

На правах рукописи

Кардашу

КАРДАШЕВСКАЯ Вероника Николаевна

**ЗОЛОТОЕ ОРУДЕНЕНИЕ АЛГОМИНСКОГО РУДНОГО
УЗЛА
ЮЖНО-АЛДАНСКОЙ МЕТАЛЛОГЕНИЧЕСКОЙ ЗОНЫ:
МИНЕРАЛОГИЯ И УСЛОВИЯ ОБРАЗОВАНИЯ РУД**

1.6.10 – Геология, поиски и разведка твердых полезных
ископаемых, минерагения

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата геолого-минералогических наук

НОВОСИБИРСК 2022

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте геологии алмаза и благородных металлов Сибирского отделения Российской академии наук (ИГАБМ СО РАН), г. Якутск.

Научный руководитель:

Анисимова Галина Семеновна, кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории геологии и минералогии благородных металлов Института геологии алмаза и благородных металлов СО РАН, г. Якутск.

Официальные оппоненты:

Дамдинов Булат Батуевич, доктор геолого-минералогических наук, заместитель директора по научной работе, заведующий лабораторией металлогении и рудообразования Геологического института им. Н.Л. Добрецова Сибирского отделения Российской академии наук (ГИН СО РАН), г. Улан-Удэ

Майорова Татьяна Петровна, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник Института геологии им. Н.П. Юшкина Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук (ИГ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН), г. Сыктывкар

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт геохимии им. А.П. Виноградова Сибирского отделения Российской академии наук (ИГХ СО РАН), г. Иркутск

Защита состоится 25 октября 2022 г. в 13:00 на заседании диссертационного совета 24.1.050.01 в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте геологии и минералогии им. В.С. Соболева Сибирского отделения Российской академии наук (ИГМ СО РАН) по адресу: 630090, г. Новосибирск, просп. Академика Коптюга, д.3.

Тел.: +7(383)373-03-28, факс: +7(383)373-05-61, e-mail: turkina@igm.nsc.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ИГМ СО РАН:

<https://www.igm.nsc.ru/index.php/obrazov/dissovety>

Автореферат разослан 20 сентября 2022 г.

Ученый секретарь диссертационного совета 24.1.050.01,

Доктор геолого-минералогических наук

О.М. Туркина

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность исследования. Алгоминский рудный узел расположен на юго-восточном фланге Алдано-Станового щита. В пределах Алданского щита известны различные месторождения, связанные с мезозойским щелочным и субщелочным магматизмом: золото-скарновые (Лебединское), золото-карстовые (Куранахское), золото-медно-порфиновые (Рябиновое), золото-урановые (Эльконское), а также эпитеpmальные на западе щита (Гросс, Таборное) и т.д (Мигута, 2001; Ветлужских и др., 2002; Кочетков, 2006; Бойцов и др., 2010; Хомич, Борискина, 2010; Дворник, 2012; Добровольская и др., 2016; Молчанов и др., 2017). При этом малоизученной остается золотоносность зоны сочленения Алданского щита со Становой областью. Одним из перспективных объектов на территории является Алгоминский рудный узел, где впервые обнаружена поздняя золотоносная висмут-теллуридная минерализация. До настоящих исследований не было опубликованных данных по минералогическим особенностям руд, изотопному составу сульфидов, возрасту минерализации и условиям формирования. В связи с этим, реконструкция условий образования Алгоминского рудного узла необходима для понимания закономерностей распространения и поисков объектов-аналогов на площади Алдано-Станового щита, что и определяет актуальность данного исследования.

Цель исследования заключается в реконструкции условий образования Алгоминского рудного узла.

Задачи исследования:

- 1) охарактеризовать текстурно-структурные особенности руд, минеральный состав и последовательность минералообразования;
- 2) оценить физико-химические параметры (температура и состав) рудообразующего флюида;
- 3) определить источники рудного вещества и возраст оруденения на основе изотопно-геохимических и геохронологических исследований.

