



Оригинальная статья / Original article

УДК 553.463

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/2686-9993-2020-43-3-290-306>

Минеральный состав и условия формирования руд Инкурского вольфрамового месторождения (Джидинское рудное поле, Юго-Западное Забайкалье)

© Л.Б. Дамдинова^a, Б.Б. Дамдинов^b^{a,b}Геологический институт СО РАН, г. Улан-Удэ, Россия

Резюме: Целью исследований являлось уточнение минерального состава и определение условий формирования кварц-гюбнеритовых прожилков Инкурского вольфрамового штокеркового месторождения Джидинского рудного поля (Юго-Западное Забайкалье). Авторами было проведено минералого-петрографическое описание рудных кварц-гюбнеритовых прожилков, а также электронно-микроскопические исследования минеральных ассоциаций, термобарогеохимические исследования, включающие крио-термометрию, спектроскопию комбинационного рассеяния света индивидуальных флюидных включений в кварце, флюорите, гюбнерите и мусковите. Проведенные минералого-петрографические исследования позволили уточнить минеральный состав руд Инкурского месторождения, определить последовательность формирования минеральных парагенезисов. Термобарогеохимическими исследованиями установлено, что рудоотложение шло с понижением температуры из относительно слабосолёных (~5,7–14,6 масс. % эквивалента хлорида натрия) гомогенных растворов, в солевом составе которых преобладали хлориды кальция с примесями хлоридов натрия, калия и магния. В газовой фазе включений идентифицированы углекислый газ и азот. Установлены как минимум две стадии минералообразования: высокотемпературная (≥ 300 °C) и низкотемпературная (≥ 200 – 300 °C). Проведенные исследования позволили качественно оценить химический состав рудообразующих растворов. Установлено, что одним из главных факторов осаждения гюбнерита является снижение температуры.

Ключевые слова: Джидинское рудное поле, Инкурское штокерковое месторождение, вольфрам, флюидные включения, рудообразующие растворы

Благодарности: Исследования проведены с использованием оборудования Центра коллективного пользования «Аналитический центр минералого-геохимических и изотопных исследований Геологического института СО РАН» (г. Улан-Удэ). Работа выполнена в рамках бюджетного проекта Геологического института СО РАН № АААА-А16-116122110027-2 при частичной финансовой поддержке гранта РФФИ № 18-45-030002p_a.

Информация о статье: поступила в редакцию 07 мая 2020 г.; поступила после рецензирования и доработки 30 июля 2020 г.; принята к публикации 02 сентября 2020 г.

Для цитирования: Дамдинова Л.Б., Дамдинов Б.Б. Минеральный состав и условия формирования руд Инкурского вольфрамового месторождения (Джидинское рудное поле, Юго-Западное Забайкалье). *Науки о Земле и недропользование*. 2020. Т. 43. № 3. С. 290–306. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2020-43-3-290-306>

Mineral composition and formation conditions of the Inkur tungsten deposit ores (Dzhidinsky ore field, South-Western Transbaikalia)

© Lyudmila B. Damdinova^a, Bulat B. Damdinov^b^{a–g}Geological Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Ulan-Ude, Russia

Abstract: The aim of the study is to clarify the mineral composition and determine the conditions of the formation of the quartz-hubnerite veins of the Inkur stockwork tungsten deposit (the Dzhidinsky ore field, South-Western Transbaikalia). The research methods include a mineralogical and petrographic description of the ore quartz-hubnerite veins; an electron microprobe analysis of the mineral associations; thermometry, cryometry, and Raman spectroscopy of the individual fluid inclusions in quartz, fluorite, hubnerite, and muscovite. The mineralogical and petrographic studies has made it possible to clarify the mineral composition of the Inkur deposit ores and determine the mineral paragenesis formation sequence. The fluid inclusion studies have established that the ore deposition was occurring in the relatively low-salinity (~5.7–14.6 wt. % eq. NaCl) homogeneous solutions due to a decrease of the temperature. The study of the salt composition of the solutions has identified Ca chloride as a prevailing component, with NaCl, KCl, and MgCl as admixtures. CO₂ and N₂ have been



identified in the gas phase of inclusions. Two stages of mineral formation have been defined: high-temperature (≥ 300 °C) and low-temperature (≥ 2.00 – 300 °C). The conducted studies allow qualitative estimation of the chemical composition of the ore-forming solutions. It has been established that one of the main factors of the hubnerite deposition is a temperature factor.

Keywords: Dzhidinsky ore field, Inkur stockwork deposit, tungsten, fluid inclusions, ore-forming solutions

Acknowledgements: The study has been conducted with the use of the Shared Research Center “Analytical Center for Mineralogical-Geochemical and Isotope Research of the Geological Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences” (Ulan-Ude). The work has been carried out within the government-funded project of the Geological Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of sciences № AAAA-A16-116122110027-2 with a partial financial support of the RFBR (Russian Foundation for Basic Research) grant № 18-45-030002p_a.

Information about the article: received May 07, 2020; revised July 30, 2020; accepted September 02, 2020.

For citation: Damdinova LB, Damdinov BB. Mineral composition and formation conditions of the Inkur tungsten deposit ores (Dzhidinsky ore field, South-Western Transbaikalia). *Nauki o Zemle i nedropol'zovanie = Earth sciences and subsoil use*. 2020;43(3):290–306. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2020-43-3-290-306>

Введение

На территории Юго-Западного Забайкалья известны вольфрам-молибденовые месторождения Джидинского рудного поля, характеризующегося высокой концентрацией оруденения на небольшой площади. В состав рудного поля входят крупные промышленные месторождения: Первомайское, Инкурское и Холтосонское. Это уникальные геологические объекты и крупнейшие в России источники вольфрама и молибдена. В качестве примесных в рудах присутствует также и ряд других полезных компонентов: бериллий, кадмий, свинец, цинк, золото и др. Предшественниками установлено, что все три месторождения Джидинского рудного поля генетически связаны с единой гранитоидной интрузией. Формирование штокверковой вольфрам-молибденовой минерализации происходило в течение нескольких гидротермальных этапов, разделенных во времени периодами интрузивного магматизма. Считается, что сначала сформировался молибденовый штокверк (Первомайское месторождение), позже – прожилки с молибденово-бериллиевой минерализацией, затем – штокверк гюбнеритсодержащих прожилков (Инкурское месторождение) и кварц-гюбнеритовые жилы Холтосонского месторождения. Однако если последовательность образования этих месторождений была определена при геолого-разведочных и эксплуатационных работах, то современная информация о минеральном составе и условиях формирования каждого из выделенных типов оруденения практически отсутствует. В особенности это касается состава гидротермальных флюидов и таких парамет-

ров рудоотложения, как давление и температура. Минералогия руд была изучена ранее достаточно детально, но в связи с отсутствием на тот момент (60–70-е гг. XX в.) прецизионных методов микроанализа не все минеральные фазы были достоверно диагностированы. В целом для молибден-вольфрамовых месторождений физико-химические условия формирования до сих пор не исследовались достаточно детально, чтобы выявлять различия физико-химических параметров рудообразующих флюидов, при участии которых формируется вольфрамовая и молибденовая минерализация. Условия формирования и состав растворов, формировавших Первомайское молибденовое месторождение, считающееся самым ранним в ряду объектов Джидинского рудного поля, были изучены нами ранее [1]. Также был уточнен изотопный возраст молибденового оруденения и определены концентрации металлов в рудообразующих растворах.

В данном исследовании рассматривается Инкурское вольфрамовое месторождение. Оно является наиболее крупным месторождением вольфрама в России и относится к штокверковому геолого-промышленному типу. По запасам и содержанию триоксида вольфрама в рудах Инкурское месторождение сопоставимо с наиболее крупными месторождениями мира Хемердон (Великобритания), Пайн-Крик (США) и Ундур-Цаган (Монголия) [2]. Целью исследований является уточнение минерального состава и определение условий формирования кварц-гюбнеритовых прожилков, образующих Инкурский штокверк.



Методы исследования

Для решения минералогических и петрографических задач применялись методы оптической микроскопии с использованием поляризационного микроскопа OLYMPUS BX-51 с цифровой фотокамерой MicroPublisher 3.3 RTV. Химический состав минералов определен в Геологическом институте СО РАН (г. Улан-Удэ) аналитиком Е.В. Ходыревой и кандидатом геолого-минералогических наук С.В. Канакиным при помощи сканирующего электронного микроскопа LEO-1430VP с энерго-дисперсионным спектрометром INCA Energy 350.

Флюидные включения (ФВ) в минералах исследовались методами термометрии, криометрии, волюмометрии и спектроскопии комбинационного рассеяния света (КР-спектроскопии). Для определения температур общей гомогенизации, температур эвтектики и плавления льда водных растворов, температур растворения дочерних фаз и гомогенизации сжиженных газов использовалась микротермокамера THMSG-600 фирмы Linkam с диапазоном измерений температур от -196 до $+600$ °С. Стандартная аппаратная ошибка измерений составляет $\pm 0,1$ в отрицательной и ± 5 °С в положительной области температур. Приблизительную оценку содержания солей во включениях находили по температуре плавления льда, используя двухкомпонентную водно-солевую систему ($\text{NaCl-H}_2\text{O}$) через эквивалент хлорида натрия [3]. Преобладающая соль в водном растворе включений определялась по температуре эвтектики, характеризующей водно-солевую систему [4].

