
**МИНЕРАЛЬНЫЕ ПРИЗНАКИ МАГМАТИЧЕСКИХ
И АВТОМЕТАСОМАТИЧЕСКИХ ЭТАПОВ ФОРМИРОВАНИЯ
ЖЕЛЕЗООКСИДНО-МЕДНО-ЗОЛОТОРУДНОЙ
И АПАТИТ-ЖЕЛЕЗОРУДНОЙ МИНЕРАЛИЗАЦИИ В ГАББРОИДАХ
МАССИВОВ ИЛЬДЕУС И ЛУЧА (СТАНОВОЙ СУПЕРТЕРРЕЙН,
ДАЛЬНИЙ ВОСТОК)**

© 2025 г. П. К. Кепежинская, Н. В. Бердников*, В. О. Крутикова, Н. С. Коновалова,
Н. В. Кожемяко

Институт тектоники и геофизики ДВО РАН, ул. Ким Ю Чена, 65, Хабаровск, 680000 Россия

**e-mail: nberdnikov@yandex.ru*

Поступила в редакцию: 28.11.2024 г.

После доработки: 20.12.2024 г.

Принята к публикации: 27.01.2025 г.

Мезозойские субдукционные габброиды и ультрамафиты массивов Ильдеус и Луча в центральной части Станового супертеррейна содержат микровключения железо-титановых оксидов (магнетита, титаномагнетита, ильменита, рутила, титанита), апатита, сульфатов (барита) и сульфидов (пирита, пирротина, халькопирита), выделенные нами ранее в качестве индикаторной ассоциации ITOASS (Iron-Titanium Oxide–Apatite–Sulfate–Sulfide) для железооксидно-медно-золоторудного (Iron Oxide–Copper–Gold; IOCG) и апатит-железорудного (Iron Oxide–Apatite; IOA) оруденения. Их сопровождают микровключения актинолита, гематита, хлоридов серебра и самородного золота. Вмещающими для сегрегаций микровключений ITOASS в основном являются плагиоклаз, пироксены и высокоглиноземистый амфибол, что свидетельствует об их поздне-магматической природе. В позднемагматических амфиболах фиксируются начальные этапы метасоматической переработки микровключений ITOASS, что, по-видимому, отражает гидротермально-метасоматическую (автометасоматическую) стадию эволюции рудных систем ICOG–IOA типа. Делается вывод, что микровключения ассоциации ITOASS могут служить минералогической предпосылкой для постановки региональных поисков железооксидно-медно-золоторудной и апатит-железорудной минерализации в аккреционно-коллизионных структурах Дальнего Востока.

Ключевые слова: Становой супертеррейн, массивы Ильдеус и Луча, мезозойские габброиды и ультрамафиты, микровключения, ассоциация ITOASS, железооксидно-медно-золоторудная и апатит-железорудная минерализация

DOI: 10.31857/S0869605525010013, **EDN:** FSCSCU

ВВЕДЕНИЕ

Железооксидно-медно-золоторудные (Iron Oxide–Copper–Gold; IOCG; руды андийского типа) и апатит-железорудные (Iron Oxide–Apatite; IOA; руды типа Кируна) месторождения являются важными источниками меди, золота, железа и других металлов. Несмотря на то, что IOCG–IOA месторождения традиционно объединяются в одну группу, они представлены разнообразными объектами, связанными как с классическими магматическо-гидротермальными системами, так и не магматическими

источниками (Barton, 2014; Li et al., 2021). Минерализация IOCG-IOA типа проявляется в широком спектре тектонических обстановок (магматические окраины андийского типа, задуговые и интрадуговые рифтогенные системы, зоны коллизии и внутрикратонной активизации). Она характеризуется многообразием минеральных ассоциаций и структур руд и связана с разными породами (габбро, диоритами, монцонитами, кварцевыми сиенитами, дацитами, риолитами, гранит-порфирами) (Соловьев, 2011; Romero et al., 2024; Williams et al., 2005). Железооксидно-медно-золоторудные месторождения ассоциируют с месторождениями порфирового типа и характеризуются сходными содержаниями меди и золота, но отличаются от последних пониженными содержаниями серы, отсутствием кварцевых жил и штокверковых руд (Richards, Mumin, 2013).

Месторождения и рудопроявления IOCG и IOA типа известны как в собственно Становой складчатой области (Беляев и др., 1981), так и в сопредельных геологических структурах Забайкалья (Извекова и др., 2024; Ковалев и др., 2019) и Якутии (Костин, 2016; Соловьев, 2011). В Становой области данный тип оруденения в основном представлен апатит-магнетитовой, титаномagnetитовой и ильменит-магнетитовой минерализацией, связанной с габброидными и габбро-анортозитовыми интрузивами (Копылов, 2009), и пространственно ассоциирует с золото-молибден-медными рудопроявлениями (Мигачев и др., 2015). В процессе изучения рассеянной сульфидной минерализации в мезозойских базит-ультрабазитовых массивах центральной части Станового супертеррейна нами были впервые описаны своеобразные ассоциации микровключений (первые микрометры — первые десятки микрометров в поперечнике) железо-титановых оксидов, апатита, сульфатов и сульфидов (iron-titanium oxide—apatite—sulfate—sulfide; ITOASS) в габброидах, пироксенитах и связанных с ними гранитоидах. Было предложено интерпретировать их в качестве индикаторов ранних стадий развития флюидонасыщенных рудно-магматических IOCG-IOA систем на глубинных уровнях земной коры (Kepezhinskas et al., 2024). Было сделано предположение, что подобные ITOASS-ассоциации микровключений могут быть использованы при прогнозе железооксидно-медно-золотых и апатит-железородных месторождений в коллизионных и аккреционных структурах обрамления древних кратонов. С этой точки зрения южное обрамление Сибирского кратона представляется весьма перспективным «полигоном» для применения таких «микроминералогических» критериев прогноза и поиска месторождений цветных (железо, медь) и благородных (прежде всего, золото) металлов.

В статье приведены новые данные по микроминералам ассоциации ITOASS и ассоциирующим с ними микровключениям металлов и минералов в интрузивных породах массивов Ильдеус и Луча (участок Дунитовый) в центральной части Станового супертеррейна. На основе сравнительного анализа этой минерализации с «классическими» объектами IOCG-IOA типа обсуждается возможность применения микроминералогических признаков для изучения процессов формирования железо-титано-золото-медных (возможно, с серебром и редкими землями) минерализованных систем в коллизионно-аккреционных структурах южного обрамления Сибирского кратона.

ОЧЕРК ГЕОЛОГИИ СТАНОВОГО СУПЕРТЕРРЕЙНА

Северной границей Станового супертеррейна являются архей-раннепротерозойские гранулитовые образования Пристанового террейна. На юге он граничит с палеозой-мезозойскими комплексами Монголо-Охотского пояса (рис. 1). Становой супертеррейн образован гранулитовыми блоками, окруженными вулканогенно-осадочными формациями, метаморфизованными в условиях амфиболитовой фации, и разделенными линейными структурами, сложенными интенсивно тектонизированными породами

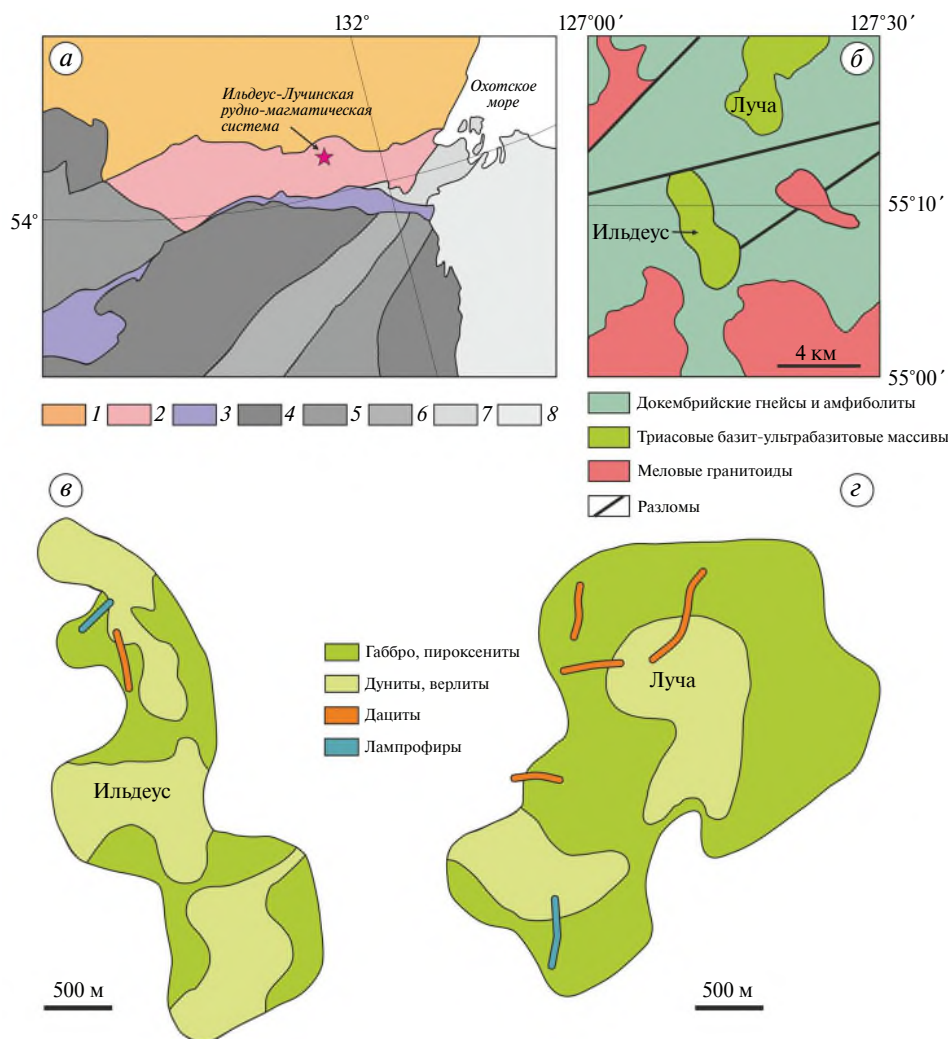


Рис. 1. *a* — Положение Станового супертеррейна и Ильдеусско-Лучинской рудно-магматической системы в структурах Дальнего Востока РФ по (Кеpezжинскas и др., 2024; Кеpezжинскas и др., 2025). Основные структурные элементы: 1 — Сибирский крaтон; 2 — Стaновой супертеррейн; 3 — Монголо-Охотский пояс (T_3 – J_2); 4 — неопротерозойские террейны; 5–8 — коллажи террейнов, аккрецированных в PZ_1 (5), PZ_3 (6), P_2 – T_2 (7) и K_2 – N (8); *б* — схематическая геологическая карта района Ильдеусско-Лучинской рудно-магматической системы; *в*, *з* — внутреннее строение базит-ультрабазитовых массивов Ильдеус (*в*) и Луча (*з*).

Fig. 1. *a* — Location of the Stanovoy superterrane and the Ildeus-Lucha magmatic ore system within the geologic structures of the Russian Far East according to (Kepezzhinskas et al., 2024; Kepezzhinskas et al., 2025). Principal structural units: 1 — Siberian craton; 2 — Stanovoy superterrane; 3 — Mongol-Okhotsk belt (T_3 – J_2); 4 — Neoproterozoic terranes; 5–8 — terrane collages accreted in PZ_1 (5), PZ_3 (6), P_2 – T_2 (7) and K_2 – N (8); *б* — schematic geologic map of Ildeus-Lucha magmatic ore system area; *в*, *з* — internal structure of the Ildeus (*в*) and Lucha (*з*) basic-ultrabasic intrusions.

