; в — сечения таблитчатых кристаллов зонального мусковита, которые в интерстициях цементируются агрегатами хлорита и сидерита; г — участок массивной существенно пиритовой руды, с мелкими включениями галенита, сфалерита и редкими вытянутыми зернами мусковита и рабдофана. Сокращения названий минералов: Qtz — кварц, Ms — мусковит, Chl — хлорит, Sd — сидерит, Py — пирит, Gn — галенит, Sp — сфалерит, Ac — акантит, Pir — пиростильпнит, Rab — рабдофан, Plat — платнерит.

гетерогенизации (вскипания) рудообразующих растворов. Это позволяет считать, что измеренные температуры гомогенизации были близки к истинным значениям температур минералообразования, что подтверждается данными по изотопной термометрии. Так, расчет температур изотопного равновесия в парах пирит—галенит, галенит—сфалерит показал значения температур 430—450°C, что попадает в интервал измеренных температур гомогенизации ФВ.

В зернах сидерита встречаются относительно редкие первичные флюидные включения, которые также имеют небольшие размеры от первых микрон до ~10 микрон (фиг. 8д). Диапазон температур гомогенизации этих включений несколько

ниже по сравнению с включениями из кварца, он варьирует от 320 до 219°C (фиг. 9). Температуры плавления льда заметно ниже и меняются в интервале от –3.5 до –6°C, что соответствует общей солености растворов – 5.7–9.2 мас. % экв. NaCl. Температуры эвтектики в этих включениях определить не удалось.

Газовый состав включений, определенный методом рамановской спектроскопии, показал наличие CO₂ в некоторых включениях. Кроме CO₂ идентифицирован CH₄.

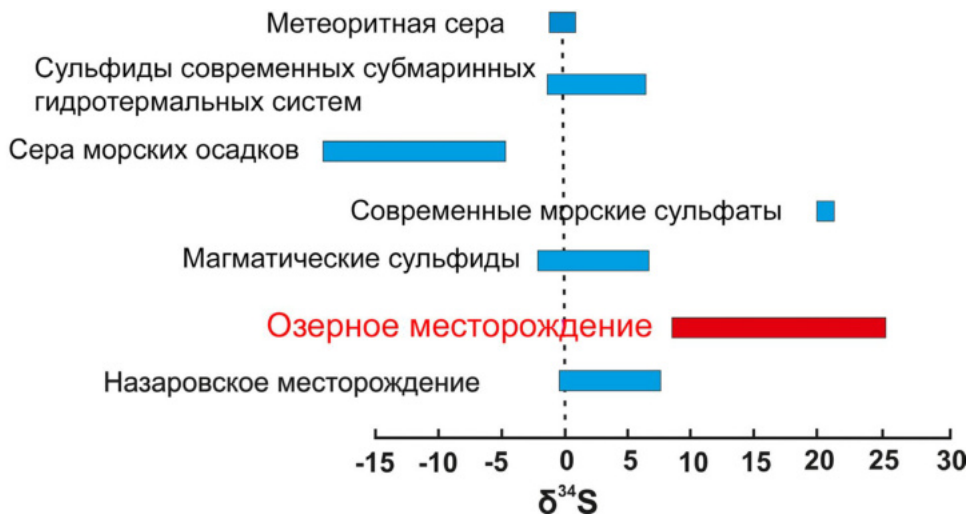
Расчет давлений минералообразования по фенгитовому геобарометру, по данным разных авторов (табл. 3) и по программе NOKIEFLINCS_H₂O-NaCl,

Таблица 1. Изотопный состав сульфидной серы в перекристаллизованных рудах Озерного месторождения

