

На правах рукописи



Коновалова Наталья Сергеевна

**МИКРОСФЕРУЛЫ В ПОРОДАХ И РУДАХ
ПОПЕРЕЧНОГО, КОСТЕНЬГИНСКОГО И КАЙЛАНСКОГО
ЖЕЛЕЗОРУДНЫХ (С МАРГАНЦЕМ) МЕСТОРОЖДЕНИЙ
МАЛОХИНГАНСКОГО РУДНОГО РАЙОНА**

Специальность

1.6.3. – Петрология, вулканология

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата геолого-минералогических наук

Хабаровск – 2026

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте тектоники и геофизики им. Ю.А. Косыгина Дальневосточного отделения Российской академии наук (ИТиГ ДВО РАН)

Научный руководитель: **Бердников Николай Викторович**
кандидат геолого-минералогических наук,
ведущий научный сотрудник лаборатории
физико-химических методов исследования
ИТиГ ДВО РАН, г. Хабаровск

Официальные оппоненты: **Мочалов Александр Геннадьевич**
доктор геолого-минералогических наук,
ведущий научный сотрудник лаборатории
металлогении и рудогенеза ФГБУН Института
геологии и геохронологии докембрия РАН
(ИГГД РАН), г. Санкт-Петербург

Рычагов Сергей Николаевич
доктор геолого-минералогических наук,
зав. лабораторией геотермии ФГБУН Института
вулканологии и сейсмологии ДВО РАН
(ИВиС ДВО РАН), г. Петропавловск-Камчатский

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки Дальневосточный геологический
институт Дальневосточного отделения Российской
академии наук (ДВГИ ДВО РАН), г. Владивосток

Защита состоится «20» октября 2026 г. в 14-00 часов на заседании диссертационного совета 24.1.062.02 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте земной коры Сибирского отделения Российской академии наук (ИЗК СО РАН) по адресу: 664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, д. 128.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИЗК СО РАН и на сайте: https://www.crust.irk.ru/newsfull_257.html.

Автореферат разослан «___» _____ 2026 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета 24.1.062.02,
кандидат геолого-минералогических наук



Б.С. Данилов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Образования сферической формы размером менее 1 мкм (микросферы), сложенные самородными металлами и их сплавами, силикатно-оксидными минеральными и аморфными фазами, встречаются в породах разного состава и возраста в широком спектре геологических обстановок [Баженев и др., 1991; Лукин, 2013; Маршинцев и др., 2018; Новгородова и др., 2003; Рычагов и др., 1996; Савва и др., 2014; Сандиминова, 2008; Филимонова и др., 1989; Шафрановский, Зинченко, 2010; Силаев и др., 2019; Andronikov et al., 2016; Carracedo-Sánchez et al., 2015; Grebennikov, 2011; Lefe'vre et al., 1986; Meeker, Hinkley, 1993; Nyström et al., 2016; Orberger et al., 2012; Wang, Chatterton, 1993; Zhang et al., 2014]. Они трактуются как космические, техногенные, взрыво-атмоэлектрогенные или эндогенные образования.

Железо-марганцевые и железорудные с марганцем месторождения, содержащие существенную часть ресурсов этих важных для промышленности металлов, являются продуктом различных геологических процессов [Волков и др., 2014; Павлов, 1983; Соколова, 1982; Школьник и др., 2021; Barton, Johnson, 1996; Breitkopf, 1988; Dare et al., 2015; Frutos, Oyarzun, 1975; Keller et al., 2022; Longman et al., 2022; Nyström, Henriquez, 1994; Ovalle et al., 2018; Polgári, Gyollai, 2022; Roy, 1988; Sillitoe, 2003; Simon et al., 2018; Tornos et al., 2017, 2021; Velasco et al., 2016; Williams et al., 2005; Zantop, 1981, и др.]. Многие из них связаны с взрывным вулканизмом или содержат вулканические компоненты, подтверждая связь между активным вулканизмом, гидротермальной активностью и железо-марганцевой минерализацией в древних и современных зонах субдукции [Glasby, 1988; Mosier, Page, 1988; Roy, 1997; Thonis, Burns, 1975]. Железорудные (в ряде случаев с марганцем, далее Fe-Mn) месторождения Малохинганского рудного района (ЕАО, Дальний Восток России) со времени их открытия считались осадочными (вулканогенно-осадочными) [Кулиш, 1974]. Исследование руд, взрывных брекчий, пирокластики и измененных вмещающих пород на месторождениях Поперечное, Костеньгинское и Кайланское этого района выявило присутствие в них микросферул сплава Cu-Ag-Au, силикатного, железо-оксидного и смешанного составов [Бердников и др., 2021; Berdnikov et al., 2021; Бердников и др., 2026; Коновалова и др., 2026], что свидетельствует об участии магматических процессов в формировании этих месторождений. Показано, что магматическая деятельность на месторождениях проходила на фоне интенсивной гидротермальной проработки, которая ответственна за формирование основного объема Fe-Mn минерализации [Бердников и др., 2016], в то время как источником сопутствующей благороднометалльной минерализации были магматические породы [Berdnikov et al., 2021].

Актуальность проведенных исследований обусловлена перспективностью изучения микросферул для получения новых знаний о процессах, приводящих к образованию обособленных фаз в магматических расплавах и об условиях формирования связанного с магматическими комплексами оруденения, в том числе в сложных геологических объектах с комплексной минерализацией.

Цель и задачи работы: изучение морфологии, состава, внутренней структуры и условий образования микросферул в породах и рудах месторождений Поперечное,

Костеньгинское и Кайланское Малохинганского рудного района; с помощью полученных данных уточнение механизма формирования этих месторождений. Для достижения цели изучена морфология, химический и фазовый составы микросферул в породах и рудах изученных месторождений, определены физико-химические условия формирования микросферул различного типа.

Научная новизна. Впервые исследованы морфология, внутренняя структура и состав микросферул в породах и рудах Поперечного, Костеньгинского и Кайланского месторождений Малохинганского рудного района. Проведен анализ условий образования микросферул, предложен механизм формирования Fe-Mn минерализации месторождений Малохинганского рудного района с участием флюидно-эксплозивных процессов.

Практическая значимость. Полученные в процессе исследования новые данные о микросферулах в породах и рудах Поперечного, Костеньгинского и Кайланского Fe-Mn месторождений Малохинганского рудного района могут быть использованы для построения модели их образования, дооценки их ресурсного потенциала, а также при разработке новых критериев для прогноза и поисков подобных объектов как на территории Дальнего Востока России, так и в других регионах.

Положения, выносимые на защиту:

1. Силикатные микросферулы, выделенные из пород и руд изученных месторождений, состоят из высокожелезистого силикатного расплава и образовались в процессе эксплозивной деятельности.

2. Образование железо-оксидных микросферул, выделенных из пород и руд изученных месторождений, связано с быстрой кристаллизацией в высокожелезистых расплавах или в эруптивном газо-пепловом облаке в процессе эксплозий.

3. Микросферулы состава $Cu_{-30}Ag_{-10}Au_{-60}$, выделенные из пород и руд изученных месторождений, образовались в глубинных высокотемпературных восстановленных расплавах, транспортировались ими к поверхности, и отличаются от техногенных аналогов рельефом поверхности, отсутствием признаков распада твердых растворов и характером медно-оксидных микровключений.

4. Микросферулы смешанного состава образовались при диспергировании и частичном плавлении вмещающих изученные месторождения доломитов под воздействием высокоомобильного высокотемпературного минерализованного флюида.

Исследование осуществлено в рамках Госзадания ИТиГ ДВО РАН при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект 22-17-00023) с использованием научного оборудования Хабаровского инновационно-аналитического центра ИТиГ ДВО РАН.

Апробация работы. Основные результаты диссертации были представлены на: VI Всероссийской научной конференции с международным участием «Геологические процессы в обстановках субдукции, коллизии и скольжения литосферных плит» (ДВГИ ДВО РАН, г. Владивосток, 19-22 сентября 2023 г.); XXVII Всероссийской научной конференции, посвященной Дню вулканолога «Вулканизм и связанные с ним процессы» (ИВиС ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский, 27-29 марта 2024 г.); XII Всероссийской научной конференции с международным участием «Косыгинские чте-

ния: Тектоника, глубинное строение и минерагения Востока Азии» (ИТиГ ДВО РАН, г. Хабаровск, 10-13 сентября 2024 г.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 15 научных работ, в том числе: 9 статей в журналах, индексируемых в реферативно-библиографических базах Scopus и Web of Science, из них 9 в рекомендованных Перечнем ВАК при Минобрнауки РФ; 6 тезисов докладов в материалах всероссийских и международных конференций.

Структура и объем работы. Диссертационная работа изложена на 125 страницах и состоит из введения, 5 глав, заключения, списка литературы и списка публикаций автора по теме исследования. Работа иллюстрирована 4 таблицами и 24 рисунками, список литературы содержит 395 наименований.