(Кеpezжинскas и др., 2024). Возраст пород гранулитовой и амфиболитовой фаций составляет 3.0–2.6 млрд лет, возраст коллизионных и постколлизионных гранитоидов Станового супертеррейна — 1.9–1.8 млрд лет (4). Постскладчатые и постметаморфические габбро-анортозитовые массивы имеют U-Pb возраст 1736–1734 млн лет (Неймарк и др., 1992).

В мезозое докембрийские образования Станового супертеррейна оказались вовлеченными в становление и развитие мезозойской активной континентальной окраины, связанной с субдукцией Монголо-Охотской океанической коры под южный край Сибирского кратона и последующей коллизией Сибирского и Амурского континентальных блоков в юрское время (Кепежинскас и др., 2024). В триасе произошло становление глубинных plutонических систем базит-ультрабазитового и гранитоидного состава. Первые часто несут рассеянную кобальт-медно-никелевую минерализацию, а со вторыми связано золото-серебряное оруденение. Под воздействием позднеюрско-раннемеловых коллизионных и постколлизионных процессов эти минерализованные системы претерпели метасоматические изменения (Бучко и др., 2002; Бучко и др., 2008; Кепежинскас и др., 2024). В раннемеловое время в пределах центральной части Станового супертеррейна также происходило формирование лавово-пирокластических полей средне-кислого состава и внедрение небольших тел гранодиоритов, монцонитов и гранит-порфиров (Бучко и др., 2016).

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Петрографическое изучение пород выполнено с помощью микроскопа Imager A2m (Karl Zeiss, Германия). Анализ петрогенных окислов осуществлялся рентгено-флуоресцентным методом (спектрометр S4 Pioneer, Bruker, Германия) с применением стандартов LDI-3 (габбро), WMG-1a (минерализованное габбро), ДВБ (андезитобазальт), ДВА (андезит) и ДВД (дацит). Погрешность определения не более 10 %.

Концентрации редких, рассеянных и редкоземельных элементов определялись методом ICP-MS на масс-спектрометре ELAN9000 (Perkin Elmer, Канада) с использованием стандартных образцов BHVO-1 (гавайский толеитовый базальт), JP-1 (перидотит), JA-1 (андезит) и JB-3 (высоко-глиноземистый базальт). Относительная аналитическая погрешность не превышала 5 % для содержаний более 20 г/т и 10 % для содержаний менее 20 г/т.

Состав породобразующих, акцессорных и рудных макро- и микроминералов определялся полуколичественно с целью их диагностики на сканирующем электронном микроскопе VEGA 3 LMN TESCAN (Республика Чехия) с энергодисперсионной системой микроанализа Oxford X—Max 80 (Великобритания) (СЭМ-ЭДА) при ускоряющем напряжении 20 кВ, токе электронного пучка 530 пА, диаметре электронного пучка 0.2 мкм и живом времени набора спектров 20 с. В качестве стандартов использовался набор стандартных образцов Oxford/108699 # 6067, внутренняя калибровка прибора осуществлялась с помощью стандарта Oxford Instruments/143100 # 9864-14. Погрешность определения основных компонентов при данных условиях анализа не превышала 0.1 мас. %.

Для СЭМ-ЭДА исследований относительно крупных (более 50 мкм) минералов готовились срезы пород с последующей шлифовкой на тонких корундовых порошках. Минералы меньших размеров при этом могут отрываться от породной матрицы, перемещаться по поверхности образца и закрепляться среди минералов других ассоциаций, поэтому для их исследования в ряде случаев готовились сколы пород, которые помещались в камеру СЭМ без обработки. Разрешение использованного в нашей работе СЭМ-ЭДА не во всех случаях позволяло различать разнородные фазы в микровключениях, поэтому выполненные нами анализы микровключений показывают только в определенной мере усредненный состав микрообъекта в области анализа.

ПЕТРОЛОГО-ГЕОХИМИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА

В пределах Станового супертеррейна мезозойские корневые plutонические системы представлены крупными базит-ультрабазитовыми массивами и мелкими интрузиями габброидного состава (Балыкин и др., 1986; Бучко и др., 2008; Кебезинская и др., 2024; Кебезинская и др., 2025). Базит-ультрабазитовые массивы в основном имеют тектонические контакты с породами докембрийской структурной рамы. Тем не менее, поисковое бурение вдоль западного контакта Ильдеусского базит-ультрабазитового массива вскрыло в одной скважине интрузивный контакт между краевым габбро и плагиогнейсом Становой серии докембрийского возраста (Kepzhinskas et al., 2023), а в другой — чередование габброидов явно интрузивного облика и амфиболитов, традиционно относимых в этом районе к той же докембрийской Становой метаморфической серии (Глебовицкий и др., 2009; Кебезинская и др., 2024).

Крупные базит-ультрабазитовые массивы центральной части Станового супертеррейна характеризуются грубой расслоенностью и неявно выраженной зональностью, образованной ядром, сложенным дунитами, гарцбургитами и лерцолитами, условно пироксенитовой переходной зоной (вебстериты, верлиты, оливиновые пироксениты) и относительно маломощной (до 100 м) внешней зоной краевых габброидных пород, образованной габбро-норитами и габбро-анортозитами. Основным их отличием от концентрически зональных дунит-клинопироксенит-габбровых массивов урало-алаянского типа является постоянное присутствие модального ортопироксена (Berdnikov et al., 2022; Kepzhinskas et al., 2023). Базит-ультрабазитовые массивы интродуцированы дайками клинопироксенитов, а также жилами и небольшими телами гранодиоритов и гранит-порфиров.

В настоящей работе изложены результаты изучения габброидов из краевых частей двух наиболее ярких представителей мезозойских plutонических комплексов центральной части Станового супертеррейна — массивов Ильдеус и Луча. Меланократовые габброиды Лучинского массива представлены среднезернистыми породами явно кумулятивного облика, сложенные в основном ортопироксеном с подчиненным количеством клинопироксена и интеркумулусных плагиоклаза, амфибола, биотита и магнетита (рис. 2, а). Лейкократовые габброиды Лучинского массива, обычно мелкозернистые до среднезернистых, характеризуются габбровой структурой, сложенной клино- и ортопироксеном и плагиоклазом, а также амфиболом, биотитом и железо-титановыми оксидами (рис. 2, б). Вторичные изменения в меланократовых породах представлены серпентином, хлоритом, тремолитом и гидроокислами железа, а в лейкократовых габброидах — хлоритом, актинолитом, альбитом, калиевым полевым шпатом, а также вторичными окислами и гидроокислами железа (рис. 2, а, б).

Мезозойские базит-ультрабазитовые plutонические породы Станового супертеррейна характеризуются широкими вариациями практически всех петрогенных окислов и редких элементов, но в целом обнаруживают повышенные содержания глинозема, крупноионных литофильных и легких редкоземельных элементов и пониженные содержания титана и других высокозарядных некогерентных элементов, например, циркония, гафния, ниобия и тантала (Berdnikov et al., 2022). Их отличает повышенные магнезиальность, содержания хрома, никеля и кобальта, а также рост содержаний глинозема, натрия, калия и большинства некогерентных редких элементов от перидотитов к габброидам, что характерно для известково-щелочных трендов дифференциации, а также высокие отношения крупноионных литофильных (Cs, Rb, Sr, Ba) к высокозарядным (Nb, Ta, Hf, Zr) и легким редкоземельным (La, Ce, Nd, Sm) элементам (рис. 2, в), свойственные изверженным породам, в той или иной мере испытавшим влияние субдукционных

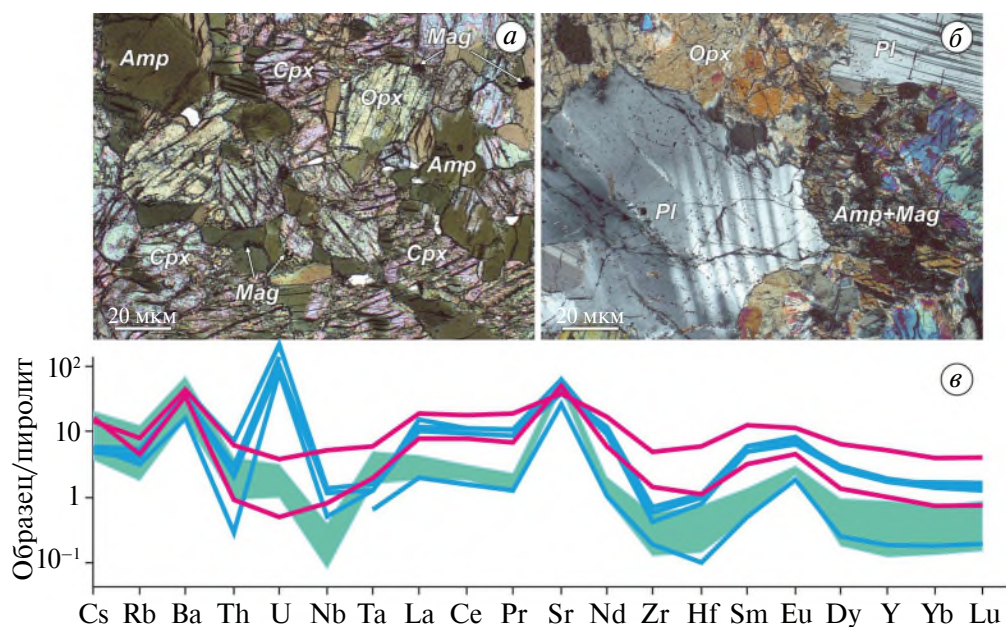


Рис. 2. Петрографические и геохимические характеристики габброидов из базит-ультрабазитовых массивов Ильдеус и Луча: *a* — меланократовые габброиды; *б* — лейкократовые габброиды (участок Дунитовый); *в* — распределение содержаний редких элементов в габброидах массивов Ильдеус и Луча, нормированных по примитивной мантии (McDonough, Sun, 1995). Аббревиатуры минералов на рисунках и в подписях в соответствии с правилами IMA (Warr, 2021).

Fig. 2. Petrographic and geochemical features of gabbroic rocks from the Ildeus and Lucha basic-ultrabasic intrusions: *a* — melanocratic gabbro, *б* — leucocratic gabbro (Dunitovy area); *в* — trace element distribution in gabbroic rocks from the Ildeus and Lucha intrusions normalized to primitive mantle (McDonough, Sun, 1995). Mineral abbreviations in figures and figure captions follow the IMA nomenclature (Warr, 2021).

магматических источников или процессов (Кеpezzhinskas et al., 2023). В некоторых габброидах Лучинского массива наблюдаются повышенные концентрации урана (рис. 2, *в*), возможно, отражающие либо своеобразные геохимические характеристики постколлизийных магматических источников, либо локальные гидротермальные процессы в центральной части Станового кратонного супертеррейна (Кеpezzhinskas и др., 2024).

МИКРОВКЛЮЧЕНИЯ МЕТАЛЛОВ И МИНЕРАЛОВ

Габброиды Ильдеусско-Лучинского интрузивного комплекса содержат многочисленные микровключения железо-титановых оксидов, апатита, сульфатов и сульфидов, входящие в ассоциацию ИТОАСС (Кеpezzhinskas et al., 2024). В краевом габбро Ильдеусского массива присутствуют субгизометричные сегрегации пирита, барита, рутила и кварца, включенные в высокоглиноземистый ($Al > 6$ мас.%) позднематматический амфибол (рис. 3, *a*).