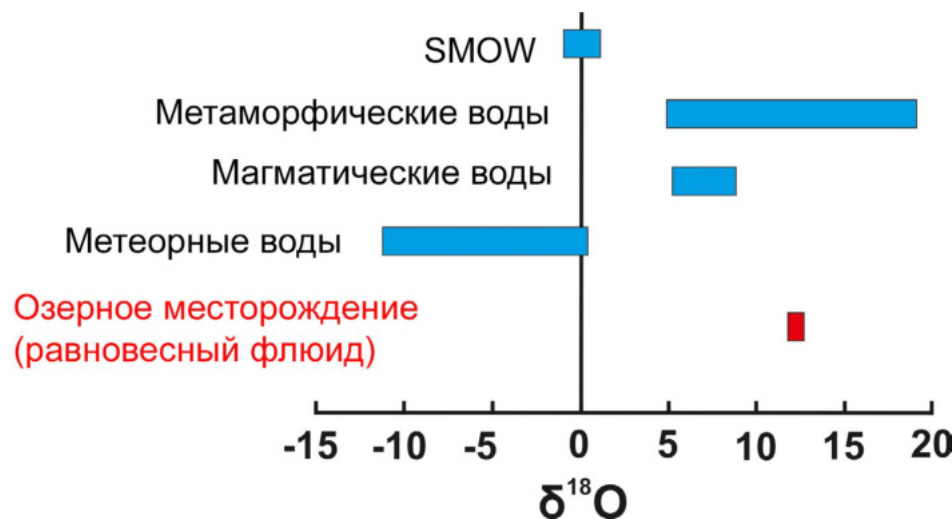
№ п/п	№ обр.	Минерал	$\delta^{34}\text{S}, \text{‰}$	$T, ^\circ\text{C}$	$\delta^{34}\text{S}$ флюида
1	Oz-B2	галенит	21.2	450	9.6
2	O22-104	сфалерит	21.2		
3	O22-118	халькопирит	10.5		
4	O22-118-1	пирит	10.4		
5	O22-126	халькопирит	15.4		
6	O22-18	халькопирит	10.0		
7	O22-25	пирит	10.4		
8	O22-25-1	галенит	8.4		
9	O22-27	сфалерит	9.3		
10	O22-3	сфалерит	22.5		
11	OB-3	сфалерит	8.2	430	14.2
12	OB-4	галенит	15.8		
13	OB-4A-1	галенит	12.9		
14	OB-4A-2	сфалерит	14.4		

Таблица 2. Изотопный состав кислорода

№ обр.	Минерал	$\delta^{18}\text{O}$ кварца	$\delta^{18}\text{O}$ равновесного флюида
O22-3	Кварц	17.9	14.6
O22-18	Кварц	17.2	13.9
O22-25	Кварц	17.3	14.0
O22-27	Кварц	16.9	13.6
O22-104	Кварц	17.9	14.6



Фиг. 6. Изотопный состав серы в сульфидах из кварц-сульфидных прожилков. Здесь и далее – значения для природных резервуаров даны по (Hoefs, 2009).



Фиг. 7. Изотопный состав кислорода в равновесном флюиде.

показал согласующиеся значения в интервале 875–2054 бар.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Первичные руды Озерного месторождения представлены субпластовыми залежами массивных, слоисто-полосчатых и брекчиевых сульфидных руд, количественно преобладающим минералом которых является пирит. Одной из технологических проблем, связанных с качеством сырья Озерного месторождения, стала плохая обогатимость первичных руд вследствие их тонкозернистого строения и субмикронной размерности выделений главных промышленных минералов – галенита и сфалерита. Обилие пирита (не извлекается из руд и остается в хвостах) также накладывает ограничения для утилизации отходов горного производства. В то же время, самыми богатыми по содержанию главных полезных компонентов (Pb и Zn) и относительно легкообогатимыми являются перекристаллизованные руды, поскольку они характеризуются крупнокристаллическим строением и высокими содержаниями сфалерита и галенита. На долю перекристаллизованных руд приходится около трети от всего объема руд (фиг. 1). Следовательно, можно