Личный вклад автора. Автор принимал личное участие в составлении коллекций, подготовке образцов для исследования и в получении экспериментального материала с использованием сканирующей электронной микроскопии с энергодисперсионным рентгеновским микроанализом, в обобщении и анализе полученных результатов, в подготовке публикаций, в работе конференций по проблематике исследования. Доля личного участия в совместных работах пропорциональна числу соавторов.

Благодарности. Автор выражает глубокую признательность и благодарность научному руководителю к.г.-м.н. Н.В. Бердникову за постоянное внимание, активную поддержку, консультации и помощь в работе; своим учителям и коллегам к.г.-м.н. В.Г. Невструеву, П.К. Кепежинскому, А.В. Абражевич, В.Е. Кириллову за конструктивные замечания, советы и предоставление образцов для исследования; коллегам из Дальневосточного фонда геологической информации (г. Хабаровск) за представительную коллекцию образцов пород и руд Костеньгинского и Кайланского месторождения. Отдельная благодарность сотрудникам лаборатории физико-химических методов исследования ИТиГ ДВО РАН за доброжелательность и помощь в работе.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Глава 1. ТЕРМИНОЛОГИЯ, КЛАССИФИКАЦИЯ, ИСТОРИЯ ИЗУЧЕНИЯ И ПРЕДСТАВЛЕНИЯ О ГЕНЕЗИСЕ МИКРОСФЕРУЛ

Приводится краткая история исследования сферических частиц, особенности терминологии и классификации микросферул, а также современное состояние проблемы. Проведен обзор литературных данных по изучению микросферул в горных породах, их структуры, химического и минерального состава, а также условий их образования.

Глава 2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

2.1 Материалы для исследования и методы подготовки образцов. В качестве объектов исследования использованы образцы пород и руд Поперечного, Костеньгинского и Кайланского Fe-Mn месторождений Малохинганского рудного района. Для определения их петрографических особенностей изготавливались прозрачные шлифы, для измерения концентраций петрогенных, редких, рассеянных, редкоземельных элементов и благородных металлов породы истирались до 200 меш.

Для выделения микросферул образцы пород дробились до -0.25 мм с последующим отмыванием в воде. Из полученного шлиха вручную под стереомикроскопом

отбирались микросферулы, в ряде случаев микросферулы удавалось наблюдать на срезах и в сколах пород.

Исследования внешней морфологии микросферул проводились после их наклеивания на токопроводящий скотч столика сканирующего электронного микроскопа, изучение состава и внутренней структуры – в приполированных срезах после фиксации в эпоксидной смоле. Подготовленные таким образом препараты напылялись платиной.

2.2 Методы исследования и аппаратура. Основной объем аналитических исследований выполнен в Хабаровском инновационно-аналитическом центре ИТиГ ДВО РАН. Петрографические исследования пород и руд осуществлялись под микроскопом Axio Imager A2m, поиск и отбор микросферул – с помощью стереомикроскопа Discovery V.12 (Carl Zeiss, Германия).

Концентрации петрогенных оксидов в рудах и породах измерены с помощью рентгенофлуоресцентного спектрометра S4 Pioneer (Bruker, Германия; аналитик Л.М. Ильин). В матриксе брекчий концентрации петрогенных оксидов измерены методом рентгеновского энергодисперсионного микроанализа (СЭМ-ЭДС) путем сканирования площадок на срезах пород между обломками. Правомерность такого подхода доказана специальными исследованиями [Татаринов, 2021] и подтверждена экспериментально на материале брекчий месторождения Поперечное [Бердников и др., 2017].

Содержания редких, рассеянных, редкоземельных элементов и благородных металлов получены методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой на приборе ELAN 9000 (Perkin Elmer, Канада; аналитик А.В. Штарева). При подготовке растворов для анализа применялось кислотное разложение, для определения содержания золота – по методике соосаждения с теллуrom [Jin, Zhu, 2000].

Основным методом исследования морфологии и состава микросферул являлась сканирующая электронная микроскопия (микроскоп VEGA 3 LMH, TESCAN, Чехия) с энергодисперсионным спектрометром X-Max 80 (Oxford, Великобритания). Изучение и фотографирование проводилось преимущественно в режиме обратно-рассеянных электронов (BSE-детектор) при ускоряющем напряжении 20 кВ, токе пучка 500–700 пА, диаметре пучка 100–130 нм, живом времени набора спектров 20 с. Погрешность определения основных компонентов состава микросферул при данных условиях анализа не превышала 0.1 % по массе, что достаточно для целей нашего исследования.

Глава 3. ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Геологическое положение, петрология и химический состав пород и руд Поперечного, Костеньгинского и Кайланского месторождений Малохинганского рудного района

3.1 Геологическое положение. Поперечное, Костеньгинское и Кайланское Fe-Mn месторождения локализованы в пределах Буреинского массива, который входит в состав сложного Цзямусы-Буреинско-Ханкайского супертеррейна, расположенного на юго-восточном окончании Центрально-Азиатского орогенного пояса [Парфенов и др.,

2003] (рис. 1, А). Здесь выделены Восточная, Кимкано-Костеньгинская и Южно-Хинганская рудоносные зоны (рис. 1, Б) с многочисленными месторождениями и проявлениями железных и железо-марганцевых руд [Кулиш и др., 1981].

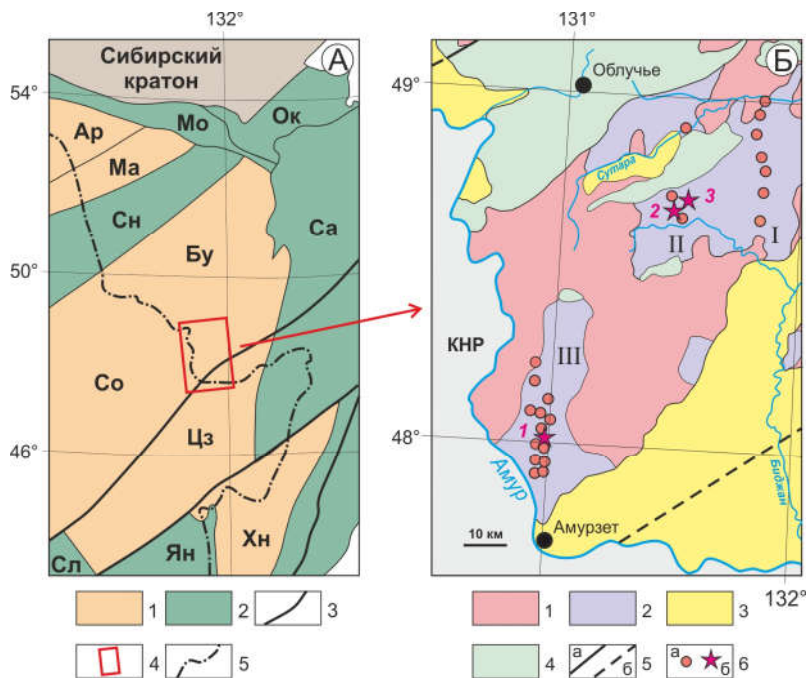


Рис.1. А – район расположения изученных месторождений на тектонической схеме континентальной части Восточной Азии (по [Ханчук и др., 2022] с изменениями): 1 – блоки (массивы) с докембрийским-кембрийским фундаментом (Ар – Аргунский, Ма – Мамынский, Бу – Буреинский, Со – Сонген, Цз – Цзямусы, Хн – Ханкайский); 2 – фанерозойские орогенные пояса (Са – Сихотэ-Алинский, Ок – Охотско-Корякский, Мо – Монголо-Охотский, Сн – Сонгнен, Сл – Солонкер, Ян – Янбиань); 3 – разломы; 4 – район работ; 5 – государственная граница с КНР. Б – геологическая карта (по [Невструев и др., 2019] с изменениями) восточной части Буреинского массива с Fe-Mn объектами: 1 – кристаллический фундамент; 2 – фрагменты Кимканского (V-Є) прогиба; 3 – кайнозойские континентальные впадины; 4 – вулканические прогибы мезозойские и мезозой-кайнозойские; 5 – разломы: а – зафиксированные, б – предполагаемые; 6 – Fe-Mn месторождения и проявления (а), звездочки (б) – месторождение Поперечное (1), Костеньгинское (2) и Кайланское (3). I – Восточная, II – Кимкано-Костеньгинская, III – Южно-Хинганская рудоносные зоны.

На рис. 2 на примере Поперечного показано типичное строение этих месторождений, которое характеризуется полосовым расположением рудных тел, тесно ассоциирующих с флюидно-эксплозивными брекчиями, в составе которых присутствуют обломки вмещающих пород и руд.