Часто встречаются сростки микровключений пирита, ильменита и титанита (рис. 3, *б*), ильменита и рутила (рис. 3, *в*) в амфиболе, а также сегрегации микровключений пирита, пирротина, халькопирита, барита, рутила и ильменита в амфиболовом матриксе (рис. 3, *г*). В ассоциации с халькопиритом и баритом иногда наблюдается оксид железа, по элементному составу соответствующий гематиту (гетиту, лимониту

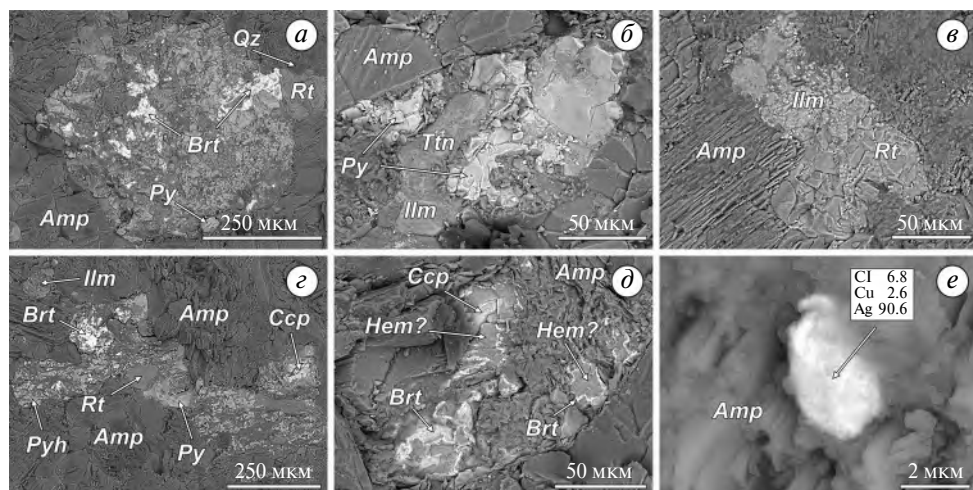


Рис. 3. Ассоциации микровключений ассоциации ИТОАСС в габброидах массива Ильдеус: *a* — субизометричная сегрегация пирита с баритом, рутилом и кварцем в амфиболе; *б* — обособление пирита с ильменитом и титанитом в амфиболовом матриксе; *в* — сросток ильменита с рутилом в амфиболе; *г* — сложное включение пирита, пирротина и халькопирита с баритом, рутилом, ильменитом в амфиболовом матриксе; *д* — включение халькопирита, барита и гематита (?) в амфиболовом матриксе; *е* — микровключение хлорида серебра (+Cu) в амфиболе. Изображение в обратно отраженных электронах.

Fig. 3. ITOASS assemblage microinclusions in the Ildeus gabbro: *a* — subisometric segregation of pyrite with barite, rutile, and quartz in amphibole; *б* — pyrite segregation with ilmenite and titanite in amphibole matrix; *в* — ilmenite intergrowth with rutile in amphibole; *г* — composite inclusion of pyrite, pyrrhotite, and chalcopyrite with barite, rutile and ilmenite in amphibole matrix; *д* — inclusion of chalcopyrite, barite, and hematite (?) in amphibole matrix; *е* — microinclusion of silver chloride (+Cu) in amphibole. BSE images.

или их сросткам) с повышенным содержанием кислорода (рис. 3, *д*)¹. Микровключения ИТОАСС в этих породах ассоциируют с хлоридами серебра (+Cu), включенными в позднемагматический амфибол (рис. 3, *е*).

В меланократовых габброидах участка Дунитовый (западная часть Лучинского массива) также встречаются многочисленные микровключения и их сегрегации, сложенные Fe-Ti оксидами, апатитом, сульфатами и сульфидами. Так, в плагиоклазе зафиксирован сросток ильменита и апатита в ассоциации с пиритом и биотитом (рис. 4, *а*).

В клинопироксенах присутствуют относительно крупные (100—300 мкм) сростки пирита, халькопирита и окисленного гематита (?), окаймленные магнетитом и пирротином (рис. 4, *б*), ассоциирующие с микровключениями ферроактинолита, актинолита и пирита. В зерне ортопироксена отмечен крупный (более миллиметра) сросток ильменита, пирита, апатита и хлорита (рис. 4, *в*). Хлорит также локально развивается по вмещающему ортопироксену и, вероятнее всего, фиксирует начальные этапы метасоматического преобразования как породообразующих магматических железо-магнелевых силикатов, так и содержащихся в них включений ассоциации ИТОАСС. В плагиоклаз-амфиболовом матриксе лейкократовых разновидностей (рис. 2, *б*) габброидов участка Дунитовый обнаружены ксеноморфные выделения, сложенные пиритом, баритом и гематитом (?) (рис. 4, *г*), а на стыках некоторых зерен высокоглиноземистого позднемагматического амфибола и клинопироксена встречаются ксеноморфные включения титаномagnetита в оболочке

¹ По данным СЭМ-ЭДА точно идентифицировать этот минерал не удалось. Далее в тексте он обозначен как гематит (?), а на рисунках как (Hem?).

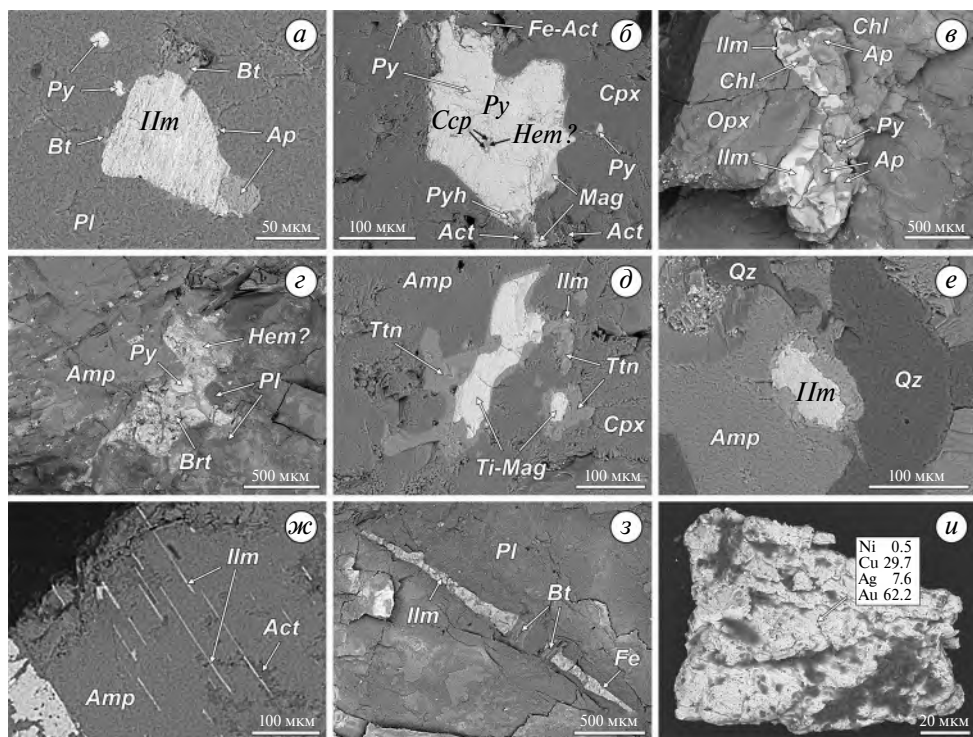


Рис. 4. Микровключения ИТОАСС в габброидах участка Дунитовый Лучинского массива: *a* — сросток ильменита и апатита в ассоциации с пиритом и биотитом в плагиоклазе; *б* — зерно пирита с включениями магнетита, гематита (?), халькопирита и пирротина в ассоциации с ферроактинолитом и актинолитом в клинопироксене; *в* — включение ильменита, пирита, апатита и хлорита в ортопироксене; *г* — включения пирита, гематита (?) и барита в амфибол-плагиоклазовом матриксе; *д* — включения титаномagnetита, окаймленного титанитом и ильменитом, на контакте зерен амфибола и клинопироксена; *е* — включения ильменита в амфибол-кварцевом матриксе; *ж* — игольчатые выделения ильменита в ассоциации с актинолитом в амфиболе; *з* — игольчатое выделение ильменита и самородного железа в ассоциации с биотитом в плагиоклазе; *и* — микрочастица сплава Cu-Ag-Au с примесью никеля. Изображение в обратно отраженных электронах.

Fig. 4. ITOASS microinclusions in the Dunitovy area of the Lucha intrusion: *a* — ilmenite intergrowth with apatite in association with pyrite and biotite in plagioclase; *б* — pyrite grain with magnetite, hematite (?), chalcopyrite, and pyrrhotite inclusions in association with Fe-actinolite and actinolite in clinopyroxene; *в* — inclusion of ilmenite, pyrite, apatite, and chlorite in orthopyroxene; *г* — inclusion of pyrite, hematite (?), and barite in amphibole-plagioclase matrix; *д* — inclusions of titanomagnetite rimmed by titanite and ilmenite at the contact between amphibole and clinopyroxene grains; *е* — inclusions of ilmenite in quartz-amphibole matrix; *ж* — needle-like ilmenite in association with actinolite in amphibole; *з* — needle-like ilmenite and native iron in association with biotite in plagioclase; *и* — microparticle of Cu-Ag-Au alloy with minor nickel. BSE images.

титанита и ильменита (рис. 4, *д*). В позднемагматических амфиболах присутствуют микровключения ильменита как субизометричной формы (рис. 4, *е*), так и в виде тонких игольчатых выделений в ассоциации с метасоматическим актинолитом, локально замещающим амфибол (рис. 4, *ж*). Ильменит также образует более крупные веретенообразные (пластинчатые?) выделения в плагиоклазе в ассоциации с самородным железом и биотитом (рис. 4, *з*), возможно, отражающие сложную эволюцию окислительно-восстановительных условий при формировании пород Лучинского массива. Из меланократовых габброидов участка Дунитовый выделены микрочастицы сплава состава Cu-Ag-Au с небольшой примесью никеля (0.5 мас.%; рис. 4, *и*), вероятнее всего, имеющие магматическое происхождение



Рис. 5. Микровключения сплавов Cu–Ag–Au (*а* – в амфиболе, *б* – в плагиоклазе, *в* – в хлорите) в габброидах участка Дунитовый Лучинского массива. Изображение в обратно отраженных электронах.

Fig. 5. Microinclusions of Cu–Ag–Au alloys (*a* – in amphibole, *b* – in plagioclase, *c* – in chlorite) in gabbroic rocks from the Dunitovy area of the Lucha intrusion. BSE images.

(Бердников и др., 2024). На это же указывает их внешний облик, соответствующий условиям магматической коррозии при кристаллизации из высокотемпературных, богатых металлами силикатных или силикатно-сульфидных расплавов (Berdnikov et al., 2021). В габброидах участка Дунитовый диагностированы микровключения (размером 1–2 мкм) сплава Cu–Ag–Au в амфиболе (рис. 5, *а*), в плагиоклазе (рис. 5, *б*) и в хлорите (рис. 5, *в*) преимущественно ксеноморфного (рис. 5, *а* и *в*) или чешуйчатого облика (рис. 5, *б*). По составу эти сплавы отвечают магматическому золоту, образующемуся при дифференциации обогащенных металлами мантийных расплавов в верхней мантии или земной коре (Бердников и др., 2024).

В габброидах участка Дунитовый структуры метасоматического замещения развиваются преимущественно в лейкократовых разновидностях (рис. 6).