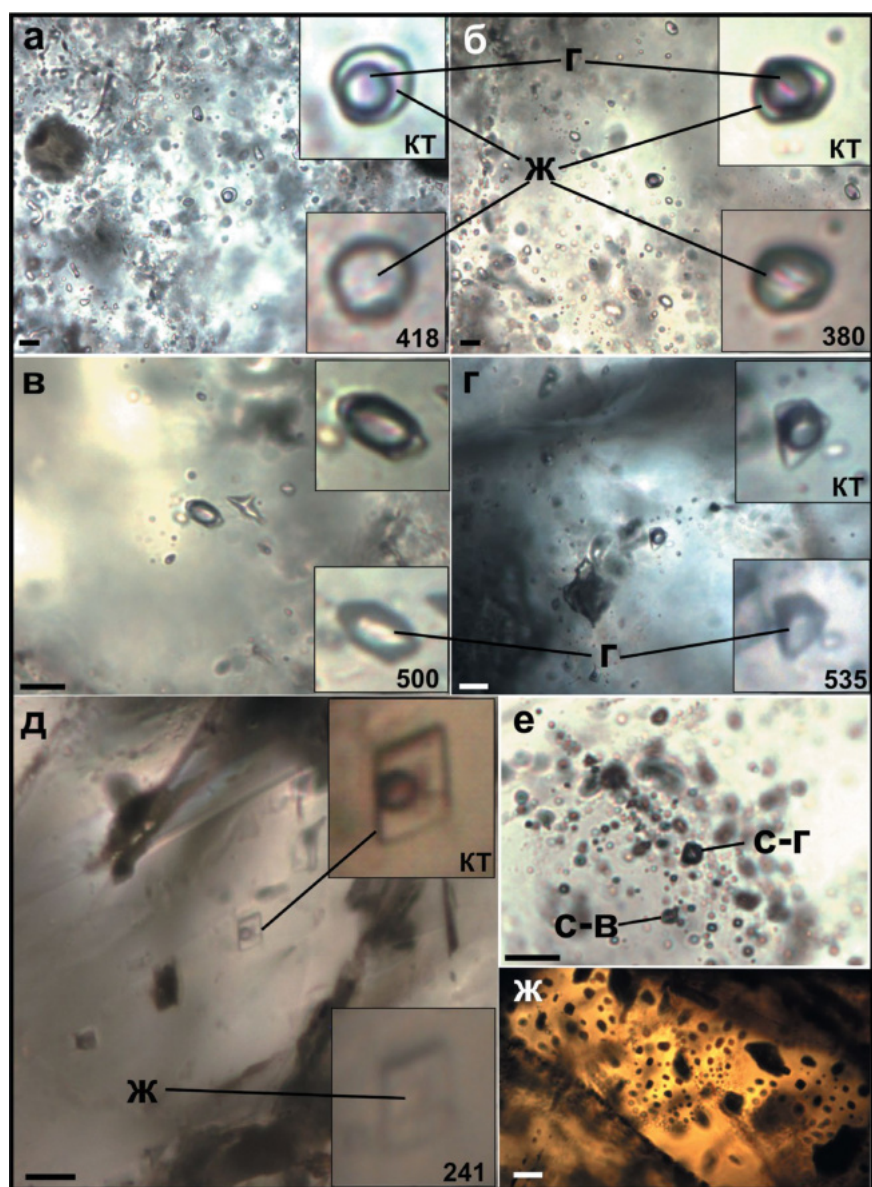
предполагать, что эпигенетические процессы развиты намного шире, чем ранее предполагалось.

Изотопный состав кислорода, отвечающий формированию кварца из метаморфических вод, доказывает метаморфогенное происхождение кварц-сульфидных жил и прожилков. Наряду с текстурными признаками – будинированием, рассланцеванием первичных руд – появление метаморфогенного кварца дополнительно подтверждает преобразование первичных руд в результате метаморфических процессов.