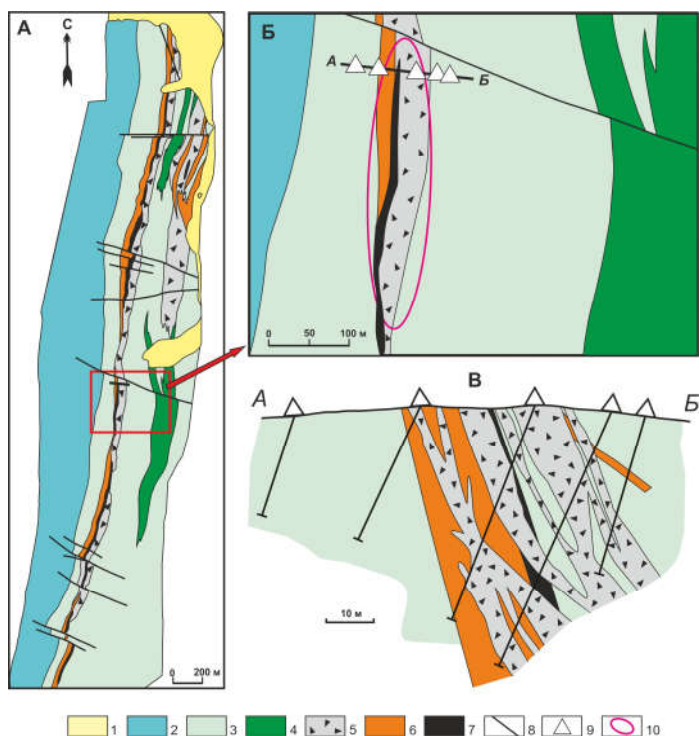


Рис. 2. Схематическая геологическая карта (А) месторождения Поперечное, район отбора образцов (Б) и схематический разрез (В) по линии А-Б по [Невструев и др., 2019] с изменениями и использованием материалов М.В. Чеботарева, 1955 г. 1 – аллювиально-делювиальные отложения; 2 – лондоковская свита: черные кристаллические известняки с пачками глинистых сланцев; 3 – мурандавская свита: черные пелитоморфные известняки, известковистые, кремнистые и глинистые доломиты, доломитовые песчаники, углисто-глинистые сланцы; 4 – базальтоиды; 5 – флюидно-эксплозивные брекчии; 6 – железные руды; 7 – марганцевые руды; 8 – разломы; 9 – скважины; 10 – область отбора проб.

3.2 Петрология и геохимия пород и руд изученных месторождений

Руды. На месторождении *Поперечное* железные руды (Fe_2O_3 от 12.5 до 39.9 %, рис. 3, А) массивной текстуры сложены гематитовыми, гематит-магнетитовыми и магнетитовыми кварцитами [Бердников и др., 2016; 2017]. Железо-марганцевая и марганцевая минерализации образуют тонкие пласты браунитовых, гаусманит-браунитовых, браунит-гематитовых, гаусманит-родохрозитовых и кремнисто-родохрозитовых руд с содержанием 5.0–21.5 % Fe_2O_3 и 5.3–25.7 % MnO (рис. 3, Б, В). В зоне окисления встречаются пирролюзит-псиломелановые разновидности.



Рис. 3. Основные разновидности руд месторождения Поперечное [по Berdnikov et al., 2023]: А – массивная гематитовая; Б – железо-марганцевая; В – марганцевая. Линейка 2 см.

К рудам месторождения можно отнести также «магнетитовые лавы», формирующие редкие маломощные (до 10–15 см) прослои в рудных телах. В них фенокристы и микрофенокристы магнетита равномерно распределены в измененной амфибол-биотит-кварцевой основной массе [Berdnikov et al., 2023].

Руды *Костеньгинского* месторождения состоят в основном из кварца, магнетита, серицита и имеют полосчатую текстуру, подчеркнутую удлиненными полостями, лентичулярными выделениями кварца и ориентированными агрегатами, сложными серицитом и гидроксидами железа [Бердников и др., 2021]. Реже встречаются хлорит, биотит, ортоклаз, роговая обманка, апатит, гематит, пиролюзит, браунит и монацит.

Руды *Кайланского* месторождения тонкозернистые, рудные слои толщиной от 0.3 до 10 мм чередуются с нерудными. Часто встречаются оруденелые туфы. Рудные минералы – гематит, магнетит и лимонит; нерудные представлены кварцем, карбонатами, сфеном и хлоритом.

Руды всех месторождений часто обнаруживают брекчиевую текстуру с обломками доломитов, брекчий и руд ранних генераций.

Вмещающими породами для всех изученных месторождений являются доломиты и известняки мурандавской и кайланской свит (рифей-венд по [Смирнова и др., 2016]. Нами детально изучены доломиты мурандавской свиты, в различной степени измененные вблизи проявлений Fe-Mn минерализации в ассоциации с explosивными брекчиями на месторождении Поперечное. Слабо измененные доломиты массивные, сложены мелкозернистым доломитом с обильными включениями углеродистых частиц (рис. 4, А, Г). В мраморизованных доломитах зерна доломита укрупнены (рис. 4, Б), в промежутках между ними диагностирован тонкозернистый мусковит-гематит-кварцевый агрегат (рис. 4, Д). Интенсивно измененные доломиты обнаруживают полосчатую структуру с замещением перекристаллизованного доломита кварц-доломитовым агрегатом (рис. 4, В, Е).

В слабо измененном доломите с углеродистыми частичками часто ассоциируют микросростки сульфидов меди, цинка и серебра, нередки включения фторapatита. В перекристаллизованном доломите спектр минералов существенно расширен за счет минералов, характерных для скарированных пород. Это ортопироксен, низкокальциевый амфибол, биотит, хлорит, рутил, пирротин, самородное железо, магнетит, ильменит и титаномагнетит.

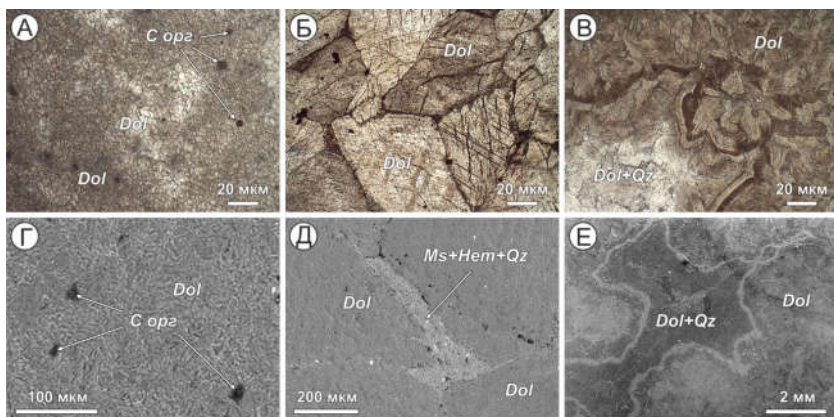


Рис. 4. Микрофотографии шлифов (А-В) и BSE-изображения (Г-Е) слабо измененных (А, Г), мраморизованных (Б, Д) и перекристаллизованных (В, Е) доломитов мурандавской свиты [по Бердников и др., 2026]. *C орг* – углеродистые микровключения, *Dol* – доломит, *Hem* – гематит, *Ms* – мусковит, *Qz* – кварц.

Флюидно-эксплозивные брекчии и минерализованные туфы. Опираясь на результаты исследований предшественников [Sillitoe, 1985; Соколова и др., 2023], ассоциирующие с рудами брекчии мы классифицируем как флюидно-эксплозивные, в которых присутствуют как компоненты магматического расплава, так и фрагменты, образовавшиеся при активном воздействии флюида. Наиболее детально такие брекчии изучены на месторождениях Поперечное (рис. 5) и Костеньгинское. Матрикс брекчий имеет флюидальную игнимбритовую текстуру с фенокристами кварца, карбонатизированного полевого шпата, иногда с характерными структурами типа фьямме, в ряде случаев его можно классифицировать как доломитизированный и пропильтизированный андезито-дацитовый игнимбрит. Для материала матрикса характерны интенсивно измененные фрагменты вулканического стекла, в его составе диагностированы серицит, хлорит, неравномерно распределенные оксиды и гидроксиды железа, кварц-хлоритовые и карбонатные жилки, местами наблюдается интенсивная карбонатация, пиритизация и окремнение [Berdnikov et al., 2023]. В матрикс погружены обломки вмещающих доломитов, кварцитов, Fe-Mn руд и более ранних генераций брекчий (рис. 5, А, Б).