Так, в высокоглиноземистых амфиболах, маркирующих поздние магматические этапы эволюции Ильдеусско-Лучинской системы (Amp1 на рис. 6, *а*), появляются линейные зоны с пониженным оптическим рельефом, сложенные амфиболом с более низкими (менее 6 мас.%) содержаниями глинозема и более высокими содержаниями железа и титана (Amp2 на рис. 6, *а*) в ассоциации с магнетитом, ильменитом и пиритом. В этих же линейных зонах метасоматической проработки локализован плагиоклаз, отвечающий по составу альбиту-олигоклазу (рис. 6, *а*). В позднемагматических высокоглиноземистых амфиболах (Amp1 на рис. 6, *б*) встречаются линейно-прерывистые зоны вторичных изменений, представленные кварцем, ильменитом и метасоматическим высокотитанистым ($Ti > 3$ мас.%) амфиболом, отвечающим по составу химическому тренду от титанистого эденита через титанистую роговую обманку до актинолита с повышенным содержанием титана (Amp2 на рис. 6, *б*). В нем также наблюдаются участки гидротермальной переработки, сложенные актинолитом, апатитом, магнетитом и ильменитом (рис. 6, *в*), а в метасоматическом амфиболе диагностировано микро-зерно тонкодисперсного магнетит-пиритового композита в ассоциации с кварцем и ильменитом (рис. 6, *в*). В этих же породах встречаются зерна ксеноморфного пирротина в ассоциации с кобальтсодержащим (2–3 мас.% Co) пиритом, хромсодержащим (5 мас.% Cr) магнетитом и низкоглиноземистым амфиболом (обнаруживающим отчетливые тенденции эволюции в сторону актинолитовых составов), включенные в глиноземистый, скорее всего позднемагматический амфибол (рис. 6, *д*), а также ксеноморфные выделения пирита с микровключениями пирротина, самородного железа и композитов хлораргирита с самородным серебром в актинолите (рис. 6, *е*). Такие метасоматические ассоциации характерны для поздних стадий эволюции

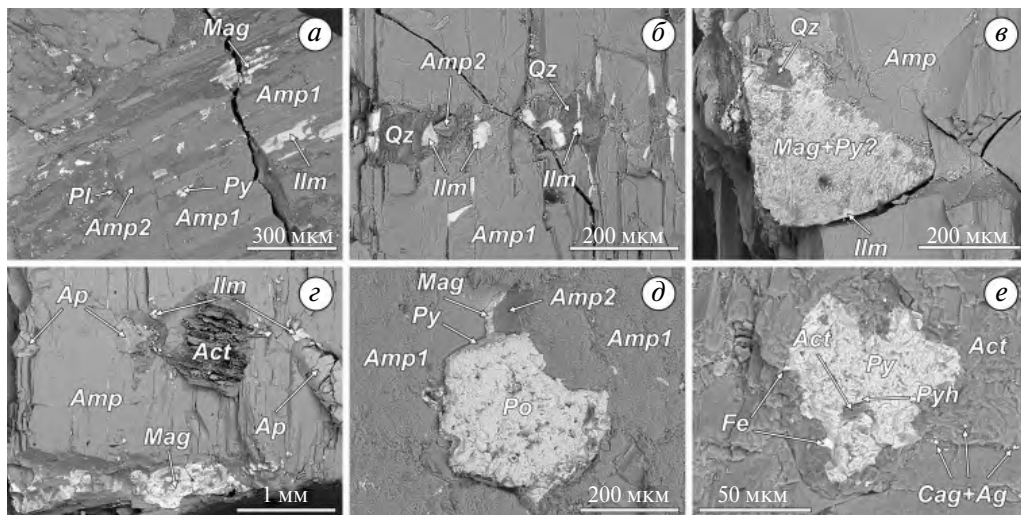


Рис. 6. Начальные стадии метасоматического преобразования в габброидах участка Дунитовый Лучинского массива: *a* — замещение глиноземистого амфибола амфиболом с меньшими содержаниями алюминия и магния в ассоциации с магнетитом, ильменитом, пиритом и плагиоклазом; *b* — замещение позднемагматического низкотитанистого амфибола агрегатом кварца, ильменита и высокотитанистого амфибола; *в* — включение магнетит-пиритового композита с ильменитом и кварцем в позднемагматическом амфиболе; *г* — включения апатита, магнетита, ильменита и актинолита в позднемагматическом амфиболе; *д* — включение пирротина в магматическом высокоглиноземистом амфиболе (Amp1) в ассоциации с низкоглиноземистым амфиболом (Amp2), Co-содержащим пиритом и Cr-содержащим магнетитом; *е* — включение пирита в ассоциации с пирротинном, самородным железом и композитной смесью хлораргирита с самородным серебром в актинолите. Изображение в обратно отраженных электронах.

Fig. 6. Initial stages of metasomatic alterations of gabbroic rocks from the Dunitovy area of the Lucha intrusion: *a* — replacement of Al-rich amphibole with amphibole with lower Al and Mg contents in association with magnetite, ilmenite, pyrite, and plagioclase; *b* — replacement of late-magmatic low-Ti amphibole with quartz, ilmenite, and high-Ti amphibole aggregate; *в* — composite magnetite-pyrite inclusion with ilmenite and quartz in late-magmatic amphibole; *г* — inclusions of apatite, magnetite, ilmenite, and actinolite in late-magmatic amphibole; *д* — pyrrhotite inclusion in magmatic high-Al amphibole (Amp1) in association with low-Al amphibole, Co-bearing pyrite, and Cr-bearing magnetite; *е* — pyrite inclusion in association with pyrrhotite, native iron and chlorargyrite composite with native silver in actinolite. BSE images.

рудно-магматических систем IOCG-IOA типа (Barton, 2014; Del Real et al., 2023; Reich et al., 2022).

Аналогичные композитные микровключения, сложенные хлораргиритом и самородным серебром, встречаются нами в Ca—Na плагиоклазе (рис. 7, *a*), что может указывать на магматическую природу хлорсодержащих флюидов, сопровождавших становление Лучинского массива.

Ранее нами показано, что нестехиометричность (избыток серебра) микровключений хлораргирита связана с эффектом фоторазложения AgCl после вскрытия образца, сопровождающегося удалением летучего хлора и образованием на поверхности хлораргирита наночастиц самородного серебра, эффективно «экранирующих» хлорид серебра от дальнейшего восстановления (Кеpezzhinskas et al., 2023; Крутикова и др., 2024). В плагиоклазе (рис. 7, *б*) и позднемагматическом амфиболе (рис. 7, *в*) из адакитовых жил, секущих габброиды Лучинского массива, обнаружены микровключения бисмоклита, природного оксохлорида висмута (BiOCl). Бисмоклит встречается в виде поздней вторичной фазы в пегматитах и грейзенах, и его присутствие в изученных образцах также может быть связано с метасоматической проработкой

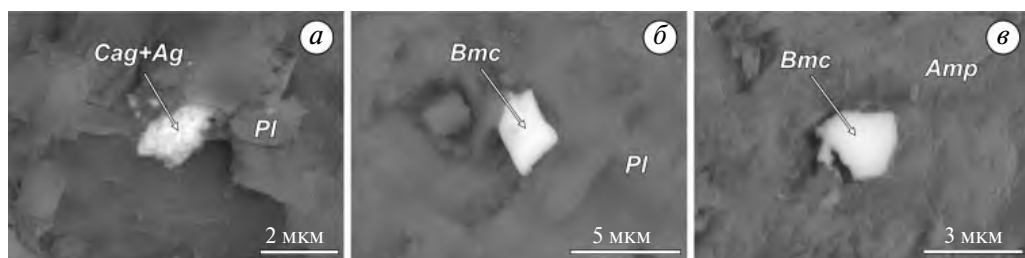


Рис. 7. Микровключения хлоридов серебра и висмута в изверженных породах участка Дунитовый Лучинского массива: *а* — композитное микровключение хлорида серебра и самородного серебра в плагиоклазе; *б, в* — микровключения бисмоклита в плагиоклазе (*б*) и амфиболе (*в*). Изображение в обратно отраженных электронах.

Fig. 7. Microinclusions of silver and bismuth chlorides in igneous rocks from the Dunitovy area of the Lucha intrusion: *a* — composite microinclusion of silver chloride and native silver in plagioclase; *б, в* — bismoclite microinclusions in plagioclase (*б*) and amphibole (*в*). BSE images.

изверженных пород Лучинского массива в присутствии богатых хлором минерализованных гидротермальных флюидов.

Породы Лучинского базит-ультрабазитового массива содержат многочисленные микровключения акантита (рис. 8).

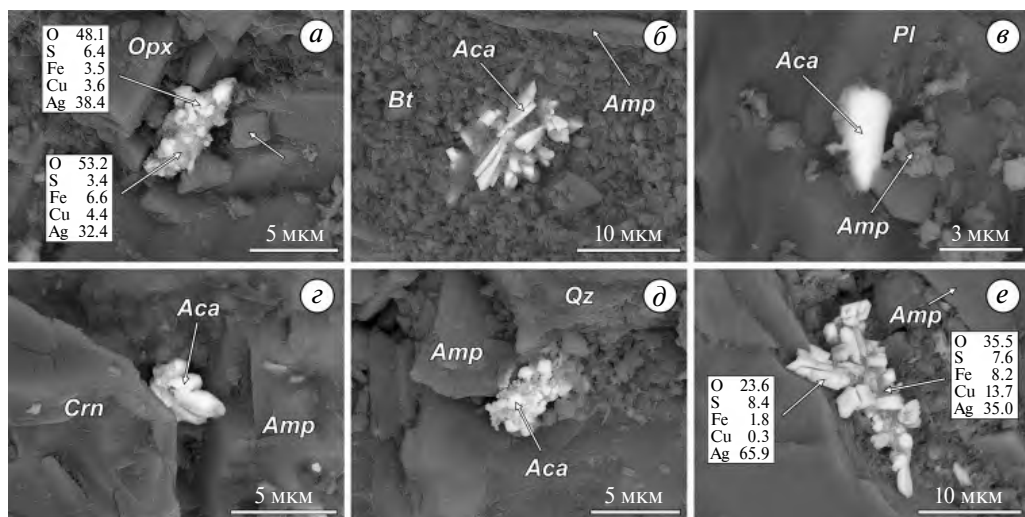


Рис. 8. Микровключения сульфидов серебра в изверженных породах участка Дунитовый Лучинского массива: *а* — микроагрегат акантита на подложке оксидов железа и меди в ортопироксен-амфиболовом матриксе; *б* — агрегат микрозерен пластинчатого акантита в биотите; *в* — микровключение акантита в амфибол-плагиоклазовом матриксе; *г* — микровключение акантита на контакте зерен корунда и амфибола; *д* — агрегат микрозерен акантита в кварц-амфиболовом матриксе; *е* — агрегат идиоморфных микрозерен акантита на подложке оксидов железа и меди в амфиболе. Изображение в обратно отраженных электронах.

Fig. 8. Silver sulfide microinclusions in igneous rocks from the Dunitovy area of the Lucha intrusion: *a* — acanthite microaggregate underlain by iron and copper oxides in amphibole-orthopyroxene matrix; *б* — aggregate of platy acanthite micrograins in biotite; *в* — acanthite microinclusion in amphibole-plagioclase matrix; *г* — acanthite microinclusion at the contact between corundum and amphibole grains; *д* — aggregate of acanthite micrograins in quartz-amphibole; *е* — aggregate of idiomorphic acanthite micrograins underlain by iron and copper oxides in amphibole. BSE images.