Широкие вариации измеренных значений δ³⁴S сульфидов (от 8 до 25‰) свидетельствуют о гетерогенном источнике их серы. Изотопный состав серы в перекристаллизованных рудах в целом соответствует составу первичных руд Озерного месторождения. Относительно утяжеленные значения изотопного состава отвечают сере, восстановленной из сульфатов (Ковалев и др., 1998). Скорее всего, главным источником серы при формировании сульфидных руд явилась сера, восстановленная из сульфатов, в которой в качестве примеси добавлялась магматическая (ювенильная) сера. Следует отметить, что сульфатные минералы (барит) широко распространены в рудном поле Озерного месторождения и, по-видимому, присутствовали

Таблица 3. Расчетные давления по геобарометрам

№ п/п	Геобарометр	T, °C	P, bar	Ссылка
1	Фенгитовый (по составу мусковита)	430	937–2054	Massone, Schreyer, 1987
2	Фенгитовый (по составу мусковита)	430	1608–1985	Caddick, Thompson, 2008
3	Программа NOKIEFLINCS_H ₂ O-NaCl (по ФВ)	450	875–1914	Steele-MacInnis et al., 2012

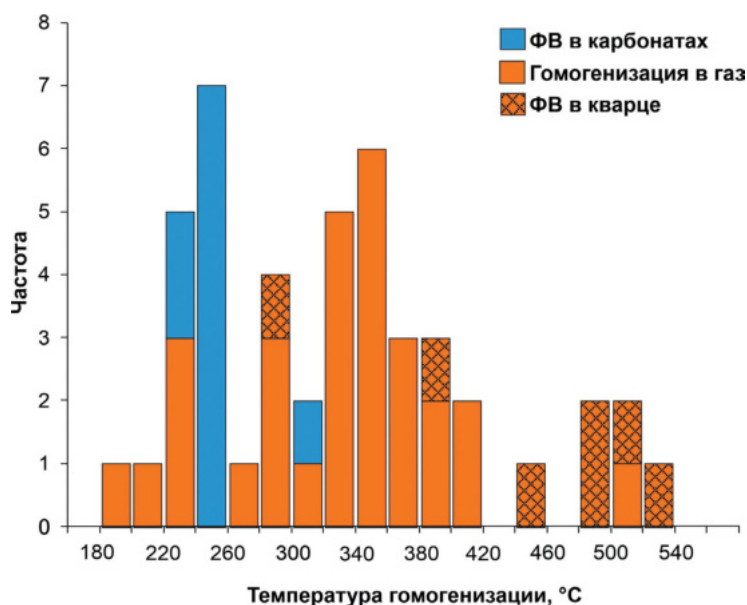


Фиг. 8. Фотографии первичных двухфазовых флюидных включений. а, б — одиночные флюидные включения округлой изометричной формы в кварце, общий вид и увеличенные фото ФВ при комнатной температуре (КТ) и при температуре гомогенизации в жидкость (T_g указана цифрами); в, г — флюидные включения в кварце, гомогенизирующиеся в газ; д — первичное флюидное включение в сидерите; е — группа относительно мелких сингенетических существенно-водных (С-В) и существенно-газовых (С-Г) ФВ; ж — многочисленные газовые включения в зерне сфалерита. Длина линейки — 10 мкм.

и в составе рудовмещающих осадочных толщ. Идентичность изотопных составов серы в первичных и перекристаллизованных рудах свидетельствует о том, что значимого изотопного фракционирования серы при метаморфизме не происходило.

По результатам изучения перекристаллизованных руд, в истории эволюции температурных условий отложения их кварца условно можно выделить 2 этапа (фиг. 9): более ранний высокотемпературный (~535–480°C) и поздний среднетемпературный (~400–200°C) — регрессивный. Карбонаты,

в частности сидерит, отлагались на более поздних стадиях при понижении температур до 320–219 °C. Совместно с карбонатом развивался хлорит, что можно рассматривать как диафорез. Общая концентрация солей рудообразующих растворов в процессе отложения с понижением температур менялась от относительно высокосолёных (21.5 до 7.9 мас. % экв. NaCl) до растворов с низкой солёностью около 5.7 мас. % экв. NaCl. Основные солевые компоненты, по данным криометрии, представлены хлоридами Na, K, Mg и Ca.



Фиг. 9. Интервалы температур гомогенизации флюидных включений из кварца и сидерита.