Состав газовой фазы индивидуальных ФВ определен методом КР-спектроскопии в Институте геологии и минералогии имени В.С. Соболева СО РАН (г. Новосибирск) на одноканальном КР-спектрометре LabRamHR 800 с полупроводниковым детектором Horiba Scientific Symphony II и конфокальным микроскопом Olympus BX-41. В качестве возбуждающего использовано излучение аргонного лазера CVI Melles Girot с длиной волны 514 нм и выходной мощностью 30–50 мВт.

Объекты исследования

Джидинское рудное поле. Джидинское рудное поле представляет собой пример

крупного комплексного молибден-вольфрамового оруденения. На относительно небольшой площади здесь расположены три крупных месторождения. Разработка Джидинского рудного поля начиналась в 1934 г. старательскими артелями с одновременным строительством объектов горно-обогатительного производства. Со времен Великой Отечественной войны и до 1973 г. комбинат разрабатывал Первомайское молибденовое и Холтосонское вольфрамовое месторождения. С 1974 г. сырьевую базу составляют два вольфрамовых месторождения – жильное (Холтосон) и штокверковое (Инкур), отрабатываемые подземным (шахтным) и поверхностным (карьером) способами соответственно. Геология данного рудного поля изучалась многими исследователями: М.В. Бесовой [5], П.И. Нелетовым и др. [6], Е.Н. Смолянским [7], В.И. Игнатовичем [2, 8, 9], Е.П. Малиновским [10], Д.О. Онтоевым [11, 12], Е.Е. Батуриной, Г.С. Риппом [13], И.В. Гордиенко и др. [14], А.Н. Дистановой [15], П.Ю. Ходановичем, О.К. Смирновой [16, 17], И.В. Чернышевой и др. [18], Ф.Г. Рейфом, Е.Д. Бажеевым [19, 20], М.М. Повилайтис [21, 22], К.З. Стельмачонком [23, 24] и так далее.

Джидинское рудное поле расположено в юго-восточной части Западного Забайкалья, в пределах одноименной зоны палеозойского, в настоящее время представляющей собой сложно построенную покровно-складчатую область, геологическая структура которой определяется дислокациями позднепалеозойского этапа со значительной сдвиговой составляющей. В геологическом строении Джидинского рудного поля принимают участие хохюртовская осадочно-эффузивная свита, модонкульский диоритовый массив и многофазная Гуджирская гранитоидная интрузия.

Через центральную часть рудного поля проходит Джидинский глубинный разлом, имеющий субмеридиональное простирание. Он трассируется зонами меланжа и бластомилонитизации общей мощностью 600–1000 м, включающими небольшие линзовидные крутопадающие тела измененных гипербазитов цакирского комплекса.

Хохюртовская свита занимает восточную часть данного рудного поля и сложена



песчаниками, сланцами, известняками, а также вулканитами основного и среднего состава.

Модонкульский интрузив является фрагментом крупного массива, вытянутого в северо-западном направлении, который, в свою очередь, слагается кварцевыми диоритами [16].

В пределах контакта палеозойских кварцевых диоритов Модонкульского массива с эффузивно-осадочными толщами сформировалась Гуджирская интрузия, с которой традиционно связывается образование многоэтапного комплексного молибден-редкометалльно-вольфрамового оруденения рассматриваемого рудного поля. Интрузия представлена на поверхности многочисленными дайками преимущественно кислого состава

и Первомайским штоком гранит-порфиров (рис. 1). Среди пород дайкового комплекса выделяются дайки серых сиенитов, серых кварцевых сиенит-порфиров, керсантитов, бостонитов и гранит-порфиров. Небольшое распространение характерно для серых кварцевых сиенит-порфиров и сиенитов, значительно уступают им по количеству керсантиты, бостониты и гранит-порфиры. Дайки имеют северо-западное, субширотное, северо-восточное и субмеридиональное простирание при углах падения от 30° и более. Реже отмечаются субгоризонтальные тела. При пересечениях разновозрастных даек отмечаются сбросовые перемещения малых амплитуд, не превышающие первые метры.

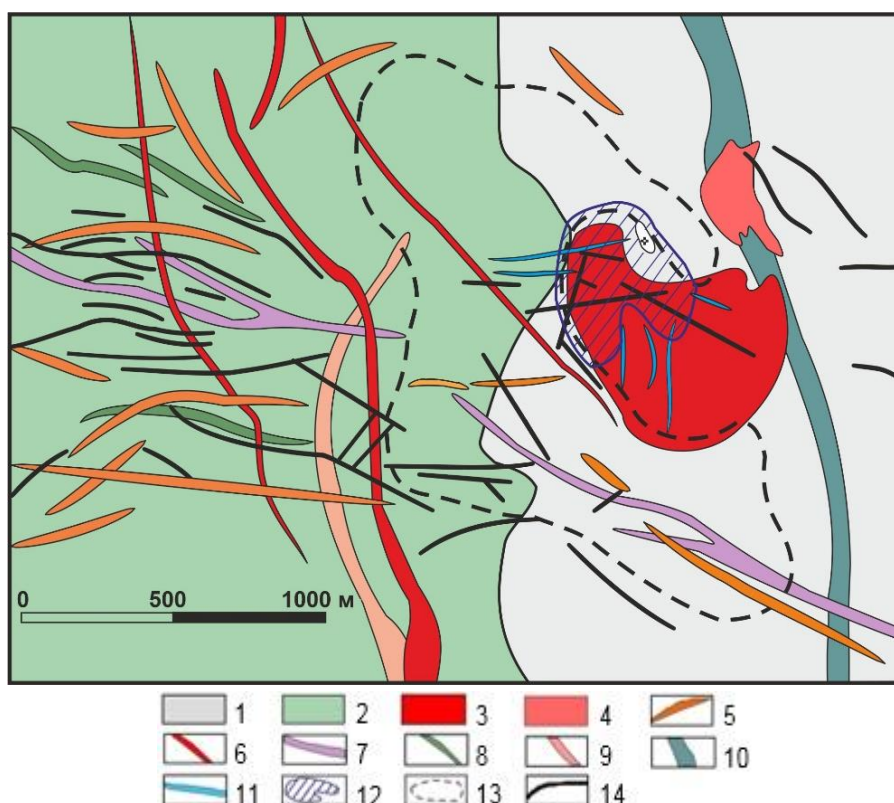


Рис. 1. Схематическая геологическая карта Джидинского рудного поля (по В.И. Игнатовичу, 1975):

- 1 – хохюртовская свита: эффузивы; 2 – Модонкульский массив: диориты, кварцевые диориты;
3 – Первомайский массив: гранит-порфиры; 4 – Горкинский гранитный массив; 5 – серые сиениты;
6 – дайки гранит-порфиров; 7 – дайки бостонитов; 8 – микродиориты; 9 – плагиограниты;
10 – Джидинский глубинный разлом; 11 – кварц-молибденитовые жилы; 12 – Первомайский молибденовый штокверк; 13 – Инкурский вольфрамовый штокверк; 14 – кварц-сульфидно-гюбнеритовые жилы

Fig. 1. Schematic geological map of the Dzhydinsky ore field (Vladimir I. Ignatovich, 1975):

- 1 – Khokhyurt suite: effusives; 2 – Modonkul massif: diorites, quartz diorites;
3 – Pervomaisky massif: granite-porphyrates; 4 – Gorkinsky granitoid massif; 5 – gray syenites;
6 – dykes of granite porphyry; 7 – dykes of bostonites; 8 – microdiorites; 9 – plagiogranites;
10 – Dzhydinsky deep fault; 11 – quartz-molybdenite veins; 12 – Pervomaisky molybdenum stockwork;
13 – Inkur tungsten stockwork; 14 – quartz-sulfide-hubnerite veins



Определяющую роль в размещении оруденения сыграли местные разломы субширотного, северо-западного, северо-восточного и субмеридионального простирания, которые наследуют направления более ранних разрывов, трассирующихся в вулканиках телами гипербазитов, а в кварцевых диоритах – зонами бластомилонитизации и метасоматоза, дайками. Для рудовмещающих разломов, являющихся элементами региональной сети трещиноватости, характерны малоамплитудные сбросовые перемещения. Они, в свою очередь, трассируются зонами брекчирования и метасоматических изменений пород.

Первомайский шток гранит-порфиров является самым крупным выходом Гуджирской интрузии на поверхность. Площадь выхода Первомайского массива на дневную поверхность составляет 0,35 км². По данным буровых и геофизических работ, Первомайский массив представляет собой лакколитообразное тело с многочисленными апофизами, которое вытянуто в северо-западном направлении и погружается на юго-восток согласно кровле Модонкульского массива. В апикальной его части отмечаются ксенолиты гранитов и граносиенитов, залегающих глубже, а также ксенолиты кровли, свидетельствующие о небольшой глубине эрозионного среза массива.

Предшественниками установлено, что все три месторождения Джидинского рудного поля генетически связаны с единой Гуджирской гранитоидной интрузией [19, 20 и др.]. Формирование штокверковой молибден-вольфрамовой минерализации происходило в течение нескольких гидротермальных этапов, разделенных во времени периодами интрузивного магматизма. Минерализация каждого последующего гидротермального этапа имеет специфическую рудную нагрузку, наследуя в то же время некоторые черты предыдущего. Сначала сформировался молибденовый штокверк (Первомайское месторождение), позже – прожилки с молибден-бериллиевой минерализацией, затем – штокверк гюбнерит-содержащих прожилков (Инкурское месторождение) и кварц-гюбнеритовые жилы (Холтосонское месторождение).