В ряде случаев ксеноморфные (рис. 8, *a*) или идиоморфные (рис. 8, *e*) выделения акантита формируются на подложке из оксидов железа и меди. Пластинчатые выделения акантита присутствуют в биотите (рис. 8, *b*), его ксеноморфные микровключения отмечены в существенно амфиболовом матриксе в ассоциации с плагиоклазом (рис. 8, *в*), корундом (рис. 8, *з*) или кварцем (рис. 8, *д*). Подобное обогащение пород серебром, выраженное в присутствии его минералов, характерно для рудных ассоциаций ряда железоокисно-медно-золотых месторождений IOCG-систем Якутии (Сетте-Дабан), южной Австралии (рудный район Olympic Dam) и Канады (протерозойская магматическая зона Great Bear) (Костин и др., 2016; Barton, 2014; Skirrow, 2022; Williams et al., 2005).

Помимо сульфидов серебра в изверженных породах участка Дунитовый Лучинского массива присутствуют единичные зерна сульфидов свинца, цинка, молибдена и мышьяка (рис. 9).

Галенит наблюдается в виде ксеноморфных микровключений размером от 1 до 5 микрон в амфиболе (рис. 9, *a*), биотите (рис. 9, *б*) и плагиоклазе (рис. 9, *в*). Кварц-кальцитовый агрегат из адакитовых прожилков в габброидах Лучинского массива содержит ксеноморфные выделения сфалерита (рис. 9, *з*). В амфибол-плагиоклазовом матриксе габброидов обнаружено микро-зерно чешуйчатого молибденита (рис. 9, *д*), а в кварц-кальциновом (по-видимому, частично гидротермально переработанном) мезостазисе содержится идиоморфное зерно арсенопирита (рис. 9, *е*).

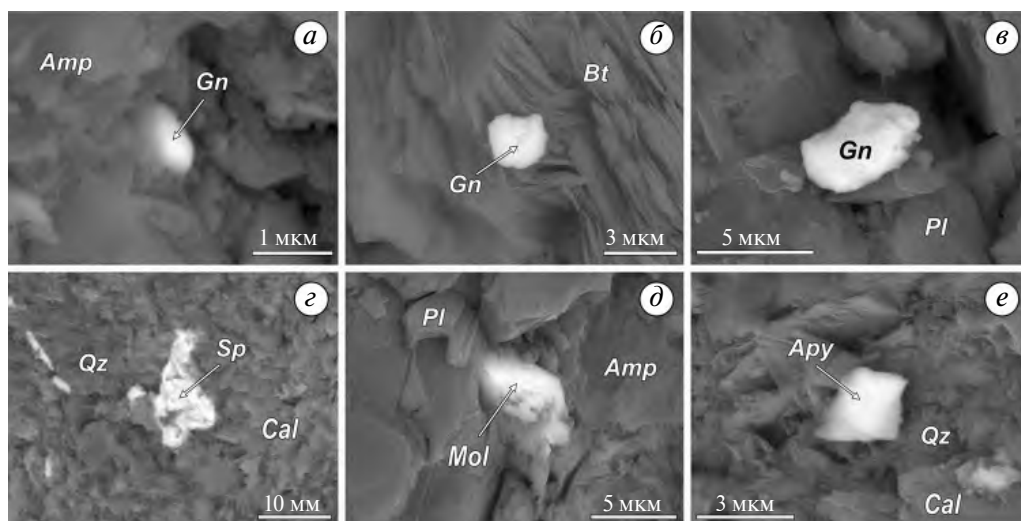


Рис. 9. Микровключения сульфидов железа, свинца, цинка, молибдена и мышьяка в изверженных породах участка Дунитовый Лучинского массива: *a–в* — микровключения галенита в амфиболе (*a*), биотите (*б*) и плагиоклазе (*в*); *г* — микровключение сфалерита в кальцит-кварцевом матриксе; *д* — микровключение молибденита в плагиоклаз-амфиболовом матриксе; *е* — микровключение арсенопирита в кальцит-кварцевом матриксе. Изображение в обратно отраженных электронах.

Fig. 9. Microinclusions of iron, lead, zinc, molybdenum and arsenic sulfides in igneous rocks from the Dunitovy area of the Lucha intrusion: *a–в* — galena microinclusions in amphibole (*a*), biotite (*б*), and plagioclase (*в*); *г* — sphalerite microinclusion in quartz-calcite matrix; *д* — molybdenite microinclusion in amphibole-plagioclase matrix; *е* — arsenopyrite microinclusion in quartz-calcite matrix. BSE images.

ДИСКУССИЯ

Месторождения железоксидно-медно-золотого и апатит-железорудного типа зачастую характеризуются рядом сходных структурно-вещественных характеристик, позволяющих объединять их в одну группу гидротермально-магматических объектов, но их рудные системы могут быть связаны с весьма разнообразными магматическими породами и проявляться в широком спектре геотектонических обстановок (Skirrow, 2022; Williams et al., 2005) (Табл.).

Таблица. Сравнительные структурно-вещественные характеристики месторождений железоксидно-медно-золотого (IOCG) и апатит-железорудного (IOA) типов и базит-ультрабазитовых массивов Ильдеус и Лучинский Станового супертеррейна

Table. Comparative structural-compositional characteristics of iron oxide copper-gold (IOCG) and iron oxide-apatite (IOA) deposits and Ildeus-Lucha basic-ultrabasic intrusions from the Stanovoy superterrane

Гидротермально-магматические рудные системы	Тектонические обстановки	Вмещающие породы	Рудные тела	Ассоциации рудных и аксессуарных минералов	Геохимические особенности
Железоксидно-медно-золотые (IOCG)	Орогенные (субдукционные, коллизионные, пост-коллизионные); пост-орогенные (анорогенные) обстановки; локальное растяжение на магматически активных окраинах континентов (Андийский тип)	Гранитоиды, габбро, долериты, андезиты, дациты, риолиты, диориты, градиориты, шошониты, монцониты, кварцевые сиениты, гранитные батолиты	Минерализация типа «манто»; минерализованные гидротермальные брекчии; ленто- и линзообразные, четковидные тела; жилы (0.2—4 м); прожилковые зоны; рудные столбы, гнезда, апофизы, шнурки; рассеянная минерализация	Халькопирит, пирит, пирротин, магнетит, сфен, рутил, барит, гематит, апатит, актинолит, реже борнит, халькозин, сплавы Cu—Au, реже циркон, торит, гетит, флуоркарбонаты и фосфаты РЗЭ (в подтипе Olympic Dam)	Магмы с субдукционными характеристиками; смешанная (магматическая + эвапориты) $\delta^{37}\text{Cl}$ метка; изотопы S в основном магматические; в богатых гематитом IOCG присутствует коровая сера; преимущественно магматические изотопы Fe и O; мантийно-коровые изотопы Nd и Sr
Апатит-железорудные (IOA)	Обстановки локального растяжения в пределах окраинных магматических поясов (Анды); задуговые и интрадуговые рифты; внутриплитные вулканоплутонические пояса в ассоциации с гранитоидами А-типа	Андезитодацитовые лавы и брекчии, пирокластика и брекчированные жилы (до нескольких м); массивные, прожилковые и штокверковые руды; минерализованные дайки и брекчии; рассеянная минерализация	Магнетитовые ($\leq 90\%$) лавы и пирокластика; массивные и брекчированные жилы (до нескольких м); массивные, прожилковые и штокверковые руды; минерализованные дайки и брекчии; рассеянная минерализация	Апатит, магнетит, ильменит, сфен, рутил, барит, монацит, диопсид, амфибол, реже циркон, скаполит, ксенотим и силикаты РЗЭ	Магмы с субдукционными характеристиками, часто восстановленные ($\Delta\text{QFM} \leq +1$); магматические изотопы Fe и O; мантийные изотопы Nd с небольшим коровым компонентом; мантийный состав изотопов серы

Таблица. Окончание

Гидротермально-магматические рудные системы	Тектонические обстановки	Вмещающие породы	Рудные тела	Ассоциации рудных и акцессорных минералов	Геохимические особенности
Базит-ультрабазитовые массивы Ильдеус и Лучинский	Субдукционная в триасе, сменившаяся позднеюрскими коллизионными и раннемеловыми постколлизионными процессами	Дуниты, перидотиты, вебстериты, верлиты, габбро-нориты, габбро-анортозиты, адакитовые гранитоиды	Рассеянная минерализация; редкие ликвидационные капли и прожилки с Fe–Ti оксидами, апатитом, сульфатами и сульфидами ITOASS типа	Магнетит, Тi-магнетит, ильменит, рутил, F- и Cl-апатит, халькопирит, пирит, пирротин, сфалерит, акантит, сростки сульфидов Pb–Cu–Fe и Zn–Pb, барит, Sr–барит, целестин, хлориды Ag и Cu, ксенотим, монацит, силикаты, оксиды и карбонаты P3Э, сплавы Zn–Cu–Ag и Cu–Ag–Au	Магмы с субдукционными характеристиками; галоген (F, Cl)- и серо-содержащие гидротермальные флюиды; мантийные изотопы серы

Примечание. В таблице использованы данные (Бучко и др., 2002; Костин, 2016; Соловьев, 2011; Barton, 2014; Chiaradia et al., 2006; Li et al., 2021; Mateo et al., 2023; Reich et al., 2022; Romero et al., 2024; Skirrow, 2022; Williams et al., 2005).

Современные представления о железооксидно-медно-золотых и апатит-железорудных месторождениях предполагают существование двух основных этапов формирования этих крупных рудных систем: 1) собственно магматического, так или иначе связанного с эволюцией (фракционной кристаллизацией) флюидонасыщенных основных, средних и кислых магм и 2) гидротермально-метасоматического, в котором источниками металлов являются крайне разнообразные, часто смешивающиеся флюиды, как непосредственно поздние и постмагматические, так и немагматические, связанные с диагенезом и метаморфизмом осадочного вещества крупных эпиконтинентальных бассейнов (Barton, 2014; Chiaradia et al., 2006).

Среди ассоциаций микровключений в габброидах Брянтинского блока Станового супертеррейна по ряду структурно-геохимических признаков, сформулированных нами в опубликованных работах (Крутикова и др., 2024; Berdnikov et al., 2022; Kopezhinskas et al., 2023), присутствуют как микроминералы, характеризующие собственно магматический этап эволюции IOCG-IOA систем, так и микровключения, относящиеся к начальным этапам гидротермально-метасоматической переработки магматических минеральных парагенезисов. К первым относится ITOASS ассоциация с магнетитом, титаномagnetитом, ильменитом, гематитом (железо-титановыми оксидами), апатитом, сульфидами (пиритом, пирротин, халькопиритом) и сульфатами (баритом, Sr-содержащим баритом). Она чаще всего локализована

в центральных частях кристаллов клинопироксена, ортопироксена, плагиоклаза и высокоглиноземистого амфибола. Пироксены, как правило, кристаллизовались на собственно магматических этапах эволюции металлоносных расплавов, в то время как высокоглиноземистый амфибол соответствует позднемагматической или даже автометасоматической стадии формирования этих рудно-магматических систем (Kerezhinskas et al., 2023). Начальные этапы метасоматической переработки в габброидах Станового супертеррейна выражены в развитии зон и пятен, сложенных кварцем, ильменитом, высокотитанистым амфиболом и актинолитом, по набору минералов и структурному положению сходных с гидротермально-метасоматическими ассоциациями железоксидно-медно-золотых и апатит-железорудных месторождений (Mateo et al., 2023) (Табл.). К этим же начальным этапам рудного метасоматоза относятся некоторые микровключения пирита и пирротина с магнетитом, самородным железом, а также композитами хлорида серебра с самородным серебром (рис. 7, *д, е*). Единичные выделения сфалерита, молибденита и арсенопирита в поздних адакитовых прожилках (характеризующихся низкими концентрациями Y и Yb, а также высокими концентрациями Sr и индикаторными отношениями $Sr/Y > 50$) скорее всего, относятся к постколлиззионному этапу минералообразования в Брянтинском блоке Станового супертеррейна (Кепежинскас и др., 2024а) и имеют порфировую или эпitherмальную природу.