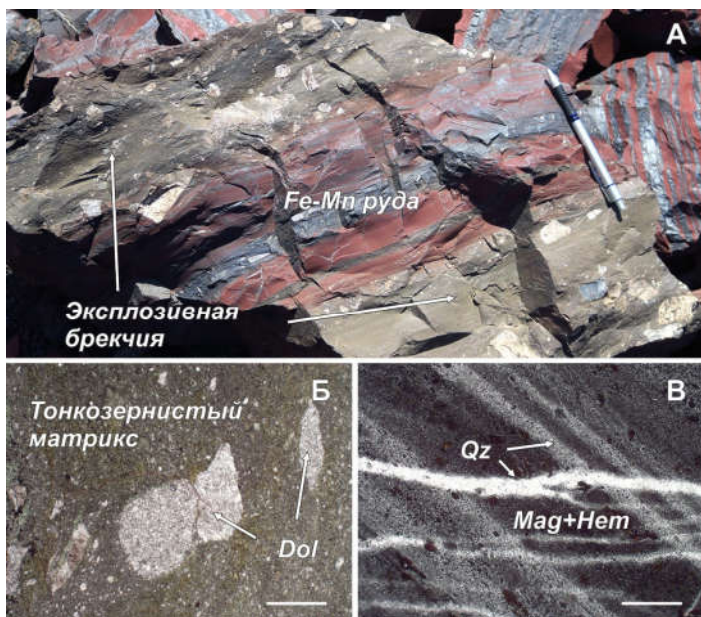


Рис. 5. Эксплозивная брекчия, ассоциирующая с Fe-Mn рудой на месторождении Поперечное [по Berdnikov et al., 2021]: А – переслаивание руды с брекчией; Б, В – фото шлифов брекчии (Б) и гидротермальной руды (В), никели параллельны, линейка 40 мкм. Dol – доломит, Qz – кварц, Mag – магнетит, Hem – гематит.

Брекчии обнаруживают явно дискордантные взаимоотношения с вмещающими доломитами (рис. 2, В), указывая на инъекции горячей флюидизированной магмы в карбонатную матрицу [Berdnikov et al., 2023]. С Fe-Mn рудами они часто образуют переслаивания с размытыми границами, формируя псевдослоистые структуры (рис. 5, А). В то же время во многих случаях эксплозивные брекчии имеют дискордантные взаимоотношения с рудами.

Изотопные (^{190}Pt - ^4He метод) определения возраста зерен платины из флюидно-эксплозивных брекчий месторождения Поперечное показывают значения 125 ± 21 млн лет [Ханчук и др., 2020], что значительно моложе возраста вмещающих карбонатов (рифей-венд) и синхронно возрасту мезозойского вулканизма в регионе [Li et al., 2021].

Минерализованные туфы (рис. 6, А) содержат удлиненные обломки пород и минералов (кварц, доломит, гематит, магнетит, частично замещенные хлоритом деформированные чешуйки биотита), заключенные в тонкозернистую игнимбритоподобную массу, состоящую из магнетита, хлорита, биотита, полевых шпатов и кварца (рис. 6, Б-Г).

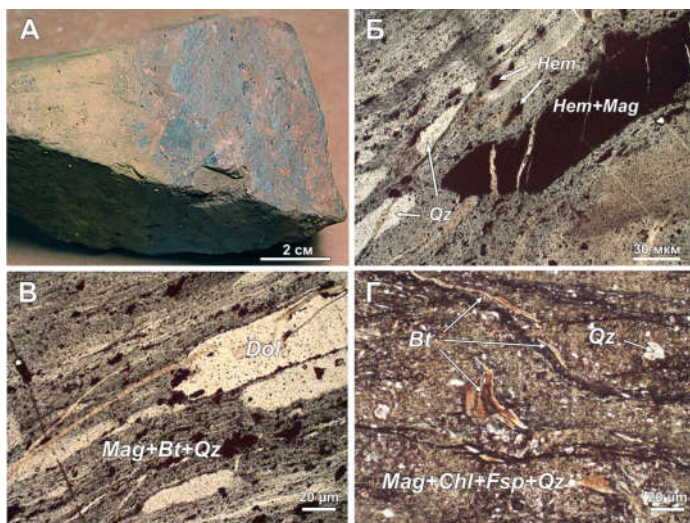


Рис. 6. Минерализованные туфы Кайланского месторождения: А – штуф, Б-Г – шлифы по [Berdnikov et al., 2021]. *Qz* – кварц, *Mag* – магнетит, *Hem* – гематит, *Bt* – биотит, *Chl* – хлорит, *Fsp* – полевой шпат.

Вулканическая природа флюидно-эксплозивных брекчий и туфов подтверждается их геохимическими характеристиками. Химический состав их основной массы варьирует от базальта до андезита. Брекчии Поперечного и Костеньгинского месторождений содержат повышенные концентрации K_2O , что сближает их с породами шошониновой серии [Berdnikov et al., 2023]. Обогащение крупноионными литофильными и обеднение высокозарядными элементами свидетельствует в пользу их субдукционного происхождения (рис. 7). Большинство составов обнаруживают отчетливую отрицательную аномалию стронция, отражающую фракционирование плагиоклаза в процессе магматической дифференциации первичных базальтовых расплавов. Они обогащены легкими редкоземельными элементами и демонстрируют отрицательные аномалии Eu и Tm (рис. 7).

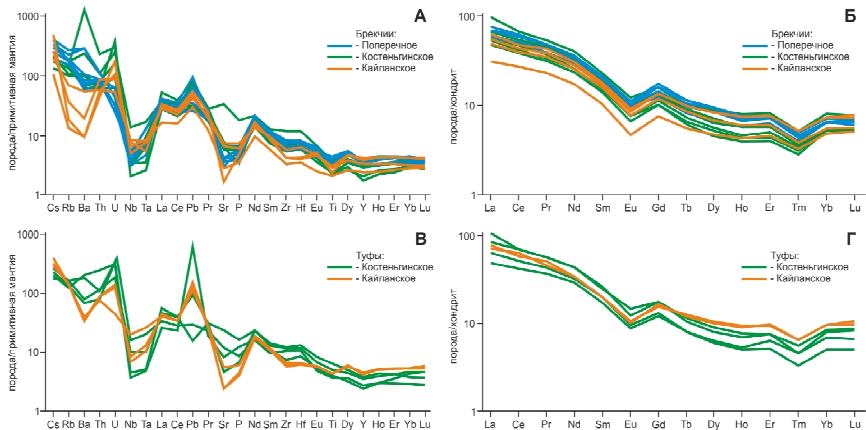


Рис. 7. Распределение редких (А, В) и редкоземельных (Б, Г) элементов во флюидно-эксплозивных породах по [Berdnikov et al., 2023] с изменениями.

Распределение редкоземельных элементов свидетельствует в пользу их принадлежности к островодужным образованиям, что подтверждается дискриминационными диаграммами Cr-Y, Ti-Zr, Nb/U-Nb, Th-Zr-Nb и Th-Hf/3-Ta (рис. 8).

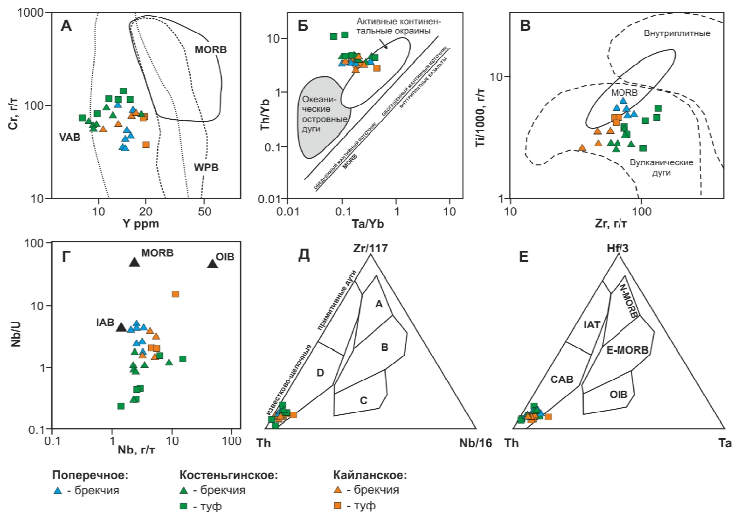


Рис. 8. Дискриминационные диаграммы для флюидно-эксплозивных брекчий и туфов, ассоциирующих с Fe-Mn рудами изученных месторождений по [Berdnikov et al., 2021]: А – Cr-Y [Pearce, 1982]; Б – Th/Yb-Ta/Yb [Pearce, 2008]; В – Ti-Zr [Pearce, 1982]; Г – Nb/U-Nb [Кеpezhinskas et al., 1996]; Д – Th-Zr-Nb [Wood, 1980] (А – NMORB, В – E-MORB, С – OIB, Д – VAB); Е – Th-Hf/3-Ta [Wood, 1980]. VAB – базальты вулканических дуг, MORB – базальты срединно-океанических хребтов, WPB – внутрилитные базальты, IAB – островодужные базальты, OIB – базальты океанических островов, CAB – известково-щелочные базальты, IAT – островодужные толеиты, N-MORB – нормальные (деплетированные) MORB, E-MORB – обогащенные MORB.

На диаграмме Th/Yb-Ta/Yb (рис. 8, Б) составы флюидно-эксплозивных брекчий изученных месторождений тяготеют к полям составов пород активных континентальных окраин. Для составов изученных вулканитов характерны низкие значения отношения Nb/U, что типично для базальтов современных островных дуг (рис. 8, Г).