Молибденовое оруденение приурочено к апикальной части Первомайского штока, вольфрамовое – к многочисленным кварцевым жилам западной части рудного поля (Холтосонское месторождение) и к штокверкам в центральной части (Инкурский штокверк). В жильном поле известно более 200 жил среднего и крутого падения; размеры промышленных жил по простиранию и падению колеблются в широких пределах при мощности от десятых долей до 3–4 м, в раздувах – до 15 м.

Последние изотопно-геохронологические данные о возрасте цирконов (124 ± 2 млн лет) из гранит-порфиров Первомайского штока, мусковита ($127,6 \pm 1,5$ млн лет) и молибденита ($118,5 \pm 1,6$ и $122,4 \pm 1$ млн лет) из рудных зон Первомайского молибденового месторождения свидетельствуют о генетической связи процессов гранитообразования и молибденового рудоотложения на рубеже 119–128 млн лет назад [1].

Геологическое строение Инкурского месторождения. Инкурское штокверковое месторождение вольфрамовых руд расположено в 7 км к юго-востоку от г. Закаменска республики Бурятия. Детальная разведка месторождения проводилась в 1967 г. геологами М.Н. Хулугуровым и С.С. Тентильовым для утверждения промышленных запасов. Оно разрабатывалось открытым способом с 1973 г. и вскрыто на поверхности одноименным карьером (рис. 2, а).

Месторождение обрамляет Первомайский массив гранит-порфиров в форме полукольца с юго-западной, западной и северо-западной сторон (см. рис. 1). Рудные прожилки, образующие штокверк, залегают в кварцевых диоритах Модонкульского массива и частично – в метаморфизованных осадочно-вулканогенных породах хохюртовской свиты. Штокверк протягивается приблизительно на 2500 м при ширине 800–850 м и разведан на глубину 470–500 м.

Сложная структура Инкурского штокверка обусловлена наличием разрывных зон различного происхождения и возраста [16]. Основное значение в большей части штокверка принадлежит крутопадающим линейным зонам субширотного и субмеридионального простирания.



На локализацию вольфрамовой минерализации кроме определяющих структурных факторов влияют литолого-петрографические особенности вмещающих пород. Например, в зоне экзоконтакта Модонкульского массива кварцевых диоритов, насыщенной ксенолитами метавулканитов хохюртовской свиты, отмечается угнетение линейных штокверковых зон [16]. Пологая кровля Модонкульского массива, сложенная метавулканитами, способствует развитию в породах массива разрывных нарушений, обусловивших концентрацию как штокверкового и жильно-прожилкового оруденения, так и вольфрамово-рудных жил Холтосонского месторождения.

Детальные структурные исследования Инкурского штокверка выявили радиально-концентрическую структуру месторождения, связанную с образованием крупного сводового поднятия в кварцевых диоритах под действием вертикальных напряжений, в частности давлений магматических масс со стороны глубинных частей предполагаемого очага. В этих условиях одновременно раскрывались радиальные и концентрические трещины, в которых отлагались рудные и жильные минералы [16].

Результаты исследований

Минеральный состав кварц-гюбнеритовых прожилков. Руды Инкурского месторождения представлены многочисленными кварцевыми (рис. 2, с–е) и кварц-мусковитовыми (рис. 2, ф) жилами и прожилками с рудной минерализацией, густая сеть которых обуславливает образование штокверкового оруденения (рис. 2, б). Все прожилки характеризуются наличием раздувов и пережимов мощности. Промышленное оруденение в штокверке распределено весьма неравномерно. Наиболее обогащенные гюбнеритом участки (см. рис. 2, d, e) отмечаются на южном и северном флангах, а для центральной части характерно относительно слабое оруденение (см. рис. 2, с). Кроме этого, участки с повышенным содержанием вольфрамита пространственно тяготеют к раздувам прожилков, что отмечалось и предшественниками [9].

Большая часть вольфрамоносных прожилков имеет мощность 1–3 см (см. рис. 2, с–f),

протяженность прожилков, как правило, достигает первых метров. Границы прожилков с вмещающими породами достаточно резкие. Наличие минералов (мусковит, гюбнерит), растущих от стенок прожилков к центральным частям (см. рис. 2, e, f), а также резкость границ прожилков с вмещающими породами свидетельствуют о том, что прожилки формировались путем выполнения.

Вмещающие породы в экзоконтактах рудных прожилков интенсивно превращены в березиты, причем березитизации подвержены как гранитоиды, так и метапесчаники вулканогенно-осадочной толщи, а также дайковые образования. Березиты и березитизированные породы образуют жило- или линзообразные тела с нечеткими границами, имеют размеры от первых сантиметров до первых десятков метров по мощности [16]. Березитизация выражается в появлении кварц-мусковитовой ассоциации с пиритом, карбонатом и флюоритом, замещающей первичные породы, причем с удалением от прожилков степень березитизации снижается (см. рис. 2, b, c).

Минеральный состав прожилков показан в табл. 1. Основные жильные минералы представлены кварцем, мусковитом, флюоритом и редким бериллом.

Главный минерал – кварц (~50–90 %) – является сквозным минералом, то есть образуется на всех стадиях минералообразования от ранней к поздней.

Мусковит (~5–30 %) имеет зеленоватую окраску и преимущественно приурочен к зальбандовым частям прожилков (см. рис. 2, f), как правило, растет перпендикулярно от стенок к центральным частям, кроме этого встречаются и более редкие чешуйки мусковита в центральных частях прожилков. Отмечается, что в маломощных (≤ 1 см) прожилках «призальбандовый» относительно крупночешуйчатый мусковит встречается чаще и количественно его больше (см. рис. 2, f), тогда как в относительно мощных прожилках (≥ 2 –3 см) мусковит в оторочках отмечается в меньших количествах (см. рис. 2, с–e).

Флюорит (≤ 2 –10 %) распространен весьма неравномерно и слагает, как правило, агрегаты небольших размеров и отдельные зерна неправильной формы среди зерен кварца.

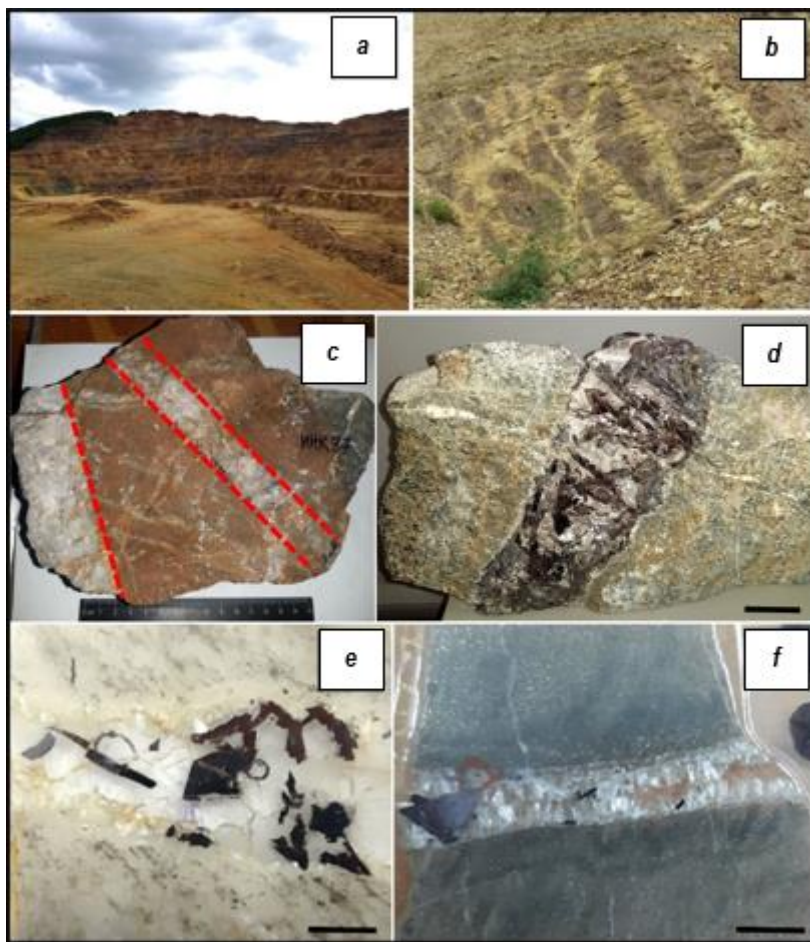


Рис. 2. Фотографии карьера, штокверка и рудных прожилков Инкурского вольфрамового месторождения:

a – Инкурский карьер; b – штокверковое оруденение в стенке Инкурского карьера; c – кварцевые прожилки с редкими зернами гюбнерита; d – богатый гюбнеритом кварцевый прожилок (образец Геологического музея Бурятского научного центра СО РАН); e – полированная пластина кварц-гюбнеритового прожилка с мусковитом в оторочках; f – кварцевый прожилок, обогащенный мусковитом в зальбандовых частях с редкими кристаллами гюбнерита, фото пластины
Длина масштабной линейки – 1 см

Fig. 2. Photos of the quarry, stockwork and ore veinlets of the Inkur tungsten deposit:

a – Inkur quarry; b – stockwork mineralization in the wall of the Inkur quarry; c – quartz streaks with rare grains of hubnerite; d – quartz vein rich in hubnerite (a sample of the Geological Museum of the Buryat Scientific Center, SB RAS); e – a polished plate of quartz-hubnerite vein with muscovite in the rims; f – quartz vein, enriched with muscovite in the selvage parts with rare crystals of hubnerite, photo of the polished plate
The length of the scale bar is 1 cm

Берилл ($\leq 1\text{--}2\%$) встречается в виде единичных зерен в кварцевых прожилках как акцессорная фаза.