Таким образом, наши исследования показывают, что перекристаллизация руд происходила в достаточно высокотемпературных условиях, в присутствии относительно высококонцентрированной (соленость до 21.5 мас. % экв. NaCl) флюидной фазы. Температура процессов достигала 535°C, а давление — 2 кбар, что соответствует условиям эпидот-амфиболитовой фации метаморфизма. Экспериментальные данные показывают, что такие условия благоприятны для миграции и переотложения главных рудообразующих компонентов — Zn, Pb — совместно с силикатным веществом, прежде всего кварцем (Дамдинов и др., 2022). При этом возможна ремобилизация рудного вещества из вмещающих пород и дополнительное обогащение перекристаллизованных руд (Викентьев, 1987, 2004; Викентьев и др., 1988). Высококонцентрированные рассолы переносят рудное вещество и в низкотемпературных условиях, как показывают результаты исследования эпигенетических Pb—Zn месторождений типа Долины Миссисипи (MVT) (Leach et al., 2005).

Причины развития метаморфических процессов и возраст соответствующих событий в Озернинском рудном узле достоверно не установлены, вероятнее всего, они были обусловлены тектоническими процессами в ходе эволюции Удино-Витимской структурно-формационной зоны. Известно, что глобальный этап тектоно-магматической активизации структур южного обрамления Сибирской платформы был связан с коллизионными процессами и формированием Монголо-Охотского

складчатого пояса, сопровождавшимися становлением гигантского Ангаро-Витимского батолита, на герцинском этапе развития Удино-Витимской зоны, в период 320–280 млн лет (Цыганков и др., 2010; Руженцев и др., 2012). Ареально-узловое развитие оруденения в Удино-Витимской зоне, с уникальной по богатству и разнообразию рудной минерализацией в Озернинском узле, не исключает в качестве гипотезы возможности участия для этого времени крупного подкорового источника металлов, как это, например, недавно показано для Рудного Алтая (Чернышев и др., 2023).

Вероятно, в этот период 300 ± 20 млн лет происходило сильнейшее преобразование первичных колчеданных руд, хотя не исключено, что эти процессы начались на более ранних тектоно-метаморфических этапах. Поскольку данные по возрасту руд Озерного месторождения остаются дискуссионными (см. дискуссию в работе Викентьев и др., 2023), то увязать процессы эпигенетических преобразований с определенными этапами геодинамического развития региона пока не представляется возможным.

ВЫВОДЫ

1. Перекристаллизация первичных руд Озерного Pb—Zn месторождения выражается в укрупнении размеров минеральных агрегатов и формировании карбонат-кварц-сульфидных жил и прожилков с разными соотношениями указанных минералов.

2. Рудные минералы жил и прожилков представлены сульфидами: сфалеритом, галенитом и пиритом в разных соотношениях, в меньших количествах присутствуют халькопирит, пирротин, арсенопирит, марказит, сульфиды и сульфосоли Ag. Жильные минералы — кварц, сидерит, марганцовистый сидерит (олигонит); также присутствуют Ва-содержащий мусковит (эллахерит) и хлорит.

3. Термобарогеохимическими исследованиями установлено, что процессы перекристаллизации руд происходили при повышенных *PT*-параметрах, температуре до 535°C и давлении до 2 кбар, в присутствии относительно высококонцентрированной (соленость до 21.5 мас. % экв. NaCl) флюидной фазы, в составе газовой фазы установлены CO₂ и CH₄. Высокотемпературные условия подтверждаются данными изотопной термометрии. На поздней стадии руды подвергались диафорезу.