Руды и ассоциирующие с ними флюидно-эксплозивные брекчии на месторождении Поперечное обогащены золотом, серебром и металлами платиновой группы (МПГ). Согласно [Невструев и др., 2018] содержание в них суммы МПГ варьирует от 0.45 г/т до 11.3 г/т, золота – от 0.2 г/т до 2.6 г/т, серебра – от первых г/т до 296.2 г/т. Во вмещающих известняках и доломитах золото содержится в значительно меньших количествах, а МПГ нет совсем. Такое распределение благородных металлов свидетельствует в пользу того, что их источником являются флюидно-эксплозивные образования, интродуцирующие венд-кембрийские карбонатные толщи.

Глава 4. МИКРОСФЕРУЛЫ В ПОРОДАХ И РУДАХ ИЗУЧЕННЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

В породах и рудах изученных месторождений обнаружено несколько сотен микросферул, из которых детально изучено 94 силикатных, 15 железо-оксидных, 137 медь-золото-серебряных и 64 микросферулы смешанного состава. Особенно обогащены микросферулами измененные известняки Поперечного, эксплозивные брекчии Костеньгинского и минерализованные туфы Кайланского месторождений.

Силикатные микросферулы (20–150 мкм в поперечнике) обычно имеют близкую к сферической форму, иногда нарушенную находящимися на поверхности или погруженными в сферулу микрокристаллами, вогнутостями и выпуклостями, редко – микросферулами меньшего размера. Они, как правило, серые, реже белые, в единичных случаях прозрачные с твердыми фазами и газовыми полостями (рис. 9).

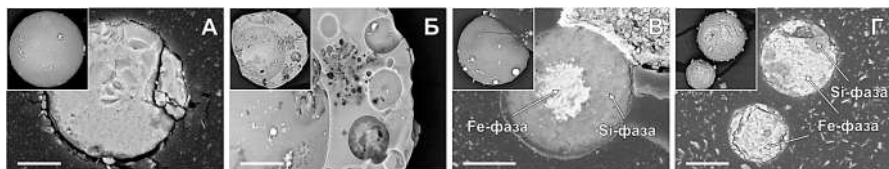


Рис. 9. Внешний вид (врезки) и внутреннее строение силикатных микросферул из флюидно-эксплозивных брекчий и руд Костеньгинского месторождения по [Бердников и др., 2021]. А – гомогенные стекловатые; Б – с газовыми полостями и выделениями кварца; В, Г – микросферулы с обособленными железистой (Fe-фаза) и кремнекислой (Si-фаза) стекловатыми фазами. Линейка 10 мкм.

Гомогенные микросферулы (рис. 9, А) состоят из высокожелезистого (до 30 мас.% FeO) силикатного стекла, часто с газовыми полостями, микрокристаллами кварца и/или полевого шпата (рис. 9, Б). В некоторых микросферулах сосуществуют стекловатые фазы с разным содержанием железа и кремнезема (рис. 9, В, Г). Кремнекислые фазы (по содержанию кремния от дацита до риолита) обогащены Si, Ca, Na и K, а железистые (от базальта до пикрита) содержат повышенные концентрации Fe (до 70

мас.% FeO), Ti, Mg и Mn. Присутствие в силикатных микросферах двух сосуществующих стекловатых фаз, отличающихся кремнекислотностью и железистостью, является следствием несмесимости, которая проявляется при снижении температуры расплава и повышении активности кремнезема в расплавах [Хитаров, Пугин, 1978; Dixon, Rutherford, 1979].

Согласно результатам наших исследований, изученные микросферы являются застывшими каплями силикатного расплава, входящего в состав флюидно-эксплозивных брекчий. В процессе эксплозий материал брекчий подвергался диспергированию и плавлению, которым в газо-пепловом облаке способствовали атмосферные явления [Genareau et al., 2018; Силаев и др., 2019]. Диспергирование силикатных расплавов могло происходить и при импрегнировании их порций в трещины и полости, раскрывающиеся в процессе прорыва магмы в верхние горизонты коры. В этом случае возможны также микроавитационные явления, связанные с «гидродинамическими» неоднородностями во флюидизированном магматическом потоке, также способные привести к образованию силикатных микросферул [Адушкин и др., 2004; Новгорова и др., 2003].

Необходимо отметить существенное обогащение расплава микросферул железом, что свидетельствует в пользу участия вулканических процессов в формировании железной минерализации на изученных месторождениях. На основании результатов изучения формы, химического состава, внутреннего строения и явлений несмесимости расплава в силикатных микросферах сформулировано первое защищаемое положение:

Силикатные микросферы, выделенные из пород и руд изученных месторождений, состоят из высокожелезистого силикатного расплава и образовались в процессе эксплозивной деятельности.

Железо-оксидные микросферы имеют округлую форму, на их поверхности видны выходы кристаллов оксида железа, промежутки между которыми либо свободны (рис. 10, А), либо заполнены расплавом (рис. 10, Б). В составе расплава присутствует значительное количество кремния и алюминия, что подтверждается сканированием в характеристическом излучении Si и Al (рис. 10, В, Г). По кремнекислотности (58-60 мас. % SiO₂) состав расплава соответствует андезиту.

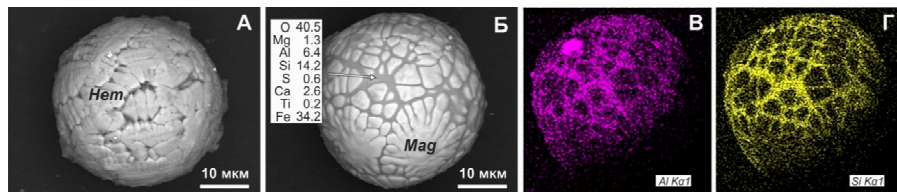


Рис. 10. Железо-оксидные микросферы из измененных доломитов месторождения Поперечное по [Бердников и др., 2026] с выходами на поверхность кристаллов оксида железа, промежутки между которыми свободны (А), либо заполнены расплавом (Б); В, Г – результаты сканирования микросферы Б в характеристическом излучении Al (В) и Si (Г). Hem – гематит, Mag – магнетит.

Шарообразная форма железо-оксидных микросферул из пород и руд изученных месторождений и скелетный характер слагающих их кристаллов магнетита и гематита свидетельствуют об их формировании в результате быстрой кристаллизации в жидкой или в газовой среде. В пользу кристаллизации в магматическом расплаве свидетельствует присутствие высокожелезистого силикатного стекла в полостях и интерстициях между кристаллами, а также сходство изученных микросферул с магнетитовыми сферами из рыхлых руд и с железо-оксидными глобулями в расплавах вулкана Эль Лако, Чили [Nyström et al., 2016; Velasco et al., 2016]. О возможности образования в эруптивном газовой-пепловом облаке говорят находки железо-оксидных микросферул в фильтрах газовых выбросов вулканов [Карпов, Мохов, 2004]. Возникновение первично-жидких капель железо-оксидного состава в расплаве представляется маловероятным из-за высокой температуры плавления магнетита (1591-1597 °С) и гематита (1565 °С), однако в случае развития атмосферноэлектрических явлений в эруптивном облаке такие температуры вполне могли достигаться.

По изложенным выше результатам на защиту выносятся второе положение:

Образование железо-оксидных микросферул, выделенных из пород и руд изученных месторождений, связано с быстрой кристаллизацией в высокожелезистых расплавах или в эруптивном газовой-пепловом облаке в процессе эксплозий.

Поверхность ***медь-золото-серебряных микросферул*** нередко инкрустирована дендритами (рис. 11, А) и осложнена вмятинами и структурами типа «шагреневой кожи», обусловленными усадочными явлениями при остывании, а также фрагментами фаз сложного состава, в котором преобладает оксид меди (рис. 11, Б).

Внутренняя структура медь-золото-серебряных микросферул в ряде случаев гомогенна с незначительным увеличением содержания золота и снижением содержания серебра от центра к краям (рис. 11, А), но в основном для нее характерны включения, сложенные оксидом меди с незначительной примесью железа, никеля и серебра (рис. 11, Б-Е), распределенные в объеме микросферул равномерно (рис. 11, Б), или образуя вихреподобные структуры (рис. 11, В). Их форма в основном округлая, редко встречаются ограненные (рис. 11, Г) и дендритовидные (рис. 11, Д) включения.