Распределение рудной минерализации в прожилках крайне неравномерное, от фактически безрудных до обогащенных рудными минералами (до $\sim 40\text{--}50\%$) участков.

Главный рудный минерал представлен марганцевой разновидностью вольфрамита – гюбнеритом – с содержанием марганца – $16,9\text{--}17,5$ масс. %, Fe – $<0,59$ масс. %. Гюбне-

рит, как правило, образует кристаллы вытянутой шестоватой или столбчатой формы (см. рис. 2, d, e; рис. 3, a) красновато-бурого цвета, участками растущие от стенок прожилков, либо скопления кристаллов неправильной формы. Реже гюбнерит встречается в виде отдельных зерен неправильной формы.

Широко развиты на месторождении сульфидные минералы, среди которых преобладают пирит, сфалерит, галенит и халькопирит (рис. 3).



Таблица 1. Минеральный состав кварц-гюбнеритовых прожилков
Table 1. Mineral composition of quartz-hubnerite veinlets

Ассоциация	Минерал	
Жильные минералы	Главные	Кварц: SiO ₂
	Второстепенные	Флюорит: CaF ₂
		Мусковит: KAl ₂ [AlSi ₃ O ₁₀](OH) ₂
Рудные минералы	Главные	Гюбнерит: MnWO ₄
		Пирит: FeS ₂
		Халькопирит: CuFeS ₂
	Второстепенные	Сфалерит: ZnS
		Галенит: PbS
		Тетраэдрит: Cu ₃ SbS ₃
		Айкинит: PbCuBiS ₃
		Молибденит: MoS ₂
		Касситерит: SnO ₂
		Шеелит: CaWO ₄
	Редкие	Гессит: Ag ₂ Te
		Борнит: Cu ₅ FeS ₄
		Берилл: Al ₂ [Be ₃ (Si ₆ O ₁₈)]
Вторичные минералы		Англезит: PbSO ₄
		Ковеллин: CuS

Пирит присутствует в двух генерациях, различающихся по морфологии. Пирит первой генерации встречается в виде интенсивно корродированных зерен, замещаемых более поздними минералами – галенитом, сфалеритом, блеклой рудой и др. (см. рис. 3, *b,c*). Пирит второй генерации присутствует в форме кубических кристаллов в ассоциации с тетраэдритом (см. рис. 3, *e*).

Халькопирит встречается в тесных сростаниях с галенитом и сфалеритом, также присутствует в виде оторочек по краям зерен тетраэдрита (см. рис. 3, *e*).

Галенит характеризуется наличием примесей серебра и висмута, содержания которых достигают высоких концентраций: до 6,69 масс. % – серебро, до 6,69 масс. % – висмут, что позволяет отнести его к серебро-висмут-содержащему галениту.

Сфалерит практически не содержит в своем составе железа, в качестве примеси установлен лишь кадмий (0,49–0,96 масс. %). В сфалерите отмечаются единичные включения мелких кристаллов касситерита.

В виде единичных зерен в рудах присутствует борнит.

Молибденит отмечается в виде одиночных мелких чешуек в краевых частях прожилков в агрегатах мусковита и кварца. Также на более

глубоких горизонтах в прожилках предшественниками отмечались чешуйки молибденита, образующие мелкую вкрапленность в микроклиновых и мусковитовых приальбантовых оторочках. Считается, что это переотложенный молибденит из более ранних молибденитсодержащих кварц-альбитовых прожилков [10, 11].

Наряду с молибденитом отмечался и шеелит – как на ранней, так и на более поздней стадии при замещении кристаллов гюбнерита.

Сульфосоли в большей степени представлены тетраэдритом и айкинитом. Айкинит преимущественно слагает выделения неправильной формы в зернах галенита (см. рис. 3, *d,f*, белый пунктир).

Тетраэдрит образует относительно крупные агрегаты неправильной формы (см. рис. 3, *e*) либо отдельные зерна изометричной формы (см. рис. 3, *f*). Среднее содержание сурьмы в тетраэдрите – 20,65, мышьяка – 5,64 масс. %, кроме того, в его составе присутствуют: железо – 0,62, цинк – 7,30, серебро – 0,74 масс. %, в некоторых зернах обнаружены примеси висмута (до 1,59 масс. %). В виде многочисленных микровключений в тетраэдрите присутствует теллурид серебра – гессит (см. рис. 3, *g*, белый пунктир).

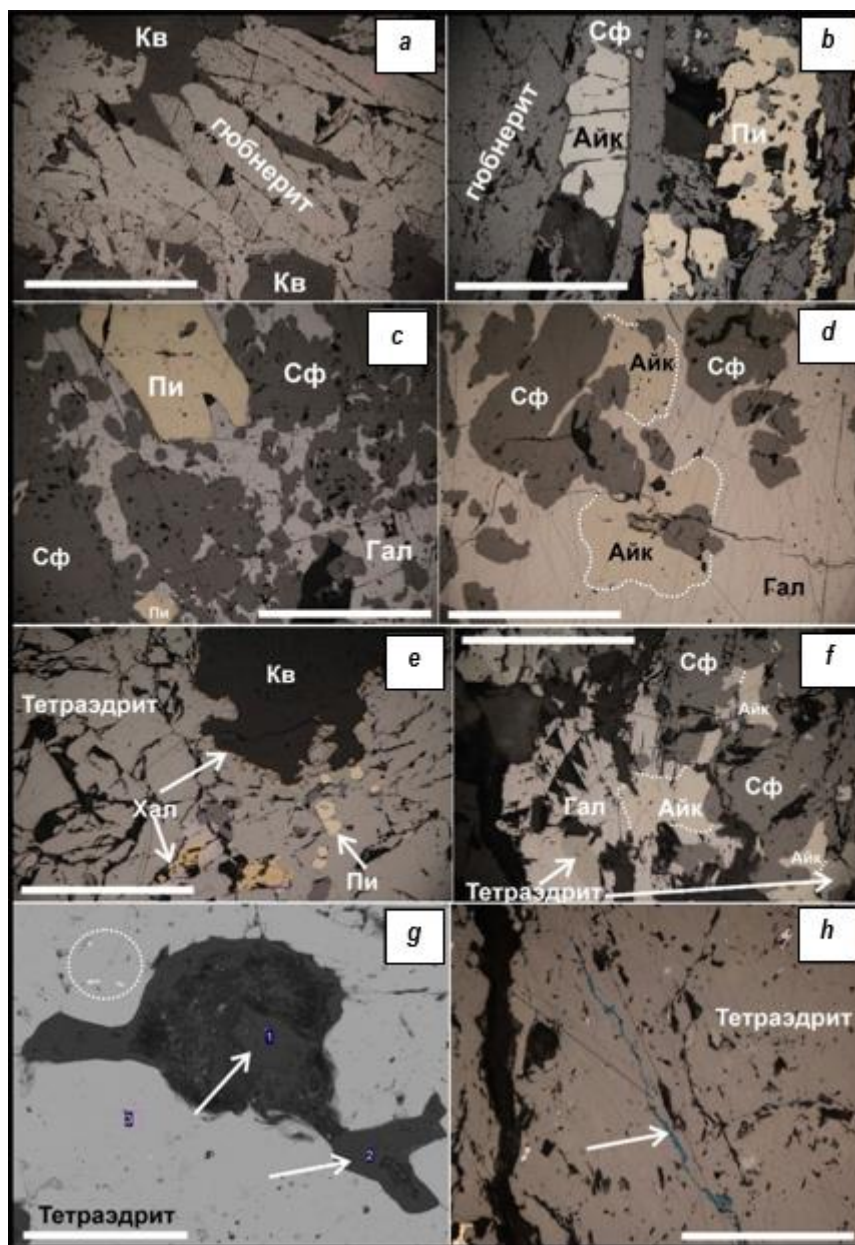


Рис. 3. Морфология и взаимоотношения рудных минералов в кварц-гюбнеритовых прожилках Инкурского месторождения (фотографии шлифов):

а – скопления шестоватых кристаллов гюбнерита; б – срастания гюбнерита, сфалерита, айкинита и пирита; в – тесные срастания сфалерита и галенита; д – выделения айкинита (белый пунктир) в зерне галенита; е – агрегаты тетраэдрита в срастании с кварцем и мелкими зернами халькопирита и пирита; ф – айкинит (белый пунктир) в зерне галенита на контакте со сфалеритом и тетраэдритом; г – зерно розенбергита(?) (стрелки) в тетраэдрите, в пунктире показаны микровключения гессита (фото в обратно-рассеянных электронах); h – прожилок ковеллина в тетраэдрите
Кв – кварц; Пир – пирит; Гал – галенит; Хал – халькопирит; Сф – сфалерит; Айк – айкинит
Длина масштабной линейки – 0,5 мм, на фото г – 200 мкм, на фото h – 0,1 мм

Fig. 3. Morphology and relationship of the ore minerals in the quartz-hubnerite veins of the Inkurskoe deposit (photos of polished sections):

a – clusters of columnar hubnerite crystals; b – intergrowths of hubnerite, sphalerite, aikinite and pyrite; c – close intergrowths of sphalerite and galena; d – aikinite deposition (white dashed line) in galena grain; e – aggregates of tetrahedrite in the intergrowth with quartz and small grains of chalcopyrite and pyrite; f – aikinite (white dotted line) in the galena grain in contact with sphalerite and tetrahedrite; g – rosenbergite grain(?) (arrows) in tetrahedrite, the dotted line shows the microinclusions of hessite (photo in backscattered electrons); h – veins of covellite in tetrahedrite
Кв – quartz; Пир – pyrite; Гал – galena; Хал – chalcopyrite; Сф – sphalerite; Айк – aikinite
The scale bar is 0.5 mm long; in photo g, 200 microns; in photo h, 0.1 mm



В тетраэдрите в одном участке идентифицирован редкий необычный минерал из класса галогенидов – гидрофторид алюминия, по составу близкий розенбергиту ($\text{AlF}[\text{F}_{0.5}(\text{H}_2\text{O})_{0.5}]_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$) (см. рис. 3, *g*), который образует зерна неправильной формы с округлыми очертаниями.