Важным представляется обнаружение в изученных ассоциациях микровключений актинолита (рис. 4, *б, ж* и 5, *з*). Актинолит, наряду с магнетитом, апатитом и сульфидами железа, является индикаторным минералом для месторождений IOCG-IOA типа (Del Real et al., 2023; Skirrow, 2022) и традиционно рассматривается в качестве метасоматической фазы. Имеющиеся экспериментальные данные показывают, что актинолит стабилен при температурах 750—900 °C (Liedo, Jenkins, 2008) и, таким образом, также может кристаллизоваться на завершающих этапах коровой эволюции металлоносных магм, родоначальных для железоксидно-медно-золотых и апатит-железорудных месторождений. Нам представляется, что актинолит может быть сквозным индикаторным минералом в этих крупных и долгоживущих (10 млн лет в случае гигантского IOCG месторождения Канделария; Romero et al., 2024) рудно-магматических систем, образующимся как на собственно магматическом, так и на гидротермально-метасоматическом этапах их эволюции. В пользу первого говорит присутствие микровключений актинолита и ферроактинолита в ассоциации с магнетитом, пирротинотом и халькопиритом в клинопироксене габброидов Лучинского массива (рис. 4, *б*), а в пользу второго — развитие в нем апатит-ильменит-магнетитовых ассоциаций на участках начальной метасоматической проработки позднемагматических высокоглиноземистых амфиболов (рис. 5, *з*).

В пользу поздне-магматического генезиса микровключений ассоциации ITOASS свидетельствует их часто субизометричная форма, обычно деформированная и корродированная в ходе магматической и метасоматической эволюции породы. Не исключено, что близкая к сферической форма таких минеральных включений (Kerezhinskas et al., 2024) является отражением их изначально жидкого состояния, характерного для ликвационных процессов в металлоносных расплавах. Многочисленные петролого-геохимические данные свидетельствуют о важной роли ликвационных процессов в образовании железоксидно-медно-золотых и апатит-железорудных месторождений (Velasco et al., 2016).

На собственно магматический этап эволюции рудно-магматической системы Лучинского массива наложались начальные стадии метасоматических преобразований, маркируемые микровключениями кварца, рутила, пирита и низкоглиноземистого амфибола во внешней оболочке субизометрических сегрегаций ассоциации ITOASS (рис. 3, *а*). Именно эти минеральные включения обычно соответствуют

гидротермально-метасоматической стадии формирования рудных систем IOCG-IOA (Табл.; Reich et al., 2022; Skirrow, 2022). В пользу явных параллелей с апатит-железорудными рудно-магматическими гидротермальными системами свидетельствуют вариации состава индивидуальных минеральных микровключений в габброидах Лучинского массива. Например, микровключения магнетита в ассоциации ITOASS характеризуются повышенными содержаниями ванадия и пониженными — хрома, что типично для магнетита апатит-железорудных месторождений кирунского типа (Reich et al., 2022; Velasco et al., 2016), а в пирите фиксируются повышенные концентрации никеля и кобальта, также характерные для IOCG-IOA месторождений (Mateo et al., 2023).

Из меланократовых габбро западной части Лучинского массива нами выделены частицы самородного золота (рис. 4, е), что также сближает их с рудами железооксидно-медно-золотых месторождений, в которых золото встречается в самородной форме, хотя присутствуют и электрум, сплавы с висмутом, сурьмой и теллуrom (Zhu, 2016). Обильны также микровключения сплава Cu—Ag—Au (рис. 5), по составу отвечающие магматогенному золоту, связанному с субдукционными магматическими образованиями (Бердников и др., 2024). Содержания золота в габброидах и пироксенитах участка Дуניתовый варьируют от 0.279 до 3.695 г/т, частично перекрываясь с вариациями содержаний золота в месторождениях IOCG типа (0.01—1.41 г/т при среднем 0.41 г/т). При этом для 90 % всех месторождений этого типа среднее содержание золота составляет менее 1 г/т (Zhu, 2016).

В изверженных породах Лучинского массива присутствуют микровключения самородного серебра, его хлоридов и сульфидов (рис. 6—8). На наш взгляд, эти находки свидетельствуют о присутствии значительного количества серебра в высокотемпературном флюиде, сопровождавшем зарождение минералов ассоциации ITOASS в Лучинском интрузивном массиве. Такая «серебрянная» металлогеническая специализация, также проявленная в Ильдеусском базит-ультрабазитовом интрузиве (Kepzhinskis et al., 2023), характерна для ряда IOCG месторождений (так называемый подтип Olympic Dam), в которых помимо магматического флюида в рудообразование вовлечены метаморфогенные флюиды, связанные с сопряженными с IOCG-IOA системами интерконтинентальными осадочными бассейнами (Barton, 2014; Chiaradia et al., 2006; Schlegel et al., 2017).

В настоящее время дискуссионным остается вопрос о составе и эволюции флюидной фазы при образовании месторождений IOCG и IOA типа. Большинство исследователей предполагает, что основным в процессах такого рудообразования был первично магматогенный флюид, претерпевший изменения состава и физико-химических параметров в процессе становления железооксидно-медно-золотых и апатит-железорудных систем в верхних горизонтах земной коры (Chiaradia et al., 2006; Schlegel et al., 2017). В то же время исследование стабильных изотопов S, O, Fe, Ti и флюидных включений в минералах этих месторождений свидетельствует в пользу смешения первично магматических летучих компонентов с метеорными водами и метаморфическими флюидами (Chiaradia et al., 2006; Williams et al., 2005). Изотопный состав серы в ряде представительных железооксидно-медно-золотых и апатит-железорудных месторождений (рис. 10) в первую очередь свидетельствует о глубинном магматическом ее происхождении и, соответственно, о существенно высокотемпературной природе содержащей серу флюидной фазы.

В некоторых IOCG месторождениях (Мантоверде в Чили, Олимпик Дэм на юге Австралии) явно присутствует изотопно легкая сера (от -5 до -13 ‰ $\delta^{34}\text{S}$; рис. 10), что, возможно, свидетельствует об ассимиляции сульфатной серы осадочного происхождения и/или смешении магматических и диагенетических или метаморфических флюидов. Значения $\delta^{34}\text{S}$ в породах Лучинского массива варьируют от -3.7

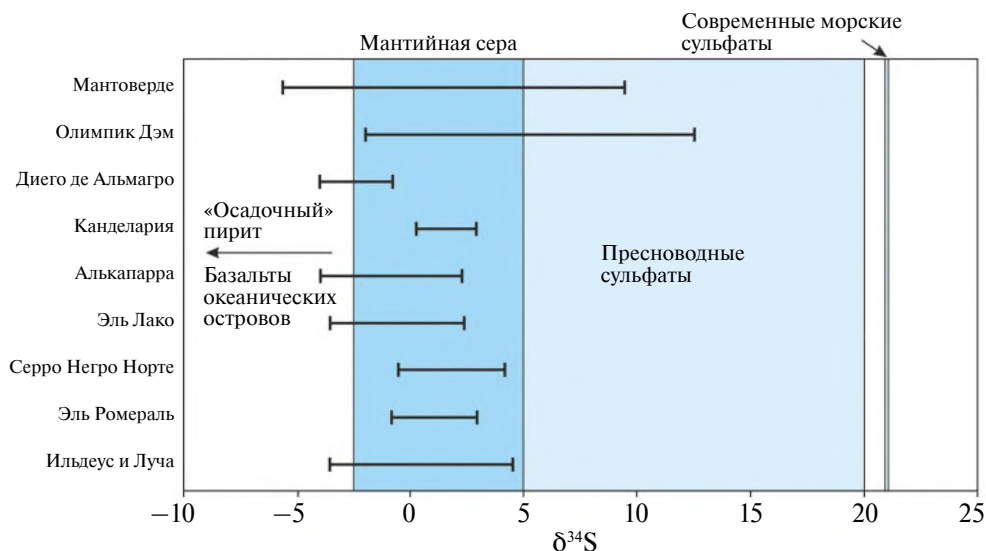


Рис. 10. Вариации изотопов серы в IOCG и IOA месторождениях, в базальтах океанических островов и пирите осадочного происхождения (Hammerli et al., 2021), в пресноводных и современных морских сульфатах (Rojas et al., 2018). Диапазон вариаций $\delta^{34}\text{S}$ в магматических породах («мантийная» сера), вариации $\delta^{34}\text{S}$ в месторождениях Мантоверде, Диего де Альмагро, Канделария, Алькапарра, Эль Лако, IOCG Серро Негро Норте, Эль Ромераль по (Rojas et al., 2018), Олимпик Дэм по (Schlegel et al., 2017), в сульфидных массивах Ильдеус и Луча по (Бучко и др., 2002).

Fig. 10. Variations of sulfur isotopes in IOCG and IOA deposits, oceanic island basalts and sedimentary pyrite (Hammerli et al., 2021), freshwater and modern marine sulfates (Rojas et al., 2018). The range of $\delta^{34}\text{S}$ in magmatic rocks («mantle» sulfur) and variations of $\delta^{34}\text{S}$ in Mantoverde, Diego de Almagro, Candelaria, Alcaparra, El Laco, Cerro Negro Norte and El Romeral IOCG-IOA deposits after (Rojas et al., 2018), Olympic Dam IOCG deposit after (Schlegel et al., 2017), sulfides from the Ildeus and Lucha intrusions after (Buchko et al., 2002).

до -0.8‰ , а в породах массива Ильдеус достигают $+4.7\text{‰}$ (рис. 10; Бучко и др., 2002). Эти данные указывают на преимущественно магматическую природу минерализующих флюидов в глубинных магматогенных системах этих массивов и хорошо согласуются как с данными, приведенными в настоящей работе, так и с ранее опубликованными результатами изучения интрузивов этой крупной геологической структуры (Кепежинскас и др., 2024; Кепежинскас и др., 2025; Berdnikov et al., 2022; Kopezhinskas et al., 2023).