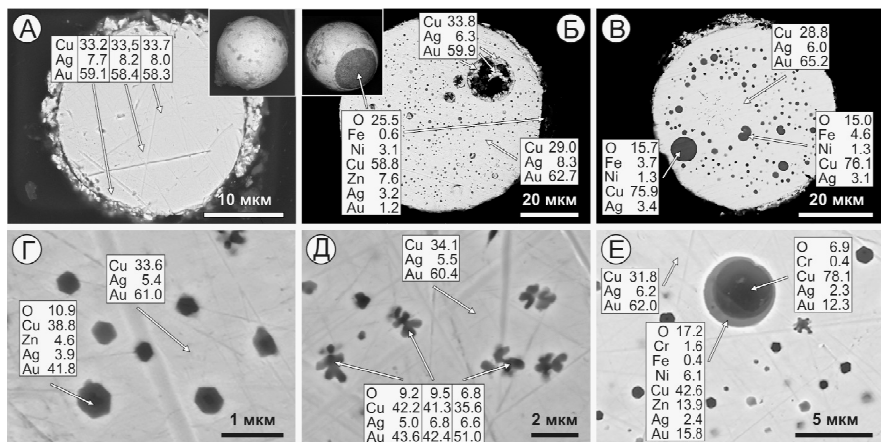


Рис. 11. Внутренняя структура и состав Cu-Ag-Au микросферул по [Berdnikov et al., 2021]. А – гомогенная микросферула из измененных доломитов; Б, В – микросферулы с порами, инкрустированными дендритами Cu-Ag-Au, внутри и с фрагментом фазы сложного состава на поверхности (Б), с медно-оксидными округлыми включениями (В) из флюидно-эксплозивных брекчий Костеньгинского месторождения; Г, Д – оgranенные (Г) и дендритовидные (Д) медно-оксидные включения в микросферулах из минерализованных туфов Кайланского месторождения; Е – двухфазовое медно-оксидное включение в Cu-Ag-Au микросферуле из брекчий Костеньгинского месторождения.

Состав медь-золото-серебряных микросферул варьирует вокруг состава $Cu_{30}Ag_{10}Au_{60}$ (рис. 12).

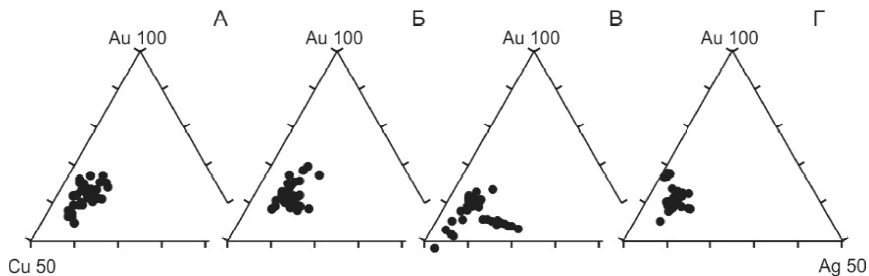


Рис. 12. Валовый состав Cu-Ag-Au микросферул, выделенных из измененных доломитов месторождения Поперечное (А), из руд (Б) и брекчий (В) Костеньгинского месторождения, из оруденелых туфов Кайланского месторождения (Г) по [Berdnikov et al., 2021].

Температура затвердевания медь-золото-серебряных микросферул такого состава, оцененная с помощью фазовой диаграммы [Wise, 1964] (рис. 13, А), составляет 900-950 °С.

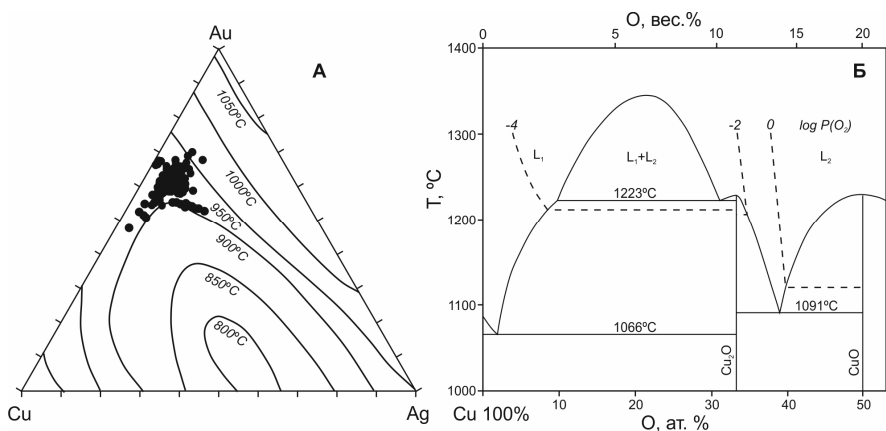


Рис. 13. А – составы изученных Cu-Ag-Au микросферул на диаграмме температуры ликвидуса тройного сплава по [Wise, 1964]; Б – фазовая диаграмма системы Cu-O по [Neumann et al., 1984].

Включения медно-оксидного состава в Cu-Ag-Au микросферулах обособляются при остывании и повышении активности кислорода, округлая форма свидетельствует об их первоначально жидком состоянии. О температуре этого процесса можно судить по наличию в относительно крупных медно-оксидных включениях мениска между двумя первоначально жидкими фазами – обогащенной медью и обогащенной кислородом (рис. 11, Е). Соответствующая область несмесимости (L_1+L_2 на рис. 13, Б) на диаграмме Cu-O [Neumann et al., 1984] располагается в интервале температур 1223–1350 °С, что, по-видимому, поднимает температуру формирования самих Cu-Ag-Au микросферул до этих значений. При медленном охлаждении сферические медно-оксидные включения приобрели бы огранку в еще жидком матричном сплаве Cu-Ag-Au, а сам этот сплав – раскристаллизацию по механизму распада твердых растворов [Knight, 2001]. Поскольку кристаллические медно-оксидные включения наблюдались лишь в единичных случаях, а признаки распада твердых растворов не зафиксированы, мы полагаем, что после своего образования микрокапли Cu-Ag-Au испытали резкое охлаждение от температур порядка 1300 °С до температур, при которых этот сплав и микровключения Cu-O в нем находятся в метастабильном состоянии. Экстремально быстрому охлаждению Cu-Ag-Au микросферул соответствует и сохранение в некоторых крупных медно-оксидных микровключениях затвердевшего мениска, разделяющего две изначально жидкие фазы (рис. 11, Е).

Экспериментальные исследования показывают, что сплав $Cu_{\sim 30}Ag_{\sim 10}Au_{\sim 60}$ может стабильно существовать только в восстановленных условиях ($\log P(O_2)$ порядка -3 по [Neumann et al., 1984]), наиболее характерных для глубинных горизонтов литосферы [Летников, 2006]. Привнос кислорода в систему сплава при высоких температурах вызывает окисление содержащейся в нем меди с образованием медно-оксидной корки на поверхности и медно-оксидных включений внутри Cu-Ag-Au микросферул. Мы

полагаем, что изученные микросферы Cu-Ag-Au являются представителями «глубинного» золота, транспортирующегося к поверхности магматическими расплавами [Бердников и др., 2024].

Близость состава большинства изученных золотосодержащих микросфер к составу популярного ювелирного сплава 585 пробы (58.5 мас. % Au; 7 мас. % Ag; 34.5 мас. % Cu) вызвала необходимость проведения специальных исследований со сравнительным анализом природных микросфер с материалами ювелирного производства [Berdnikov et al., 2023]. В результате выделены четыре надежно диагностируемых отличия природных микросфер состава $Cu_{\sim 30}Ag_{\sim 10}Au_{\sim 60}$ от искусственных того же состава. В первую очередь это разный рельеф поверхности микросфер, который у природных микросфер осложнен усадочными деформациями, а у искусственных имеет «ячеистый» характер. Второе отличие – сплав природных микросфер не несет признаков распада твердых растворов и/или кристаллизации, а их искусственные аналоги имеют доменное внутреннее строение в связи с началом распада сплава на субкристаллические фазы из-за более медленного охлаждения. Третье отличие состоит в различном характере медно-оксидных микровключений в сферах: в искусственных микросферах они раскristализованы, а для природных микросфер характерны округлые «закаленные» микровключения. Четвертое отличие выражено в разном химическом составе медно-оксидных микровключений: в искусственных микросферах они состоят только из оксида меди, в то время как в их природных аналогах присутствуют примеси Fe, Ni, Zn, Cr, редко Na.

Исследования природных микросфер Cu-Ag-Au и их искусственных аналогов показало, что природные микросферы образуются при экстремально высоком темпе охлаждения, который обеспечивает отсутствие в них признаков распада твердого раствора и сохранение сферической формы содержащихся в них микровключений медно-оксидного состава. Высокие скорости охлаждения реализуются при взрывных извержениях или при резком прорыве газонасыщенного расплава, содержащего микрочастицы сплава Cu-Ag-Au, в трещины и полости в горных породах.

На основании полученных данных сформулировано третье защищаемое положение:

Микросферы состава $Cu_{\sim 30}Ag_{\sim 10}Au_{\sim 60}$, выделенные из пород и руд изученных месторождений, образовались в глубинных высокотемпературных восстановленных расплавах, транспортировались ими к поверхности, и отличаются от техногенных аналогов рельефом поверхности, отсутствием признаков распада твердых растворов и характером медно-оксидных микровключений.

Микросферы смешанного состава характерны для измененных вмещающих доломитов мурандавской свиты месторождения Поперечное. Их размер колеблется от 0.5 до 10 мкм, форма округлая, реже с элементами остаточной кристалличности (рис. 14, Г), поверхность преимущественно гладкая (рис. 14, А, В, Д, Е, З), редко с сетчатым рельефом (рис. 14, Б, И) и кавернами (рис. 14, Ж). Часто встречаются «прилипшие» к поверхности более мелкие микросферы того же (рис. 14, В), или иного (рис. 14, И) состава.