Сульфосоли образуют совместные парагенетические ассоциации с сульфидами – галенитом, сфалеритом, халькопиритом, пиритом II, что позволяет сделать вывод о синхронности формирования этих минералов.

К вторичным минералам относятся англезит и ковеллин (см. рис. 3, *h*), заполняющие маломощные поздние трещины.

Также предшественниками были идентифицированы такие минералы, как топаз ($\text{Al}_2[\text{SiO}_4](\text{F}, \text{OH})_2$), линдстремит ($\text{Pb}_3\text{Cu}_3\text{Bi}_7\text{S}_{15}$), хаммарит ($\text{Pb}_2\text{Cu}_2\text{Bi}_4\text{S}_9$), сульфовисмутит меди и серебра [25] и редкие теллуриды серебра и золота (петцит, гессит и сильванит) в ассоциации с самородным золотом.

На основе петрографических наблюдений и данных электронной микроскопии установлена схематичная общая последовательность отложения жильных и рудных минералов в прожилках, которая представлена на рис. 4.

Термобарогеохимические исследования. Данные об условиях формирования и составе рудообразующих растворов вольфрамового оруденения Инкурского месторождения полу-

чены в результате изучения ФВ из кварца, флюорита и гюбнерита, а также мусковита из кварц-гюбнеритовых прожилков. В этих минералах найдены включения с наиболее пригодными размерами для изучения методами термометрии и криометрии. В зернах кварца, как правило, доминируют вторичные включения, которые залечивают многочисленные трещины (рис. 5, *a*). Очень редко в кварце встречаются отдельные первичные двухфазовые включения (жидкость + газ) размером в среднем от 10 до 25 мкм (рис. 5, *b, d-f*) или группы первичных включений (рис. 5, *c*), удаленные от залеченных трещин и шлейфов вторичных включений.

В редких зернах флюорита также обнаружены первичные ФВ, как правило, одиночные (размером ~15–25 мкм), которые часто (кроме газовой фазы и водного раствора) содержат очень мелкую темную фазу (рис. 5, *g, h, i*) неизвестного состава.

Кроме этого, в кристаллах гюбнерита отмечаются многочисленные включения, как правило, газовые (рис. 5, *j*). В некоторых зернах обнаружены очень редкие одиночные двухфазовые (жидкость + газ) включения (рис. 5, *k*) небольших размеров (~7–12 мкм).

В мусковите найдены единичные группы очень мелких двухфазовых (жидкость + газ) ФВ, похожих на первичные (рис. 5, *l*) размером ≤ 10 мкм.

Минерал	Ранняя —————> Поздняя
Кварц	—————
Флюорит	—————
Мусковит	—————
Гюбнерит	—————
Шеелит	—————
Пирит	—————
Сфалерит	—————
Халькопирит	—————
Галенит	—————
Тетраздрит	—————
Айкинит	—————
Молибденит	—————
Касситерит	—————
Гессит	—————
Ковеллин	—————
Англезит	—————
Берилл	—————

Рис. 4. Последовательность минералообразования в рудных прожилках Инкурского штоковерка
Fig. 4. Mineral formation sequence in the ore veins of the Inkur stockwork

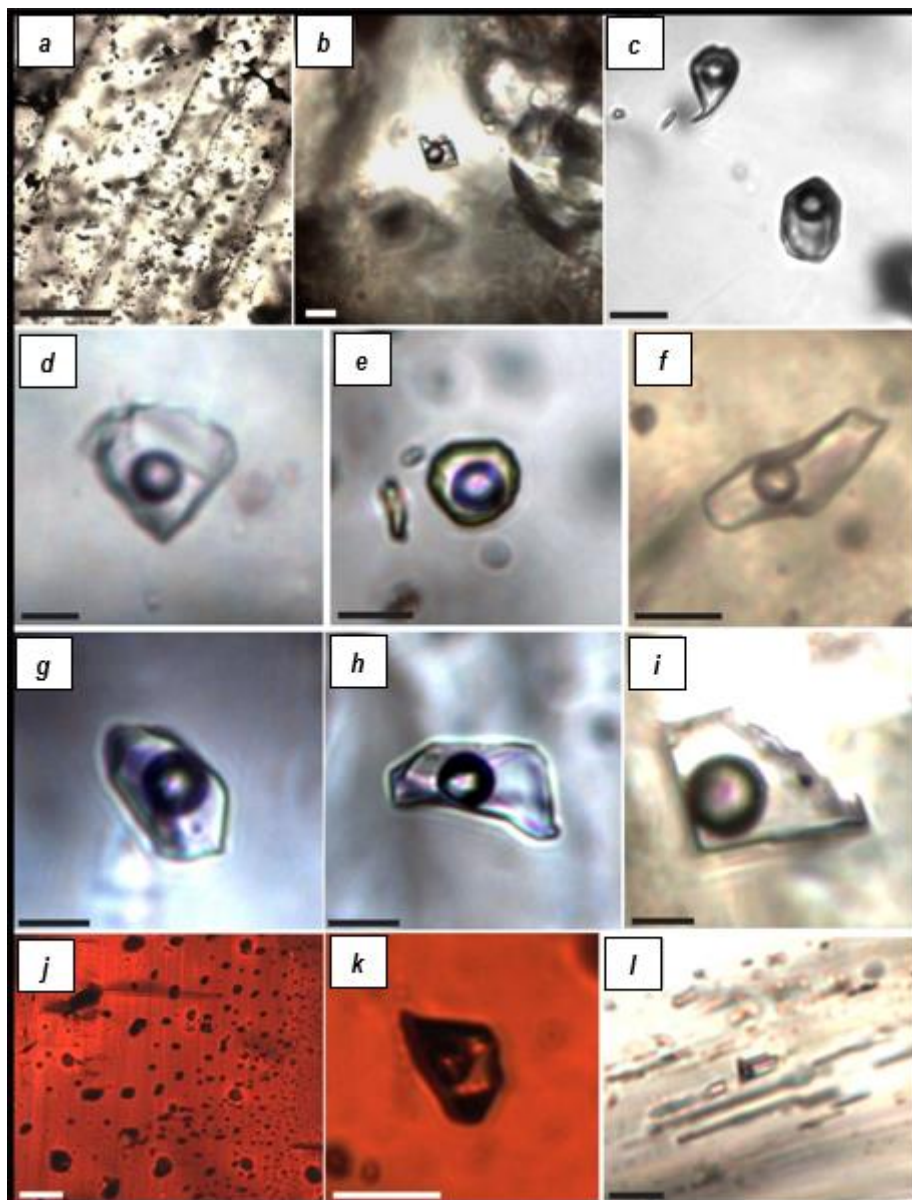


Рис. 5. Первичные гомогенные флюидные включения из кварц-гюбнеритовых прожилков Инкурского месторождения:

a – зерно кварца с «цепочками» вторичных включений; *b–f* – первичные двухфазовые флюидные включения в зернах кварца; *g–i* – первичные включения с мелкими темными фазами во флюорите; *j* – группа газовых флюидных включений в зерне гюбнерита; *k* – первичное одиночное двухфазовое флюидное включение в гюбнерите; *l* – группа мелких флюидных включений в мусковите
Длина масштабной линейки на фото *a* – 100 мкм, на фото *b–l* – 10 мкм

Fig. 5. Primary homogeneous fluid inclusions from quartz-hubnerite veinlets of Inkurskoe deposit:

a – quartz grain with "chains" of secondary inclusions; *b–f* – primary two-phase fluid inclusions in quartz grains; *g–i* – primary inclusions with small dark phases in fluorite; *j* – group of gas inclusions in the hubnerite grain; *k* – primary single two-phase inclusion in hubnerite; *l* – group of small fluid inclusions in muscovite
The scale bar in photo *a* is 100 microns; in photos *b–l*, 10 microns

Почти все включения относятся к ФВ гомогенного захвата, как правило, для них характерно отсутствие твердых фаз за исключением зерен флюорита.

Результаты термометрического и криометрического изучения ФВ обобщены в табл. 2.