4. Преобразования руд обусловлены процессами динамометаморфизма, но неопределенность с возрастом оруденения Озерного месторождения не позволяет оценить время развития метаморфических процессов и увязать их с этапами геодинамической эволюции региона. Это требует дальнейших исследований.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследования выполнены при поддержке гранта Российского научного Фонда № 22–17–00106.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Борисенко А.С. Изучение солевого состава газовой-жидких включений в минералах методом криометрии // Геология и геофизика. 1977. № 8. С. 16–27.
- Васильев И.Л. Геология Еравнинского рудного поля. Новосибирск: Наука, 1977. 126 с.
- Викентьев И.В. Метаморфогенные структуры Тишинского месторождения (Рудный Алтай) // Геология рудных месторождений. № 1. 1987. С. 66–76.
- Викентьев И.В., Прокофьев В.Ю., Дорофеева В.А. Тектонический и флюидный режим метаморфогенного перераспределения рудного вещества Тишинского месторождения (Рудный Алтай) // Докл. АН СССР 1988. Т. 299. № 1. С. 172–175.
- Викентьев И.В. Условия формирования и метаморфизм колчеданных руд. М.: Научный мир, 2004. 344 с.
- Викентьев И.В., Дамдинов Б.Б., Минина О.Р., Спирина А.В., Дамдинова Л.Б. Классификация процессов полиметаллического рудообразования и переходный VMS–SEDEX–MV-тип — пример гигантского Озерного месторождения в Забайкалье, Россия // Геология рудных месторождений, 2023. Т. 65. № 3. С. 201–236.
- Гордиенко И.В., Булгаков А.Н., Руженцев С.В., Минина О.Р., Климук В.С., Ветлужских Л.И., Ласточкин Н.И., Ситникова В.С., Ветлужских Т.А. История развития Удино-Витимской островодужной системы Забайкальского сектора Палеоазиатского океана в позднем рифее — палеозое // Геология и геофизика. 2010. Т. 51. № 5. С. 589–614.
- Гордиенко И.В., Нефедьев М.А. Курбино-Еравнинский рудный район Западного Забайкалья: геолого-геофизическое строение, типы рудных месторождений, прогнозная оценка и перспективы освоения // Геология рудных месторождений. 2015. Т. 57. № 2. С. 114–124.
- Дамдинов Б.Б., Котельников А.Р., Сук Н.И., Дамдинова Л.Б., Котельникова З.А., Ахмеджанова Г.М., Шаповалов Ю.Б. Экспериментальные исследования транспорта компонентов сульфидных руд в присутствии флюидной фазы при повышенных *PT*-параметрах // Докл. РАН. Науки о Земле. 2022. Т. 507. № 2. С. 209–216.
- Дистанов Э.Г., Ковалев К.Р. Текстуры и структуры гидротермально-осадочных колчеданно-полиметаллических руд Озерного месторождения. Новосибирск: Наука, 1975. 172 с..
- Ковалев К.Р., Бусленко А.И. Гидротермально-осадочный рудогенез и полиметаморфизм руд Озернинского рудного узла (Западное Забайкалье). Новосибирск: Наука, 1992. 214 с.
- Ковалев К.Р., Дистанов Э.Г., Перцева А.П. Вариации изотопного состава серы сульфидов при вулканогенно-осадочном рудообразовании и метаморфизме руд Озернинского рудного узла в Западном Забайкалье // Геология рудных месторождений. 1998. Т. 40. № 4. С. 336–353.
- Ковалев К.Р., Рипп Г.С., Дистанов Э.Г., Баулина М.В. Железисто-магнезиальные карбонаты и вариации изотопов углерода и кислорода на гидротермально-осадочном колчеданно-полиметаллическом месторождении Озерное (Забайкалье) // Геология и геофизика. 2005. Т. 46. № 4. С. 383–397.
- Минина О.Р., Доронина Н.А., Некрасов Г.Е., Ветлужских Л.И., Ланцева В.С., Аристов В.А., Наугольных С.В., Куриленко А.В., Ходырева Е.В. Ранние герциниды Байкало-Витимской складчатой системы (Западное Забайкалье) // Геотектоника. 2016. № 3. С. 63–84.
- Нефедьев М.А. Объемная модель и оценка перспектив Озернинского рудного узла по геофизическим данным (Западное Забайкалье). Улан-Удэ: Изд-во БНЦ СО РАН, 2009. 184 с.
- Реддер Э. Флюидные включения в минералах. Природа включений и методы их исследования. Т. 1. М.: Мир, 1987. 558 с.
- Руженцев, С.В., Минина О.Р., Некрасов Г.Е., Аристов В.А., Голионко Б.Г., Доронина Н.А., Лыхин Д.А. Байкало-Витимская складчатая система: строение и геодинамическая эволюция // Геотектоника. 2012. № 2. С. 3–28.