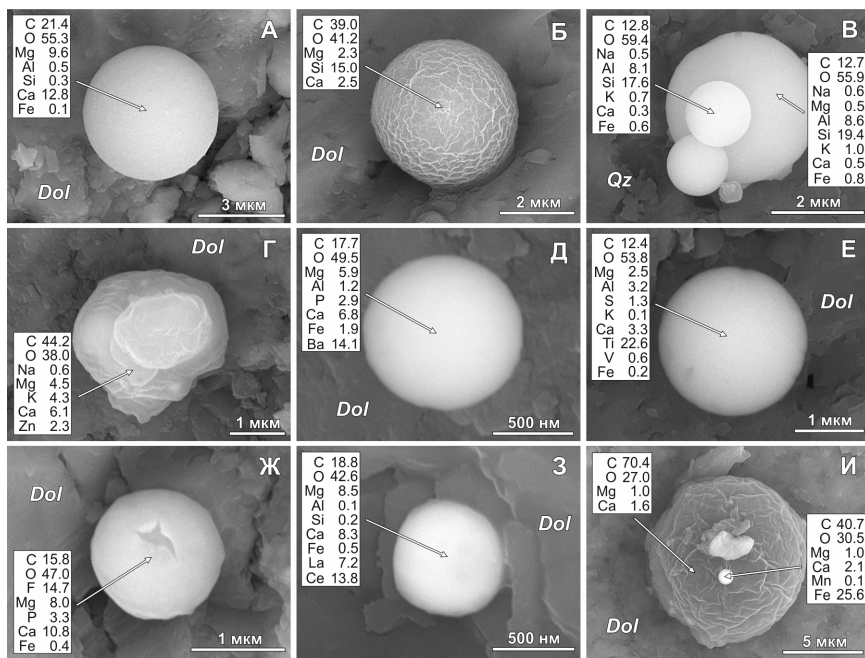


Рис. 14. Разновидности микросферул смешанного состава из измененных доломитов месторождения Поперечное по [Бердников и др., 2026]: А, В, Д, Е, З – с гладкой; Б, И – с рельефной поверхностью; В – с более мелкими микросферулами; Г – с элементами кристалличности («недоплавленные»?); Б, Г, И – обогащенные углеродом, Б и В – кремнием, Д – барием, Е – титаном, Ж – фтором, З – лантаном и церием, И – железом (мелкая микросферула на поверхности более крупной). *Dol* – доломит, *Qz* – кварц.

При СЭМ-ЭДС анализе микросферул (56 анализов) в их составе во всех случаях обнаруживаются (мас. %) углерод (10.3-43.0) и кислород (30.4-51.5). Даже при том, что часть углерода и кислорода могут быть адсорбированы на поверхности микросферул или быть «наведенными» из доломитовой или кварцевой подложки, можно утверждать, что эти элементы являются характерными для состава этого типа микросферул. В 48 % микросферул обнаруживаются (мас. %) кремний (0.2-27.8), в 89.3 % – магний (0.5-9.6), в 91.1 % – кальций (0.2-16.4), в 80.4 % – алюминий (0.1-13.7), в 82.1 % – железо (0.1-13.2), в 69.6 % – калий (0.1-29.0), в 46.4 % – натрий (0.2-12.1), в 41.1 % – титан (0.1-22.6). Значительно реже в составе микросферул этого типа диагностируются сера и марганец (в 8.9 % микросферул в концентрации до 7.8 и 0.4 мас. %, соответственно). В трех случаях обнаружены фосфор, цинк и барий (до 5.0, 6.7 и 14.1 мас. %, соответственно), в двух микросферулах – ванадий (до 0.6 мас. %), по одному случаю обнаружения приходится на фтор, хлор, лантан и церий (14.7, 1.5, 7.2 и 13.8 мас. %, соответственно). Зафиксирована также существенно углеродная (70.4 мас. % углерода) микросферула (рис. 14, И).

Микросферулы смешанного состава образовались в результате фрагментарного плавления вмещающих месторождение Поперечное доломитов под воздействием высокотемпературного флюида. «Сухое» плавление доломита (2570 °С) в рассматриваемых условиях вряд ли возможно, однако добавление в область реакции поликомпонентного флюида существенно понижает эту температуру. Так, экспериментальные исследования плавления карбоната показали, что в присутствии H_2O+CO_2 флюида температура их солидуса не превышает 950 °С, ликвидуса – 1250 °С [Костюк и др., 2021]. Заключительные этапы кристаллизации карбонатитовых массивов Ока и Эссонвилл (Канада), Магнет Коув (США) и Якупиранга (Бразилия) происходили при температурах 440–560 °С [Прокопьев, 2014]. В потоке высокоомобильного и высокотемпературного флюида не исключен кавитационный механизм образования изученных микросферул [Адушкин и др., 2004], предполагающий экстремально высокие (до 2700 °С) температуры. Результаты наших исследований свидетельствуют о том, что микросферулы смешанного состава образовались при воздействии на доломиты потока высокотемпературного флюида, несущего с собой широкий спектр дополнительных компонентов. В результате сформировались микросферулы разнообразного состава, который определяется составом доломита, составом содержащихся в нем минералов-примесей, и составом компонентов, привнесенных флюидом. Так, можно предположить, что микросферулы, изображенные на рис. 14, А, Г, образовались при плавлении преимущественно доломита, на рис. 14, Б, В – с участием кварца, рис. 14, Д – барита, рис. 14, Е – рутила, рис. 14, Ж – фторapatита, рис. 14, З – минералов лантана и церия, рис. 14, И – углеродистых микрочастиц. Большинство из этих минералов обнаружены в доломитах.

Изложенные выше данные позволяют сформулировать четвертое защищаемое положение:

Микросферулы смешанного состава образовались при диспергировании и частичном плавлении вмещающих изученные месторождения доломитов под воздействием минерализованного высокоомобильного и высокотемпературного флюида.

Глава 5. ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ И УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ ИЗУЧЕННЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Согласно полученным данным, силикатные, железо-оксидные и медь-золото-серебряные микросферулы, обнаруженные в рудах и породах изученных месторождений, имеют структурные и геохимические признаки магматического происхождения. Их присутствие в эксплозивных породах вполне закономерно, в то время как их обнаружение в рудах на первый взгляд требует пояснений. Гидротермальный процесс, сформировавший основной объем руд, не предполагает высоких температур, явлений ликвации и диспергирования компонентов, необходимых для формирования микросферул. Однако особенностью рудообразования на изученных месторождениях является его тесная сопряженность во времени и пространстве с эксплозивными процессами. Неоднократные эксплозии здесь развивались на фоне гидротермальной деятель-

ности, формируя как отдельные тела флюидно-эксплозивных брекчий, так и их прослойки в уже сформировавшихся рудах. Кроме того, сам eksploзивный материал по содержанию железа в ряде случаев уже представлял собой руду («магнетитовые лавы»). Продолжающаяся при этом гидротермальная деятельность приводила к существенному ожелезнению eksploзивных брекчий и туфов, превращая их в рудный материал с фрагментами, в которых могли сохраняться микросферулы.

Результаты изучения микросферул в породах и рудах Поперечного, Костеньгинского и Кайланского месторождений раскрывают особенности формирования их структуры и процесса рудообразования.

Обнаружение силикатных микросферул в флюидно-эксплозивных брекчиях свидетельствует о наличии в их составе магматического расплава. Высокожелезистый характер силикатных микросферул и присутствие в изученном материале железокислотных микросферул свидетельствуют о высоком содержании железа в этих расплавах и о возможности их прямого участия в формировании оруденения. Это, в свою очередь, позволяет говорить о комплексном гидротермально-магматическом механизме формирования оруденения, характеризующимся пульсационной флюидно-магматической (эксплозивной) деятельностью на фоне гидротермальной активности, сформировавшей основной объем массивных руд.

Обнаружение в изученном материале медь-золото-серебряных микросферул специфического состава в совокупности с присутствием в нем попутной платиноидной минерализации свидетельствует о глубинном источнике флюидно-магматического потока, характеризующемся высокими температурами и восстановительными условиями. Присутствие микросферул смешанного состава во вмещающих доломитах свидетельствует об их трансформации под воздействием высокообильного и высокотемпературного минерализованного флюида. Это говорит о неоднородностях проявления флюидно-магматического потока на территории месторождения, связанных с преобладанием в нем либо магматического, либо флюидного компонента. Обилие расплавленного компонента привело к формированию флюидно-эксплозивных брекчий, «магнетитовых лав» и туфов, а обилие флюидного компонента – к трансформации доломитов с образованием скарноподобных минеральных ассоциаций и плавлению диспергированного доломитового материала.

Особенности формирования такой необычной Fe-Mn минерализации с попутной благороднометаллической минерализацией в ассоциации с железистым eksploзивным магматизмом в настоящее время изучены недостаточно. Полученные нами результаты позволили высказать предположения о механизме образования месторождений Поперечное, Костеньгинское и Кайланское.