Интервал температур гомогенизации изученных первичных включений в жильном кварце из кварц-гюбнеритовых прожилков варьирует от 343 до 195 °С (см. табл. 2; рис. 6). Температуры эвтектики в большинстве включений из кварца меняются от ~-52 до -49,2 °С,



Таблица 2. Общая таблица результатов микротермометрических исследований флюидных включений в минералах Инкурского месторождения
Table 2. Summary table of microthermometric studies of fluid inclusions in the minerals of the Inkur deposit

Минерал-хозяин	T_g , °C	$T_{пл\ льда}$, °C	$T_{эвт}$, °C	$T_{пл\ тв\ фаз}$, °C	Соленость эквивалента хлорида натрия, масс. % [4]	Тип солевой системы [4]
Кварц	≥195...343	-4,2...-10,6	-52...-50...-49,2 (-23,4...-23 – ускорение таяния льда)	–	6,7–14,6	CaCl ₂ -MgCl ₂ -H ₂ O CaCl ₂ -KCl-H ₂ O CaCl-H ₂ O NaCl-KCl-H ₂ O
Флюорит	≥195...265	-7...-3,8	-55...-49 (-24...-23,2 – ускорение таяния льда)	184... 187	6,2–10,5	CaCl ₂ -NaCl-H ₂ O CaCl-H ₂ O NaCl-KCl-H ₂ O
Гюбнерит	≥245...278	-3,2...-3,1	–	–	5,1–5,3	–
Мусковит	≥167...202	-3,5	–	–	5,7	–

Примечание. T_g – температура гомогенизации, $T_{пл\ льда}$ – температура плавления льда, $T_{эвт}$ – температура эвтектики, $T_{пл\ тв\ фаз}$ – температура плавления твердых фаз; прочерк – параметр не определен.

Note. T_g – homogenization temperature, $T_{пл\ льда}$ – ice melting temperature, $T_{эвт}$ – eutectic temperature, $T_{пл\ тв\ фаз}$ – solid phase melting temperature; dash – parameter is not defined.

следовательно, главные солевые системы представлены: CaCl₂-MgCl₂-H₂O, CaCl₂-KCl-H₂O и CaCl-H₂O. В некоторых включениях отмечается ускорение таяния льда в диапазоне температур ~-23,4...-23 °C, что может свидетельствовать о примесях NaCl-KCl-H₂O. Температуры плавления льда – -4,2...-10,6 °C, соответственно, соленость менялась в диапазоне ~6,7–14,6 масс. % эквивалента хлорида натрия.

Гомогенизация включений из зерен флюорита происходила при относительно более

низких температурах 195...265 °C (см. рис. 6). Растворение мелких твердых фаз наблюдалось при температурах 184–187 °C. Температуры эвтектики близки с температурами ФВ из кварца ~-55...-49 °C с ускорением таяния льда при ~-24...-23,2 °C, соответственно, главные солевые системы те же: CaCl₂-NaCl-H₂O, CaCl-H₂O и NaCl-KCl-H₂O.

Интервал температур гомогенизации ФВ из гюбнерита, определенный по нескольким включениям, более узок – 245...278 °C (см. табл. 2). Из-за небольших размеров только в двух ФВ

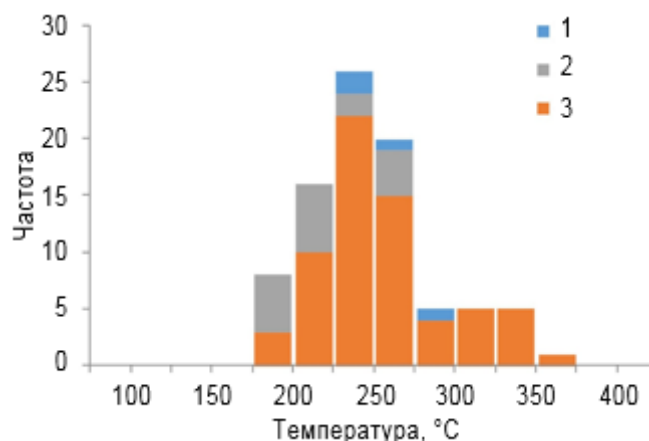


Рис. 6. Гистограмма распределения температур гомогенизации флюидных включений из рудных прожилков Инкурского месторождения:

1 – гюбнерит; 2 – флюорит; 3 – кварц

Fig. 6. Homogenization temperature distribution histogram for the fluid inclusions (ore veinlets of the Inkur deposit):

1 – hubnerite; 2 – fluorite; 3 – quartz



удалось определить температуры плавления льда $\sim -3,2 \dots -3,1$ °C, что соответствует солености $\sim 5,1\text{--}5,3$ масс. % эквивалента хлорида натрия.

Кроме этого, в двух включениях из мусковита удалось определить температуры гомогенизации 167 и 202 °C, а также приблизительно оценить соленость $\sim 5,7$ масс. % эквивалента хлорида натрия. Мусковит – из центральной части прожилка, поэтому, скорее всего, является более поздним, чем более ранний мусковит из призальбандовых частей.

На рис. 6 показана гистограмма распределения температур гомогенизации ФВ из разных минералов. Температуры гомогенизации характеризуются бимодальным распределением. Выделяется преобладающая группа включений с максимумом определений в интервале 225–275 °C. Часть включений гомогенизируется при более высоких температурах, модальное значение температуры в этой группе ФВ соответствует интервалу 300–325 °C.

В составе газовой фазы включений из кварца рудных прожилков по данным КР-спектроскопии идентифицированы углекислый газ, в некоторых ФВ отмечается небольшой пик азота.

В единичных зернах кварца в пределах одной зоны роста зерна обнаружены очень мелкие ($\leq 2\text{--}4$ мкм) первичные сингенетичные существенно-водные и существенно-газовые включения. В связи с очень мелкими размерами таких включений получить достоверные данные не удалось. Присутствие таких ФВ свидетельствует о редких периодах гетерогенизации (вскипания) рудообразующего раствора.

Обсуждение результатов

Гюбнерит, большая часть которого, судя по идиоморфизму, отложилась в начальный период минералообразующего процесса, является главным рудным минералом Инкурского месторождения. Однако кроме гюбнерита на месторождении присутствует достаточно большое количество рудных минералов. В общей сложности диагностировано более 20 минеральных видов. Впервые в рудах

установлен редкий необычный минерал из класса галогенидов – гидрофторид алюминия, по составу близкий розенбергиту. Исходя из химического состава минералов, слагающих рудные прожилки, можно качественно оценить элементный состав рудообразующих растворов. Главными жильными минералами являются кварц, флюорит, мусковит, что говорит о наличии в составе минералообразующих флюидов таких элементов, как кремний, калий, алюминий, фтор, кальций. Состав ассоциаций рудных минералов (гюбнерит, сульфиды, сульфосоли и др.) свидетельствует о наличии в рудообразующих растворах таких элементов, как вольфрам, марганец, сера, железо, медь, свинец, цинк, висмут, бериллий, олово, серебро, теллур, молибден.

Таким образом, в составе минералообразующих гидротермальных растворов присутствует значительное количество рудных элементов, при этом в рудах количественно преобладает гюбнерит. Это может быть связано либо с высоким содержанием вольфрама относительно других элементов в растворах, либо со специфическими физико-химическими параметрами, благоприятными именно для отложения гюбнерита по сравнению с другими минералами, при близких концентрациях разных рудообразующих элементов в первичном растворе.

Результаты исследования ФВ показали, что минимальные температуры отложения кварца – $\sim 195\text{--}343$ °C, причем установлены две группы включений (см. рис. 6). Большинство определений попадают в низкотемпературный интервал 200–275 °C. В то же время в относительно высокотемпературной области на гистограмме распределения температур гомогенизации также фиксируется слабо проявленный максимум в интервале 300–325 °C. Такое распределение свидетельствует о наличии двух генераций ФВ, происхождение которых обусловлено, по-видимому, их захватом в ходе формирования разных генераций кварца – высокотемпературной и низкотемпературной. Температуры гомогенизации ФВ в гюбнерите варьируют в интервале $\sim 245\text{--}278$ °C и соответствуют низкотемпературной группе ФВ в кварце. В этот же относительно низкотемпературный интервал попадают ФВ



из флюорита – 195–265 °С, хотя большая часть определений попадает в интервал 195–225 °С. И наконец, минимальными температурами гомогенизации характеризуются ФВ из позднего мусковита (167–202 °С).

Такое распределение температур гомогенизации ФВ свидетельствует о существовании как минимум двух стадий минералообразования – высокотемпературной (более 300 °С), где отлагался ранний кварц, и относительно низкотемпературной (200–300 °С), где происходило отложение позднего кварца, гюбнерита и флюорита. Следовательно, отложение минералов в прожилках шло с понижением температуры. По данным В.Б. Наумова [26], большинство определений температур гомогенизации ФВ из вольфрамита и шеелита приходится на интервал 200–400 °С с максимумом в 200–300 °С. Большая часть определений солёности растворов на месторождениях вольфрама приходится на значения менее 10 масс. % эквивалента хлорида натрия (~60 %).

Рудообразующие флюиды Инкурского месторождения характеризовались гомогенным агрегатным состоянием, умеренной концентрацией солей, присутствием в газовой фазе углекислого газа и азота, хлоридным составом (хлориды кальция, магния, калия, натрия), в то же время наличие фторсодержащих минералов свидетельствует о присутствии соединений фтора в составе флюида. Согласно исследованиям Ф.Г. Рейфа и Е.Д. Бажеева [19], месторождения Джидинского рудного поля сформированы преимущественно фторидными гидротермальными растворами.

Поскольку в рудах обнаружены единичные зерна кварца с сингенетическими существенно-водными и существенно-газовыми ФВ, предполагается, что в ходе рудоотложения были редкие периоды вскипания растворов. Кроме этого, большое количество газовых включений в гюбнерите говорит о том, что его отложение, скорее всего, происходило при участии газовой фазы.