Исследования последних лет выявили несколько отличительных особенностей состава и физико-химических параметров флюидной фазы, участвующей в формировании IOCG и IOA минерализации. Минералы апатит-железорудных месторождений металлогенической провинции Янцзы в КНР содержат многочисленные низководные газово-жидкие синрудные включения, характеризующиеся при пересчете на 100 % твердых веществ высокими содержаниями хлора (20—42 мас.%) и серы (7—18 мас.%), а также повышенным отношением $\text{Cl}/\text{H}_2\text{O}$ (0.35) (Zeng et al., 2024). Среди минералов-узников этих высокотемпературных ($>800\text{ °C}$) кристаллофлюидных включений установлены галит и сильвин, в сумме составляющие от 20 до 60 об.%, а также барит, ангидрит, хлориды железа и магния, флюорит, гематит и пирит (Zeng et al., 2024). Такие же солевые, богатые металлами (Ca, Na, K, Fe, Ti, Mg, Zn, Rb, Sr, Cs, Sr, Pb) микровключения установлены в рудном магнетите, содержащем обильные ламели ильменита, структурно похожие на игольчатые выделения ильменита в позднемагматических амфиболах Лучинского массива (рис. 4, ж). Присутствие

в ассоциациях микровключений Лучинского интрузива хлорарагирита (рис. 6, *е* и 7, *а*) и бисмоклита (рис. 7, *б*, *в*), а в массиве Ильдеус барита (рис. 3 *г*, *д*), хлорида серебра (рис. 2, *е*), а также галита и сильвина (Kepzhinskas et al., 2023) позволяет говорить о том, что ассоциации микровключений ИТОАСС-типа в габброидах и пироксенитах Лучинского и Ильдеусского массивов связаны именно с такими обогащенными металлами, хлором и серой высокотемпературными флюидами высокой солености, сопровождающими становление рудно-магматических IOA-IOCG систем в верхних горизонтах земной коры. Расчеты показывают, что апатит-железородная минерализация и ранние стадии формирования железоокисно-медно-золотых месторождений обычно связана с восстановленными или слабо окисленными силикатными магмами (ΔFMQ от -1.5 до $+1.1$; Ojeda et al., 2024), в то время как поздние этапы эволюции IOCG и связанных с ними медно-золото-порфировых систем характеризуются несколько более окислительными условиями формирования (ΔFMQ до $+2-3$; Richards, Mumin, 2013; Romero et al., 2024). На слабо восстановительные или нейтральные редокс-условия указывает и появление самородного железа в ассоциации с ильменитом и биотитом в габброидах Лучинского массива (рис. 4, *з*). Важно также отметить, что ранние этапы формирования Ильдеусской рудно-магматической системы в земной коре под Становым супертеррейном связаны с существенно восстановительными условиями (Kepzhinskas et al., 2023), что опять же сближает ее с магматическими стадиями эволюции месторождений IOA и IOCG типов.

Вероятно, с зарождением «зачаточной» IOA-IOCG минерализации на субдукционном этапе формирования глубинных магматогенных систем в пределах Становой активной окраины (триас) и дальнейшем ее преобразованием за счет коллизионных (поздняя юра) и постколлизионных (ранний мел) процессов может быть связано локальное проявление редкоземельной минерализации (суммарное содержание РЗЭ до 0.2 мас.%) в массиве Ильдеус (Кепежинскас и др., 2024). Экспериментальные данные свидетельствуют о преимущественном распределении легких редких земель при ликвации в железо-фосфорный расплав, причем коэффициенты распределения для индивидуальных редкоземельных элементов могут превышать 100 (Yan et al., 2024). В ассоциациях редкоземельных минералов в ультрамафитовых метасоматитах массива Ильдеус преобладают обогащенные легкими лантаноидами монацит, алланит, другие силикаты, оксиды и карбонаты РЗЭ, включая бастнезит, что хорошо согласуется с экспериментальными данными.

Нам представляется, что ассоциации рудных микроминералов начинают формироваться на поздних стадиях магматического этапа становления рудно-магматических систем, в их глубинных «магматических корнях», определяя будущую металлогеническую специализацию таких систем. Приведенные выше материалы свидетельствуют о том, что ассоциации микровключений ассоциации ИТОАСС могут служить минералогическими признаками развития железоокисно-медно-золотой и апатит-железородной минерализации в складчатых структурах и аккреционных террейнах на периферии кратонных ядер континентов, металлогеническими критериями на этапе геологического картирования, тематических петролого-геохимических исследований и региональных поисковых работ. Появление актинолита в габброидах может свидетельствовать о достаточной продвинутой стадии процессов IOCG-IOA рудообразования в отдельных магматических комплексах и геологических структурах.

ВЫВОДЫ

1. Мезозойские субдукционные габброиды Ильдеусского и Лучинского массивов в центральной части Станового супертеррейна содержат многочисленные микровключения железо-титановых оксидов (магнетита, титаномагнетита, ильменита,

рутила, гематита), апатита, сульфатов (барит) и сульфидов (пирита, халькопирита, пирротина), выделенные нами в качестве ассоциации ИТОASS, свойственной железоокисно-медно-золотым и апатит-железородным месторождениям.

2. Тектурные признаки свидетельствуют о принадлежности микровключений ассоциации ИТОASS к ранним, собственно магматическим этапам формирования железоокисно-медно-золотых и апатит-железородных систем, которые формируются в относительно восстановительных или слабо окисленных условиях в присутствии богатого металлами флюида с повышенными содержаниями серы и хлора. Появление барита отражает смену редокс-параметров на более окислительные и фиксирует начало гидротермально-метасоматического преобразования магматических минеральных парагенезисов.

3. Присутствие микровключений ИТОASS в магматических породах в аккреционных и коллизионных структурах может свидетельствовать о существовании условий, способных привести к зарождению в них рудно-магматических систем ИОСГ-ЮА типа, и служить основанием для проведения региональных поисковых работ на железо, медь, фосфор и сопутствующие благородные металлы в пределах этих структур.

Благодарность. Мы благодарим рецензентов за конструктивные замечания, существенно улучшившие статью.

Источник финансирования. Работа выполнена в рамках гос. задания ИТиГ ДВО РАН (тема НИР № 124042300007-3 — молодежная лаборатория) с использованием научного оборудования Хабаровского инновационно-аналитического центра.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Балыкин П. А., Поляков Г. В., Богнибов В. И., Петрова Т. Е. Протерозойские ультрабазит-базитовые формации Байкало-Становой области. Наука, Новосибирск, **1986**. 204 с.

Беляев Е. В., Панских Е. А., Файзулин Р. М., Роганов Г. В., Гаврилов В. В. Минерагеническая специализация и перспективная оценка Джугджуро-Становой апатитоносной провинции // Геология и геофизика. **1981**. № 12. С. 55—63.

Бердников Н. В., Кебезинская П. К., Невструев В. Г., Крутикова В. О., Коновалова Н. С. Магматическое самородное золото: состав, формы выделения, генезис и эволюция в земной коре // Геология и геофизика. **2024**. Т. 65. № 3. С. 427—445.

Бучко И. В., Изох А. Э., Носырев М. Ю. Сульфидная минерализация ультрабазит-базитов Станового мегаблока // Тихоокеанская геология. **2002**. Т. 21. № 4. С. 56—68.

Бучко И. В., Сорокин А. А., Изох А. Э., Ларин А. М., Котов А. Б., Сальникова Е. Б., Великославинский С. Д., Сорокин А. П., Яковлева С. З., Плоткина Ю. В. Петрология раннемезозойского ультрамафит-мафитового Лучинского массива (юго-восточное обрамление Сибирского кратона) // Геология и геофизика. **2008**. Т. 49. № 8. С. 754—768.

Бучко И. В., Сорокин А. А., Пономарчук В. А., Котов А. Б., Травин А. В., Ковач В. П. Возраст, геохимические особенности и источники трахиандезитов Моготинского вулканического поля (Становой вулканоплутонический пояс, Восточная Сибирь) // Геология и геофизика. **2016**. Т. 57. № 10. С. 1772—1783.

Глебовицкий В. А., Котов А. Б., Сальникова Е. Б., Ларин А. М., Великославинский С. Д. Гранулитовые комплексы Джугджуро-Становой складчатой области и Пристанового пояса: возраст, условия и геодинамические обстановки проявления метаморфизма // Геотектоника. **2009**. № 4. С. 3—15.

Извекова А. Д., Дамдинов Б. Б., Рампилов М. О. Редкоземельная минерализация в рудах Гурвунурского апатит-магнетитового месторождения (Озернинский рудный узел, Западное Забайкалье) // Руды и металлы. **2024**. № 2. С. 55—68.

Кебезинская П. К., Ханчук А. И., Бердников Н. В., Крутикова В. О. Минералы редкоземельных элементов в ультрабазитах массива Ильдеус (Становой кратонный супертеррейн): влияние

постколлизийных процессов на глубинные рудно-магматические системы конвергентных границ плит // Тихоокеанская геология. **2024**. Т. 43. № 6. С. 3—23.

Кепежинская П. К., Бердников Н. В., Крутикова В. О. Микровключения металлов и минералов в адакитах обрамления Утанакского массива (Становой супертеррейн, Дальний Восток России) как свидетельство металлоносности адакитовых магм // Геология и геофизика. **2025**. № 2. С. 143—159.

Ковалев К. Р., Калинин Ю. А., Туркина О. М., Гимон В. О., Абрамов Б. Н. Култуминское золото-медно-железоскарновое месторождение (Восточное Забайкалье, Россия): петрогеохимические особенности магматизма и процессы рудообразования // Геология и геофизика. **2019**. Т. 60. № 6. С. 749—771.

Копылов М. И. Прогнозно-поисковые признаки и критерии титановых и медно-никелевых месторождений в пределах Дальневосточного габбро-анортозитового пояса // Руды и металлы. **2009**. № 4. С. 45—56.

Костин А. В. Минеральные разновидности Fe-оксидных-Cu руд проявлений Джалкан, Росомаха и Хурат (Сетте-Дабан, Восточная Якутия). // Отечественная геология. **2016**. № 6. С. 11—15.

Крутикова В. О., Бердников Н. В., Кепежинская П. К. Исследование микровключений металлов и минералов в горных породах: проблемы интерпретации результатов и их применение при изучении магматогенных систем Камчатки и Становой складчатой области // Тихоокеанская геология. **2024**. Т. 43. № 1. С. 42—55.

Мигачев И. Ф., Минина О. В., Звездов В. С. Перспективы территории Российской Федерации на медно-порфировые руды // Руды и металлы. **2015**. № 1. С. 74—92.

Неймарк Л. А., Ларин А. М., Овчинникова Г. В., Яковлева С. З. Уран-свинцовый возраст анортозитов Джугджура // Доклады АН. **1992**. Т. 323. № 3. С. 514—518.

Соловьев С. Г. Железоокисдно-золото-медные и родственные месторождения. М.: Научный мир, **2011**. 246 с.

Mineral Indicators of Early Magmatic to Autometasomatic Stages of the Formation of Iron Oxide-Copper-Gold and Iron Oxide-Apatite Mineralization in Gabbroic Rocks from Ildeus and Lucha Intrusions (Stanovoy Superterrane, Russian Far East)

P. K. Kepezhinskas, N. V. Berdnikov*, V. O. Krutikova, N. S. Konovalova, N. V. Kozhemyako

Institute of Tectonics and Geophysics Far East Branch RAS, Khabarovsk, Russia

**e-mail: nberdnikov@yandex.ru*

Mesozoic subduction-related gabbroic and ultramafic rocks from the Ildeus and Lucha intrusions in the central part of the Stanovoy superterrane contain microinclusions of iron-titanium oxides (magnetite, titanomagnetite, ilmenite, rutile, and titanite), apatite, sulfates (barite) and sulfides (pyrite, pyrrhotite, and chalcopyrite). Earlier, we attributed these minerals to the indicator ITOASS (Iron-Titanium Oxide–Apatite–Sulfate–Sulfide) assemblage for the Iron Oxide-Copper-Gold (IOCG) and Iron Oxide-Apatite (IOA) mineralization. The ITOASS assemblage is associated with hematite, silver chlorides, and native gold. Host minerals for ITOASS microinclusions are mostly plagioclase, pyroxenes, and high-Al amphibole, suggesting the late-stage magmatic origin of them. Late-stage magmatic amphiboles carry textural and compositional evidence for early stages of metasomatic alteration of minerals of ITOASS assemblage, that possibly indicate hydrothermal-metasomatic (autometasomatic) stage of the evolution of IOCG-IOA-type ore systems. We conclude that microinclusions of the ITOASS assemblages can be used for regional prospecting of iron oxide copper-gold and iron-oxide mineralization in accretionary-collisional structures of the Russian Far East.