За геолого-тектоническую основу была принята модель [Голозубов, Ханчук, 2021], согласно которой в позднеюрское-раннемеловое время плита Изагаги испытала пологую субдукцию под Цзямусы-Буря-Ханкайский супертеррейн. Субдукция сопровождалась формированием во фронтальных частях слэба аккреционных комплексов, обогащенных железом и марганцем за счет Fe-Mn руд склонов подводных гор, илов и конкреций осадочного слоя океанического дна [Бердников и др., 2016; Hein et al., 2008; Nakagawa et al., 2011]. Фрагменты этого минерализованного аккреционного

комплекса вовлекались в зону пологой субдукции в процессе тектонической эрозии [Сафонова, Ханчук, 2021]. В раннемеловое время слэб испытал погружение в мантию и деформации, в нем могли образовываться разрывы (slab tear), сквозь которые вещество подслэбовой астеносферной мантии (возможно, с золотом и МППГ) вместе с частично расплавленным веществом слэба [Gutscher et al., 2000] и глубинными флюидами поднималось к поверхности, дополнительно насыщаясь железом и марганцем аккреционных комплексов. Эти восходящие флюидно-магматические потоки, по нашему мнению, являются основной причиной формирования комплексной Fe-Mn с благородными металлами минерализации месторождений Малохинганского рудного района. Флюидная составляющая потоков обеспечивала метасоматическую проработку и формирование гидротермальных Fe-Mn руд, а магматическая – внедрение насыщенных флюидами высокожелезистых расплавов с взрывными явлениями. С нашей точки зрения такой механизм объясняет:

- дискордантное структурное положение руд относительно вмещающих доломитов;
- сочетание гидротермального и вулканогенного оруденения;
- присутствие в рудном материале водородных компонентов;
- присутствие в изверженных породах и рудах изученных месторождений глубинных рудных компонентов – металлов платиновой группы;
- мезозойский возраст сопутствующего платинометалльного оруденения и, соответственно, вмещающих его флюидно-взрывных брекчий;
- специфический состав Cu-Ag-Au микросферул, высокие температуры и восстановительные условия их образования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные выводы:

1. Силикатные микросферулы являются застывшими каплями расплава, входящего в состав флюидно-взрывных брекчий. В процессе взрывов материал брекчий подвергался диспергированию и плавлению, которым способствовали атмосферные явления. Высокое содержание железа в силикатном расплаве вызвало развитие в микросферулах процессов несмесимости и свидетельствует в пользу участия вулканических процессов в формировании железной минерализации на месторождениях.

2. Железо-оксидные микросферулы состоят из скелетных кристаллов магнетита и гематита, иногда с железистым силикатным стеклом в интерстициях и в полостях внутри микросферул. Образование железо-оксидных микросферул связано с быстрой кристаллизацией в высокожелезистых расплавах или в эруптивном газо-пепловом облаке в процессе взрывов.

3. Состав медь-золото-серебряных микросферул близок к $Cu_{30}Ag_{10}Au_{60}$. Они образуются в глубинных высокотемпературных восстановленных расплавах, транспортируются ими к поверхности, и отличаются от техногенных аналогов рельефом поверхности, отсутствием признаков распада твердых растворов и характером медно-оксидных микровключений.

4. Микросферулы смешанного состава образовались в результате фрагментарного плавления вмещающих доломитов под воздействием высокотемпературного флюида. Их состав формировался на основе состава доломита и состава содержащихся в нем минералов-примесей с добавлением компонентов, привнесенных флюидом.

5. Основной причиной формирования Fe-Mn с благородными металлами минерализации месторождений Поперечного, Костеньгинского и Кайланского являются глубинные высокожелезистые флюидно-магматические потоки. Флюидная составляющая потоков обеспечивала метасоматическую проработку и формирование гидротермальных руд, а магматическая – внедрение насыщенных флюидами высокожелезистых расплавов с эксплозивными явлениями.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в журналах, рекомендованных перечнем ВАК

1. Berdnikov N., Nevstruev 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. – V. 11 (2). – P. 103.

2. Бердников Н.В., Невструев В.Г., Кепежинскас П.К., Крутикова В.О., **Коновалова Н.С.**, Астапов И.А. Силикатные, железо-оксидные и золото-медь-серебряные микросферулы в рудах и пирокластике Костеньгинского железорудного месторождения (Дальний Восток России) // *Тихоокеанская геология*. – 2021. – Т. 40. – № 3. – С. 67–84.

3. Kepezhinskas P., Berdnikov N., **Konovalova N.**, Kepezhinskas N. Adakites, high-Nb basalts and copper–gold deposits in magmatic arcs and collisional orogens: an overview // *Geosciences*. – 2022. – V. 12 (1). – P. 29.

4. 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. – V. 12 (3). – P. 126.

5. Berdnikov N., Kepezhinskas P., Krutikova V., Kozhemyako N., **Konovalova N.** Cu-Ag-Au microspherules in igneous rocks: morphology, composition, diagnostic criteria and possible origin // *Minerals*. – 2023. – V. 13 (6). – P. 819.

6. Berdnikov N.V., Kepezhinskas P.K., Nevstruev V.G., Krutikova V.O., **Konovalova N.S.**, Savatenkov V. Magmatic-hydrothermal origin of Fe-Mn deposits in the Lesser Khingan range (Russian Far East): petrographic, mineralogical and geochemical evidence // *Minerals*. – 2023. – V. 13 (11). – P. 1366.

7. Бердников Н.В., Кепежинскас 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.

8. Бердников Н.В., Невструев В.Г., Кепежинскас П.К., Крутикова В.О., **Коновалова Н.С.**, Кожемяко Н.В. Микроминералогические свидетельства воздействия высокотемпературного минерализованного флюида на доломиты, вмещающие Fe-Mn место-

рождение Поперечное (Дальний Восток России) // Тихоокеанская геология. – 2026. – Т. 45. – № 1. – С. 13–31.

9. **Коновалова Н.С.**, Бердников Н.В., Кепежинскас П.К. Условия формирования железо-марганцевого оруденения на месторождениях Поперечное, Костеньгинское и Кайланское Малохинганского рудного района (ЕАО, Дальний Восток России) // Тихоокеанская геология. – 2026. – Т. 45. – № 3. – С. 33–43. DOI: 10.30911/0207-4028-2026-45-3-33-43

Статьи в других научных изданиях и материалах конференций

10. Бердников Н.В., Невструев В.Г., Кепежинскас П.К., Крутикова В.О., **Коновалова Н.С.**, Астапов И.А. Силикатные, железо-оксидные и золото-медь-серебряные микросферы в рудах и пирокластике Костеньгинского железорудного месторождения (Дальний Восток России) // XI Косыгинские чтения: Тектоника, глубинное строение и минерагения Востока Азии. Материалы Всероссийской конференции. – Хабаровск: ИТиГ ДВО РАН, 2021 – С. 68–70.

11. Kepezhinskas P., Berdnikov N., Kepezhinskas N., **Konvalova N.** Metals in Kamchatka mantle wedge linked to Cu-Au deposits in magmatic arcs // Annual Meeting GSA Connects 2021. Proceedings of Geological Society of America. – Portland: Oregon Convention Center, 2021. – V. 53. – No. 6. – Abstract 363419.

12. Kepezhinskas P., Berdnikov N., Kepezhinskas N., **Konvalova N.** Metal-rich adakite magmas are linked to the formation of Cu-Ag-Au mineralization at convergent plate edges // Proceedings of 16th Biennial Meeting SGA 2022. – Rotorua, New Zealand, 2022. – P. 164–167.

13. **Коновалова Н.С.**, Бердников Н.В., Невструев В.Г. Микросферы в рудах и пирокластике Костеньгинского железорудного месторождения (Малый Хинган, Дальний Восток России) // В сборнике: Геологические процессы в обстановках субдукции, коллизии и скольжения литосферных плит. Материалы VI Всероссийской научной конференции с международным участием. – Владивосток: ДВГИ ДВО РАН, 2023. – С. 264–267.

14. **Коновалова Н.С.**, Бердников Н.В., Кепежинскас П.К. Вулканогенно-гидротермальный генезис железо-марганцевого месторождения Поперечное (Малохинганский рудный район, Дальний Восток России) // В сборнике: Вулканизм и связанные с ним процессы. Материалы XXVII Всероссийской научной конференции, посвященной Дню вулканолога. – Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2024. – С. 224–227.

15. **Коновалова Н.С.**, Бердников Н.В., Кепежинскас П.К. Вулканогенно-гидротермальный генезис железо-марганцевого месторождения Поперечное (Малохинганский рудный район, Дальний Восток России) // В сборнике: Косыгинские чтения: Тектоника, глубинное строение и минерагения Востока Азии. Материалы XII Всероссийской научной конференции с международным участием. – Хабаровск: ИТиГ ДВО РАН, 2024. – С. 84–86.