Главными факторами осаждения гюбнерита из гидротермальных растворов являются изменение щёлочности-кислотности, снижение температуры и солёности. Однако в щелочной

гидротермальной среде его растворимость нечувствительна к температуре и солёности раствора, тогда как снижение температуры способствует осаждению гюбнерита из кислых растворов [27, 28]. Высокое содержание мусковита в составе прожилков свидетельствует о повышенной кислотности растворов, формировавших прожилки Инкурского штокверка. По данным источника [28], в кислых растворах растворимость гюбнерита выше растворимости ферберита практически на порядок, что объясняет отложение вольфрама в форме гюбнерита. Следовательно, решающим фактором осаждения руд явилось падение температуры, обусловленное остыванием растворов.

Заключение

Главным рудным минералом штокверкового Инкурского месторождения является гюбнерит. В качестве второстепенных и редких присутствуют следующие минеральные виды: сульфиды (пирит, халькопирит, галенит, сфалерит, молибденит, ковеллин), сульфосоли (айкинит, тетраэдрит), теллуриды (гессит), оксиды (касситерит) и розенбергит(?). Главный жильный минерал представлен кварцем. В роли вторичных минералов присутствуют ковеллин и англезит. Установлена последовательность отложения минералов в рудных прожилках. Минералогические исследования позволили качественно оценить химический состав рудообразующих растворов, где присутствовали кремний, калий, алюминий, фтор, кальций, вольфрам, марганец, сера, железо, медь, свинец, цинк, висмут, бериллий, олово, серебро, теллур, молибден.

Распределение температур гомогенизации предполагает наличие двух стадий минералообразования – высокотемпературной (≥ 300 °С), где отлагался ранний кварц, и низкотемпературной (≥ 200 –300 °С), где происходило отложение позднего кварца, гюбнерита и флюорита. Отложение минералов в прожилках шло с понижением температуры из относительно слабосолёных гомогенных растворов (с солёностью ~5,7–14,6 масс. % эквивалента хлорида натрия) с редкими периодами гетерогенизации. В газовой фазе включений идентифицированы углекислый газ и азот.



В солевом составе растворов присутствуют хлориды кальция с примесями хлоридов натрия, калия и магния. Наличие в рудах минералов, богатых фтором (флюорит, мусковит, топаз, розенбергит(?)), свидетельствует о

том, что в растворах кроме хлоридов присутствовали и фториды. Главным фактором осаждения гюбнерита из гидротермальных растворов является снижение температуры, обусловленное остыванием растворов.

Библиографический список

1. Damdinova L.B., Damdinov B.B., Huang X.-W., Bryansky N.V., Khubanov V.B., Yudin D.S. Age, conditions of formation, and fluid composition of the Pervomaiskoe molybdenum deposit (Dzhidinskoe ore field, South-Western Transbaikalia, Russia) // Minerals. 2019. Vol. 9. P. 572. <https://doi.org/10.3390/min9100572>
2. Игнатович В.И., Гусев Ю.П. Перспективы расширения минерально-сырьевой базы вольфрама // Разведка и охрана недр. 2007. № 12. С. 43–47.
3. Bodnar R.J., Vityk M.O. Interpretation of microthermometric data for H₂O-NaCl fluid inclusions // Fluid inclusions in minerals: methods and applications / eds. B. De Vivo, M.L. Frezzotti. Blacksburg: Virginia Tech, 1994. P. 117–130.
4. Борисенко А.С. Изучение солевого состава газозо-жидких включений в минералах методом криометрии // Геология и геофизика. 1977. № 8. С. 16–27.
5. Бесова М.В. Геология и минералогия Джидинского вольфрамового месторождения // Месторождения редких и малых металлов СССР. Т. 1. М. – Л.: Изд-во АН СССР, 1939. С. 3–88.
6. Налетов П.И., Шалаев К.А., Деуля Т.Т. Геология Джидинского рудного района. Иркутск: Иркут. обл. изд., 1941. 282 с.
7. Смолянский Е.Н. Об основных закономерностях в пространственном размещении молибденовых и вольфрамовых месторождений в Джидинском рудном районе // Труды Восточно-Сибирского геологического института СО АН СССР. Серия геологическая. 1960. Вып. 1. С. 20–38.
8. Игнатович В.И. Дайки и молибден-вольфрамовая минерализация Первомайской интрузии гранит-порфиров (Джидинское месторождение). Улан-Удэ: Бурят. кн. изд-во, 1959.
9. Игнатович В.И. О структуре Джидинского рудного поля // Материалы по геологии и полезным ископаемым БурАССР. Вып. 6. Улан-Удэ: Бурят. кн. изд-во, 1961. С. 3–22.
10. Малиновский Е.П. Определение пространственного положения источников рудообразующих флюидов Джидинских месторождений по данным структурного анализа // Джидинский рудный район (проблемы развития и освоения минеральных ресурсов): сб. стат. / под ред. М. Мохосоева. Новосибирск: Наука, 1984. С. 116–126.
11. Онтоев Д.О. Стадийность минерализации и зональность месторождений Забайкалья. М.: Наука, 1974. 244 с.
12. Онтоев Д.О. Стадийность минерализации и зональность молибдено-вольфрамовых месторождений Джидинского рудного района // Джидинский рудный район. Новосибирск: Наука, 1984. С. 53–76.
13. Батурина Е.Е., Рипп Г.С. Молибденовые и вольфрамовые месторождения Западного Забайкалья (основные черты металлогении и геохимии). М.: Наука, 1984. 152 с.
14. Гордиенко И.В., Филимонов А.В., Минина О.Р., Горнова М.А., Медведев А.Я., Климук В.С. [и др.]. Джидинская островодужная система Палеоазиатского океана: строение и основные этапы геодинамической эволюции в венде-палеозое // Геология и геофизика. 2007. Т. 48. № 1. С. 120–140.
15. Дистанова А.Н. Позднепалеозойские гранитовые интрузии западной части Джидинской зоны (Западное Забайкалье) // Гранитоидные комплексы Сибири / отв. ред. Ю.А. Кузнецов. Вып. 440. Новосибирск: Наука, 1979. С. 3–23.
16. Ходанович П.Ю., Смирнова О.К. Вольфрамоносные березиты и локальный прогноз оруденения. Новосибирск: Наука, 1991. 208 с.
17. Ходанович П.Ю. Молибдено-вольфрамовые месторождения Джидинского рудного поля // Месторождения Забайкалья. Т. 1. Кн. 1. Чита – М.: Геоинформмарк, 1995. С. 149–163.
18. Чернышев И.В., Гольцман Ю.В., Баирова Э.Д., Иванова Г.Ф. Rb-Sr-геохронометрия процессов последовательного формирования гранитов, грейзенизации и гидротермальной минерализации: Джидинское W-Мо месторождение, Западное Забайкалье // Доклады Академии наук. 1998. Т. 360. № 4. С. 537–540.
19. Рейф Ф.Г., Бажеев Е.Д. Магматический процесс и вольфрамовое оруденение. Новосибирск: Наука, 1982. 158 с.
20. Рейф Ф.Г. Условия и механизмы формирования гранитных рудно-магматических систем (по термобаро-геохимическим данным). М.: Изд-во ИМГРЭ, 2009. 498 с.
21. Повилайтис М.М. Основные черты минералогии Джидинского молибден-вольфрамового месторождения. М.: Изд-во АН СССР, 1960. 165 с.
22. Повилайтис М.М., Мозгова Н.Н., Сендерова В.М. Минералы висмута в Джидинском молибдено-вольфрамовом месторождении (Западное Забайкалье) // Записки Всесоюзного минералогического общества. 1969. Ч. 98. Вып. 6. С. 655–664.
23. Стельмачонок К.З. О синхронности образования рудовмещающих трещин и формирования молибденовой минерализации на Первомайском штоковом месторождении (Забайкалье) и причинах трещинообразования // Доклады Академии наук. 1994. Т. 337. № 3. С. 382–385.
24. Стельмачонок К.З. О близодновременном формировании односистемных прожилков в молибденовом штоковом рудном теле Джидинского



месторождения (Забайкалье) // Доклады Академии наук. 1995. Т. 341. № 3. С. 399–402.

25. Шадлун Т.Н., Онтоев Д.О., Басова Г.В., Вьяльсов Л.Н., Муравьева И.В. Сульфовисмутит меди и серебра из Джидинского месторождения // Записки Всесоюзного минералогического общества. 1969. Ч. 98. Вып. 4. С. 452–463.

26. Наумов В.Б., Дорофеева В.А., Миронова О.Ф. Физико-химические параметры формирования гидротермальных месторождений по данным исследований флюидных включений. I. Месторождения олова и вольфрама // Геохимия. 2011. № 10. С. 1063–1082.