- Тарасова Р.С., Близнюк М.В., Бабкин И.Н. О формационном типе и генезисе Озерного свинцово-цинкового колчеданного месторождения // Геология и генезис эндогенных рудных формаций Сибири. М.: Наука, 1972. Вып. 143.
- Чернышев И.В., Викентьев И.В., Чугаев А.В., Дергачев А.Л., Раткин В.В. Источники металлов колчеданных месторождений Рудного Алтая по данным высокоточного MC–ICP–MS изучения изотопного состава свинца // Геохимия. 2023. № 2. С. 545–569. 10.31857/S001675252306002X
- Bodnar R.J., Vityk M.O. Interpretation of microthermometric data for H₂O–NaCl fluid inclusions // Fluid inclusions in minerals: methods and application. Ed. by Benedetto De Vivo, Maria Luce Frezzotti. Pontignano-Siena. 1994. P. 117–130.
- Caddick M.J., Thompson A.B. Quantifying the tectono-metamorphic evolution of pelitic rocks from a wide range of tectonic settings: mineral compositions in equilibrium // Contributions to Mineralogy and Petrology. 2008. V. 156. P. 177–195.
- Hoefs J. Stable isotope geochemistry. 6th edition. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2009. 285 p.
- Leach D.L., Sangster D.F., Kelley K.D., Large R.R., Garven Grant, Allen C.R., Gutzmer Jens, Walters Steve. Sediment-hosted lead-zinc deposits: a global perspective: Society of Economic Geologists. Economic Geology One Hundredth Anniversary Volume, 1905–2005. 2005. p. 561–607.
- Massonne H.J., Schreyer W. Phengite geobarometry based on the limiting assemblage with K-feldspar, phlogopite, and quartz. Contributions to Mineralogy and Petrology. 1987. V. 96. P. 212–224.
- Steele-MacInnis M., Lecumberri-Sanchez P., Bodnar R.J. HokieFlincs_H₂O–NaCl: A Microsoft excel spreadsheet for interpreting microthermometric data from fluid inclusions based on the PVTX properties of H₂O–NaCl // Computers and Geosciences. 2012. V. 49. P. 334–337.

CONDITIONS OF RECRYSTALLIZATION OF ORES OF THE OZERNOE POLYMETALLIC DEPOSIT (WESTERN TRANSBAIKALIA, RUSSIA)

L. B. Damdinova^{1, *}, B. B. Damdinov¹, I. V. Vikentyev^{1, 2}, and V. N. Reutsky³

¹Geological Institute, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Ulan-Ude, 670047 Russia

²Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy, and Geochemistry, Russian Academy of Sciences, Moscow, 119017 Russia

³Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, 630090 Russia

*e-mail: ludamdinova@mail.ru

The Ozerne lead–zinc deposit is the largest in Russia in terms of zinc reserves. It has been established that primary layered–banded, massive and brecciated sulfide ores were subject to intensive post-ore deformation and recrystallization, which accompanied dynamic and contact metamorphism. The transformations are expressed in the increase in the size of mineral aggregates and formation of carbonate–quartz–sulfide veins and veinlets with different ratios of constituent minerals. Ore minerals in veins and veinlets are represented by sphalerite, galena, and pyrite in different proportions; chalcopyrite, pyrrhotite, arsenopyrite, and marcasite occur in smaller quantities; and Ag sulfides and sulfosols are rare. The vein minerals are quartz, siderite, and manganese siderite (oligonite); Ba-bearing muscovite (ellacherite) and chlorite are also present. It was established that recrystallization of ores occurred at elevated *PT*-parameters—up to 535°C and up to 2 kbar—in the presence of relatively highly concentrated fluid phase (salinity up to 21.5 wt. % eq. NaCl). Ore transformations are mainly caused by processes of dynamometamorphism. There is still uncertainty both with the age of ore mineralization of the Ozerne deposit and with the development time of metamorphic processes. This does not allow linking these processes with the stages of geodynamic evolution in the region.

Keywords: Ozerne polymetallic deposit, sulfide ores, epigenetic transformations, dynamometamorphism, isotopic composition, fluid inclusions