Keywords: Stanovoy superterrane, Ildeus and Lucha intrusions, mesozoic gabbro and ultramafics, microinclusions, ITOASS, iron oxide copper-gold and iron oxide-apatite mineralization

REFERENCES

- Balykin P. A., Polyakov G. V., Bognibov V. I., Petrova T. E. Proterozoic basic-ultrabasic formations of the Baikal-Stanovoy region. Nauka: Novosibirsk, **1986**. 204 p. (in Russian).
- Barton M. D. Iron oxide (Cu-Au-REE-P-Ag-U-Co) systems. Treatise in Geochemistry. **2014**. Vol. 13. P. 515–541.
- Belyaev E. V., Panskikh E. A., Fayzullin R. M., Roganov G. V., Gavrilov V. V. Mineragenic specialization and perspective assessment of the Dzhugdzhuho-Stanovoi apatite-bearing province. *Russian Geol. Geophys.* **1981**. N 12. P. 55–63 (in Russian).
- Berdnikov N. V., Kepezhinskas P. K., Nevstruyev V. G., Krutikova V. O., Konovalova N. S. Magmatic native gold: composition, texture, genesis, and evolution in the Earth's crust. *Russian Geol. Geophys.* **2024**. Vol. 65. N 3. P. 388–403.
- Berdnikov N., Kepezhinskas P., Konovalova N., Kepezhinskas N. Formation of gold alloys during crustal differentiation of convergent zone magmas: constraints from an Au-rich websterite in the Stanovoy Suture Zone (Russian Far East). *Geosciences*. **2022**. Vol. 12. Paper 126.
- Berdnikov N., Nevstruyev V., Kepezhinskas P., Astapov I., Konovalova N. Gold in mineralized volcanic systems from the Lesser Khingan Range (Russian Far East): textural types, composition and possible origins. *Geosciences*. **2021**. Vol. 11. Paper 103.
- Buchko I. V., Izokh A. E., Nosyrev M. Yu. Sulfide mineralization of ultrabasic-basites of the Stanovoi megablock. *Russian J. Pacific Geol.* **2002**. Vol. 21. N 4. P. 56–68 (in Russian).
- Buchko I. V., Sorokin A. A., Ponomarchuk V. A., Kotov A. B., Travin A. V., Kovach V. P. Trachyandesites of the Mogot volcanic field (Stanovoi volcanoplutonic belt, East Siberia): age, geochemical features and sources. *Russian Geol. Geophys.* **2016**. Vol. 57. N 10. P. 1772–1783 (in Russian).
- Chiaradia M., Banks D., Cliff R., Marschik R., de Haller A. Origin of fluids in iron oxide-copper-gold deposits: constraints from $\delta^{37}\text{Cl}$, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ and Cl/Br. *Miner. Deposita*. **2006**. Vol. 41. P. 565–573.
- Del Real I., Reich M., Simon A. C., Deditius A., Barra F., Rodriguez-Mustafa M. A., Thompson J. F. H., Roberts M. P. Formation of giant iron oxide-copper-gold deposits by superimposed episodic hydrothermal pulses. *Sci. Reports*. **2023**. Vol. 13. 12041.
- Glebovitsky V. A., Kotov A. B., Salnikova E. B., Larin A. M., Velikoslavinsky S. D. Granulite complexes of the Dzhugdzhu-Stanovoy folded region and the Permian belt: age, conditions and geodynamic settings of metamorphism manifestation. *Geotektonika*. **2009**. N 4. P. 3–15 (in Russian).
- Hammerli J., Greber N. D., Martin L., Bouvier A. -S., Kemp A. I. S., Fiorentini M. L., Spandenberg J. E., Ueno Y., Schaltegger U. Tracing sulfur sources in the crust via SIMS measurements of sulfur isotopes in apatite. *Chem. Geol.* **2021**. Vol. 579. 12024.
- Izykova A. D., Damdinov B. B., Rampilov M. O. Rare earth mineralization in the ores of the Gurgunur apatite-magnetite deposit (Ozerninsky ore district, Western Transbaikalia). *Ores and Metals*. **2024**. N 2. P. 55–68 (in Russian).
- Kepezhinskas P. K., Berdnikov N. V., Krutikova V. O. Metal and mineral microinclusions in adakites from the framing of the Utanak massif (Stanovoi superterrane, Russian Far East) as evidence for metal enrichment in adakitic magmas. *Russian Geol. Geophys.* **2025**. N 2. P. 143152.
- Kepezhinskas P. K., Khanchuk A. I., Berdnikov N. V., Krutikova V. O. Minerals of rare earth elements in ultrabasites of the Ildeus massif (Stanovoy cratonic superterrane): the influence of post-collision processes on deep ore-magmatic systems of convergent plate boundaries. *Russian J. Pacific Geol.* **2024**. Vol. 43. N 6. P. 3–23.
- Kepezhinskas P., Berdnikov N., Kepezhinskas N., Krutikova V., Astapov I. Magmatic-hydrothermal transport of metals at arc plutonic roots: insights from the Ildeus mafic-ultramafic complex, Stanovoy Suture Zone (Russian Far East). *Minerals*. **2023**. Vol. 13. Paper 878.
- Kepezhinskas P., Berdnikov N., Krutikova V., Kozhemyako N. Iron-titanium oxide-apatite-sulfide-sulfate microinclusions in gabbro and adakite from the Russian Far East indicate possible magmatic links to iron oxide-apatite and iron oxide-copper-gold deposits. *Minerals*. **2024**. Vol. 14. P. 188.
- Kopylov M. I. Predictive prospecting features and criteria of titanium and copper-nickel deposits in the Far Eastern gabbro-anorthosite belt. *Ore and Metals*. **2009**. N 4. P. 45–56 (in Russian).
- Kostin A. V. Mineral varieties of Fe-oxide-Cu ores of the Jalkan, Rosomaha and Hurat outcrops (Sette-Daban, Eastern Yakutia). *Native Geol.* **2016**. N 6. P. 11–15 (in Russian).

Kovalev K. R., Kalinin Yu. A., Turkina O. M., Gimon V. O., Abramov B. N. Kultuminskoye gold-copper-iron skarnovo deposit (Eastern Transbaikalia, Russia): petrogeochemical features of magmatism and ore formation processes. *Russian Geol. Geophys.* **2019**. Vol. 60. N 6. P. 749–771.

Krutikova V. O., Berdnikov N. V., Kepezhinskas P. K. Metal and mineral microinclusions in rocks: Research finding interpretation and application to the study of magmatic systems of Kamchatka and Stanovoi Fold Belt. *Russian J. Pacific Geol.* **2024**. Vol. 18. N 1. P. 37–49.

Li R., Chen H., Wu N., Wang X., Xia X. Multiple sulfur isotopes in post-Archean deposits as a potential tracer for fluid mixing processes: an example from an iron oxide-copper-gold (IOCG) deposit in southern Peru. *Chem. Geol.* **2021**. Vol. 575. P. 120230.

Lledo H. L., Jenkins D. M. Experimental investigation of the upper thermal stability of Mg-rich actinolite; Implications for Kiruna-type iron deposits. *J. Petrol.* **2008**. Vol. 49. P. 225–238.

Mateo L., Tornos F., Hanchar J. M., Villa I. M., Stein H. J., Delgado A. The Montecristo mining district, northern Chile: the relationships between vein-like magnetite-apatite and iron oxide-copper-gold deposits. *Miner. Deposita.* **2023**. Vol. 58. P. 1023–1045.

McDonough W. F., Sun S. S. The composition of the Earth. *Chem. Geol.* **1995**. Vol. 120. P. 223–253.

Migachev I. F., Minina O. V., Zvezdov V. S. Prospects of the territory of the Russian Federation for porphyry copper ores. *Ore and Metals.* **2015**. N 1. P. 74–92 (in Russian).

Neymark L. A., Larin A. M., Ovchinnikova G. V., Yakovleva S. Z. Uranium-lead age of Dzhugdzhur anorthosites. *Doklady Earth Sci.* **1992**. Vol. 323. N 3. P. 514–518 (in Russian).

Ojeda A., Barra F., Reich M., Romero R., Tapia M. J. Evolution and fertility of magmas associated with iron oxide-apatite (IOA) deposits, Coastal Cordillera, Northern Chile: a zircon petrochronology perspective. *Gondwana Research.* **2024**. Vol. 131. P. 38–56.

Reich M., Simon A. C., Barra F., Palma G., Hou T., Bilenker L. Formation of iron oxide-apatite deposits. *Nature Reviews Earth & Environment.* **2022**. Vol. 3. P. 758–775.

Richards J. P., Mumin A. H. Magmatic-hydrothermal processes within an evolving Earth: iron oxide-copper-gold and porphyry Cu±Mo±Au deposits. *Geology.* **2013**. Vol. 41. P. 767–770.

Rojas P. A., Barra F., Reich M., Deditius A., Simon A., Uribe F., Romero R., Rojo M. A genetic link between magnetite mineralization and diorite intrusion at the El Romeral iron oxide-apatite deposit, northern Chile. *Miner. Deposita.* **2018**. Vol. 53. P. 947–966.

Romero R., Barra F., Reich M., Ojeda A., Tapia M. J., del Real I., Simon A. Contrasting magma chemistry in the Candelaria IOCG district caused by changing tectonic regimes. *Sci. Reports.* **2024**. Vol. 14. P. 10793.

Schlegel T. U., Wagner T., Boyce A., Heinrich C. A. A magmatic source of hydrothermal sulfur for the Prominent Hill deposit and associated prospects in the Olympic Dam iron oxide copper-gold (IOCG) province of South Australia. *Ore Geol. Reviews.* **2017**. Vol. 89. P. 1058–1090.

Skirrow R. G. Iron oxide copper-gold (IOCG) deposits — a review (part 1): settings, mineralogy, ore geochemistry and classification. *Ore Geol. Review.* **2022**. Vol. 140. P. 1–36.

Solovyov S. G. Iron oxide-gold-copper and related deposits. Moscow: Nauchny Mir, **2011**. 246 p. (in Russian).

Velasco F., Tornos F., Hanchar J. M. Immiscible iron- and silica-rich melts and magnetite geochemistry at the El Laco volcano (northern Chile): evidence for a magmatic origin for the magnetite deposits. *Ore Geol. Reviews.* **2016**. Vol. 79. P. 346–366.

Warr L. N. IMA–CNMNC approved mineral symbols. *Miner. Mag.* **2021**. Vol. 85. P. 291–320.

Williams P. J., Barton M. D., Johnson D. A., Fontboté L., de Heller A., Mark G., Oliver N. H. S., Marschik R. Iron oxide copper-gold deposits: geology, space-time distributions, and possible modes of origin. *Econ. Geol.* **2005**. Vol. 100. P. 371–405.

Yan S. C., Wan B., Anenburg M., Mavrogenes J. A. Silicate and iron phosphate melt immiscibility promotes REE enrichment. *Geochem. Perspect. Lett.* **2024**. Vol. 32. P. 14–20.

Zeng L.-P., Zhao X.-F., Spandler C., Mavrogenes J. A., Mernagh T. P., Liao W., Fan Y.-Zh., Hu Y., Fu B., Li J.-W. The role of iron-rich hydrosaline liquids in the formation of Kiruna-type iron oxide-apatite deposits. *Sci. Advances.* **2024**. V. 10. N 17.

Zhu Zh. Gold in iron oxide copper-gold deposits. *Ore Geol. Reviews.* **2016**. Vol. 72. P. 37–42.