27. Li J., Liu Y., Zhao Z., Chou I.M. Roles of carbonate / CO₂ in the formation of quartz-vein wolframite deposits: insight from the crystallization experiments of huebnerite in alkali-carbonate aqueous solutions in a hydrothermal diamond-anvil cell // Ore Geology Reviews. 2018. Vol. 95. P. 40–48. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2018.02.024>

28. Liu X., Xiao C. Wolframite solubility and precipitation in hydrothermal fluids: insight from thermodynamic modeling // Ore Geology Reviews. 2020. Vol. 117. P. 103289. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2019.103289>

References

1. Damdinova LB, Damdinov BB, Huang XW, Bryan-sky NV, Khubanov VB, Yudin DS. Age, conditions of formation, and fluid composition of the Pervomaiskoe molybdenum deposit (Dzhidinskoe ore field, South-Western Transbaikalia, Russia). *Minerals*. 2019;9:572. <https://doi.org/10.3390/min9100572>

2. Ignatovich VI, Gusev YuP. Prospects for the expansion of the tungsten mineral resource base. *Razvedka i okhrana nedr = Prospect and Protection of Mineral Resources*. 2007;12:43–47. (In Russ.)

3. Bodnar RJ, Vityk MO. Interpretation of microthermometric data for H₂O-NaCl fluid inclusions. In: De Vivo B, Frezzotti ML (eds.). *Fluid inclusions in minerals: methods and applications*. Blacksburg: Verginia Tech; 1994. p.117–130.

4. Borisenko AS. Study of the salt composition of gas-liquid inclusions in minerals by the method of cryometry. *Geologiya i geofizika*. 1977;8:16–27. (In Russ.)

5. Besova MV. Geology and mineralogy of the Dzhidinsky tungsten deposit. In: *Mestorozhdeniya redkikh i malykh metallov SSSR = Deposits of rare and minor metals in the USSR*. Vol. 1. Moscow – Leningrad: The USSR Academy of Sciences; 1939. p.3–88. (In Russ.)

6. Naletov PI, Shalaev KA, Deulya TT. *Geology of the Dzhidinsky ore district*. Irkutsk: Irkutskoe oblastnoe izdatel'stvo; 1941. 282 p. (In Russ.)

7. Smolyanskii EN. On the basic regularities in the spatial distribution of molybdenum and tungsten deposits in the Dzhidinsky ore district. *Trudy Vostochno-Sibirskogo geologicheskogo instituta SO AN SSSR. Seriya geologicheskaya*. 1960;1:20–38. (In Russ.)

8. Ignatovich VI. *Dykes and molybdenum-tungsten mineralization of the Pervomaisk intrusion of granite-porphry (the Dzhidinsky deposit)*. Ulan-Ude: Buryatskoe knizhnoe izdatel'stvo; 1959. (In Russ.)

9. Ignatovich VI. On the structure of the Dzhidinsky ore field. In: *Materialy po geologii i po-leznym iskopaemym BurASSR = Materials on geology and minerals of Buryat ASSR*. Iss. 6. Ulan-Ude: Buryatskoe knizhnoe izdatel'stvo; 1961. p.3–22. (In Russ.)

10. Malinovskii EP. Defining the spatial location of the ore-forming sources of the Dzhidinsky deposits by the structural analysis data. In: Mokhosoev M (eds.). *Dzhidinskii rudnyi raion = Dzhidinsky ore district*. Novosibirsk: Nauka; 1984. p.116–126.

11. Ontoev DO. *Staged mineralization and zoning of Transbaikalia deposits*. Moscow: Nauka; 1974. 244 p. (In Russ.)

12. Ontoev DO. Staged mineralization and zoning of molybdenum-tungsten deposits of the Dzhidinsky ore district. In: *Dzhidinskii rudnyi raion = Dzhidinsky ore district*. Novosibirsk: Nauka; 1984. p.53–76. (In Russ.)

13. Baturina EE, Ripp GS. *Molybdenum and tungsten deposits of Western Transbaikalia (the main metallogenic and geochemical features)*. Moscow: Nauka; 1984. 152 p. (In Russ.)

14. Gordienko IV, Filimonov AV, Minina OR, Gornova MA, Medvedev AYa, Klimuk BC., et al. Dzhidinsky island-arc system of the Paleo-Asian Ocean: structure and main stages of the geodynamic evolution in the Vendian-Paleozoic. *Geologiya i geofizika*. 2007;48(1):120–140. (In Russ.)

15. Distanova AN. Late Paleozoic granite intrusions of the western part of the Dzhidinsky zone (Western Transbaikalia). In: Kuznetsov YuA (eds.). *Granitoidnye kompleksy Sibiri = Granitoid complexes of Siberia*. Iss. 440. Novosibirsk: Nauka; 1979. p.3–23. (In Russ.)

16. Khodanovich PYu, Smirnova OK. *Tungsten-bearing beresite rocks and local mineralization prognosis*. Novosibirsk: Nauka; 1991. 208 p. (In Russ.)

17. Khodanovich PYu. Molybdenum-tungsten deposits of the Dzhidinsky ore field. In: *Mestorozhdeniya Zabaikal'ya = Deposits of Transbaikalia*. Vol. 1. Book 1. Chita – Moscow: Geoinformmark; 1995. p.149–163. (In Russ.)

18. Chernyshev IV, Gol'tsman YuV, Bairova ED, Ivanova GF. Rb-Sr-geochronometry of the processes of granites sequential formation, greisenization and hydrothermal mineralization: Dzhidinsky W-Mo deposit, Western Transbaikalia. *Doklady Akademii nauk*. 1998;360(4):537–540. (In Russ.)

19. Reyf FG, Bazheev ED. *Magmatic process and tungsten mineralization*. Novosibirsk: Nauka; 1982. 158 p. (In Russ.)

20. Reyf FG. *Conditions and mechanisms of formation of granite ore-magmatic systems (by the data of fluid inclusions studies)*. Moscow: Institute of Mineralogy, Geochemistry, and Crystal Chemistry of Rare Elements; 2009. 498 p. (In Russ.)

21. Povilaitis MM. *The main mineralogical features of the Dzhidinsky molybdenum-tungsten deposit*. Moscow: The USSR Academy of Sciences; 1960. 165 p. (In Russ.)



22. Povilaitis MM, Mozgova NN, Senderova VM. Bismuth minerals in the Dgidinsky molybdenum-tungsten deposit (West Transbaikalia). *Zapiski Vsesoyuznogo mineralogicheskogo obshchestva*. 1969;98(6):655–664. (In Russ.)

23. Stel'machonok KZ. On the synchronization of the formation of the ore-bearing fractures and the molybdenum mineralization at the Pervomaisk stockwork deposit (Transbaikalia), and the causes of the fractures formation. *Doklady Akademii nauk*. 1994;337(3):382–385. (In Russ.)

24. Stel'machonok KZ. On the near-simultaneous formation of the single-system veins in the molybdenite stockwork ore body (the Dzhidinsky deposit, Transbaikalia). *Doklady Akademii nauk*. 1995;341(3):399–402. (In Russ.)

25. Shadlun TN, Ontoev DO, Basova GV, Vjalsov LN, Muravjeva IV. Copper and silver sulfobismuthite from the Djidinsky deposit. *Zapiski Vsesoyuznogo mineralogicheskogo obshchestva*. 1969;98(4):452–463. (In Russ.)

26. Naumov VB, Dorofeev VA, Mironova OF. Physical-chemical parameters of the hydrothermal deposits formation according to the studies of fluid inclusions. 1. Deposits of tin and tungsten. *Geokhimiya*. 2011;10:1063–1082. (In Russ.)

27. Li J, Liu Y, Zhao Z, Chou IM. Roles of carbonate / CO₂ in the formation of quartz-vein wolframite deposits: insight from the crystallization experiments of huebnerite in alkali-carbonate aqueous solutions in a hydrothermal diamond-anvil cell. *Ore Geology Reviews*. 2018;95:40–48. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2018.02.024>

28. Liu X, Xiao C. Wolframite solubility and precipitation in hydrothermal fluids: insight from thermodynamic modeling. *Ore Geology Reviews*. 2020;117:103289. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2019.103289>

Критерии авторства / Authorship criteria

Дамдинова Л.Б., Дамдинов Б.Б. написали статью, имеют равные авторские права и несут одинаковую ответственность за плагиат.

Lyudmila B. Damdinova, Bulat B. Damdinov are the authors of the article, hold equal copyright and bear equal responsibility for plagiarism.

Конфликт интересов / Responsibility for plagiarism

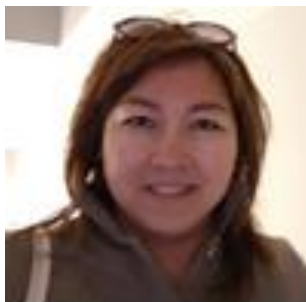
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare that there is no conflict of interest regarding the publication of this article.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

All authors have read and approved the final version of this manuscript.

Сведения об авторах / Information about the authors



Дамдинова Людмила Борисовна,

кандидат геолого-минералогических наук,
старший научный сотрудник Лаборатории петрологии,
Геологический институт СО РАН,
670047, г. Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6а, Россия,
✉ e-mail: ludamdinova@mail.ru

Lyudmila B. Damdinova,

Cand. Sci. (Geol. & Mineral.),
Senior Researcher, Petrology Laboratory,
Geological Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
6a Sakhyanova St., Ulan-Ude 670047, Russia,
✉ e-mail: ludamdinova@mail.ru



Дамдинов Булат Батуевич,

доктор геолого-минералогических наук,
заместитель директора по научной работе,
Геологический институт СО РАН,
670047, г. Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6а, Россия,
e-mail: damdinov@mail.ru

Bulat B. Damdinov,

Dr. Sci. (Geol. & Mineral.),
Deputy Director for Research,
Geological Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
6a Sakhyanovoi St., Ulan-Ude 670047, Russia,
e-mail: damdinov@mail.ru