Материалы и методы исследования. Материал для исследований любезно предоставлен руководителем диссертационной работы Г.С. Анисимовой и сотрудником АО «Якутскгеология» Е.П. Соколовым. Оптические исследования выполнены на микроскопе Jenavert SL 100. Химический состав

минералов изучен в РЦ СПбГУ «Геомодель» с помощью электронного сканирующего микроскопа SEM-501 Hitachi S-3400N, оснащенного энергодисперсионным спектрометром Oxford X-max 20 (аналитики Н.С. Власенко, В.В. Шиловских) и в ИГАБМ СО РАН на аналогичном микроскопе JEOL JSM-6480LV с энергетическим спектрометром фирмы Oxford (аналитики С.К. Попова, Н.В. Христофорова). Микротермометрия флюидных включений выполнена в РЦ СПбГУ «Геомодель» с использованием микроскопа Olympus BX53F и термокриосталика THMSG-600-ec фирмы Linkam. Состав газовой фазы определен в РЦ СПбГУ «Геомодель» на Рамановском спектрометре Horiba LabRam HR800 (аналитик В.Н. Бочаров). Определение изотопного состава свинца сульфидов проводилось в ИГГД РАН на многоколлекторном масс-спектрометре Finnigan MAT261 (аналитик В.М. Саватенков). Изотопный анализ серы в сульфидах выполнен в ДВГИ ДВО РАН на масс-спектрометре Finnigan MAT253 (аналитик, Т.А. Веливецкая). $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ датирование проведено с помощью масс-спектрометра Noble gas 5400 (Micromass, Англия) в ИГМ СО РАН (аналитик Травин А.В.).

Научная новизна. Впервые для Алгоминского рудного узла выделена теллуридная минерализация. Оценены физико-химические параметры образования золотоносных руд. На основе изотопного исследования свинца и серы в сульфидах установлен мантийно-коровый источник рудного вещества. Впервые определен возраст дорудных метасоматитов (150 млн лет) и золотого оруденения (125 млн лет), соотносящийся с раннемеловым этапом тектономагматической активизации Алданского щита.

Теоретическая и практическая значимость. Полученные результаты могут быть использованы при прогнозировании объектов-аналогов на территории Алдано-Станового щита.

Апробация работы. Основные результаты работ докладывались на XVII Всероссийской конференции по термобарогеохимии (г. Улан-Удэ, 2016), заседании VI, X Российской молодежной научно-практической школы «Новое в познании процессов рудообразования» (г. Москва, 2016, 2021), Юбилейном съезде Российского минералогического общества «200 лет РМО» (г. Санкт-Петербург, 2017, 2020), VII, IX, XI Всероссийской научно-практической конференции «Геология и минерально-сырьевые ресурсы Северо-Востока России» (г. Якутск, 2018, 2019, 2021), на VII Международной конференции по изучению флюидных и расплавных

включений ACROFI-2018 (г. Пекин), XXV Международной конференции по изучению флюидных и расплавных включений ECROFI-2019 (г. Будапешт).

Публикации. По теме диссертации опубликована 21 работа, из них 4 статьи в журналах перечня ВАК: статья в журнале «Отечественная геология», две статьи в журнале «Записки Российского минералогического общества» (Scopus) и статья в журнале «Minerals» (WoS/Scopus).

Личный вклад автора заключается в сборе и анализе фондовой и опубликованной литературы по геологическому строению изучаемой и сопряженной территории, проведении минералогических исследований руд, измерении РТХ-параметров флюидных включений, интерпретации данных минералогических, изотопно-геохимических и изотопно-геохронологических исследований, реконструкции условий формирования рудного узла.

Структура и объем работы. Работа состоит из введения, 5 глав, заключения и списка литературы. Общий объем работы 132 страницы, включая 36 рисунков и 20 таблиц. Список литературы состоит из 147 наименований.

Во введении дается актуальность темы исследования, формулировка цели и задач, научная новизна, практическая значимость и приводятся положения, выносимые на защиту. Также отражен личный вклад автора и апробация работы. В первой главе представлен краткий обзор геологической изученности и положения рудного узла в региональных структурах, рассмотрены литературные данные о рудной минерализации Алдано-Станового щита. Дана геологическая характеристика Алгоминского рудного узла. Во второй главе приведены методы исследования, используемые в работе. Третья глава посвящена минералогии руд. В четвертой главе изложены результаты изучения флюидных включений, стабильных изотопов и данные о возрасте рудной минерализации. В пятой главе проведено сравнение с месторождениями Приамурской золотоносной провинции и золоторудной провинции Дзяодун (Северный Китай) и реконструированы условия формирования рудного узла. Заключение содержит основные выводы исследования.

Благодарности. Автор глубоко благодарен научному руководителю к.г.-м.н. Г.С. Анисимовой за всестороннюю помощь и постоянное внимание к работе; к.г.-м.н. Е.В. Баданиной за

неоценимую помощь при выполнении исследований; к.г.-м.н. Н.И. Пономаревой за сотрудничество и помощь в выполнении аналитических исследований и интерпретации данных. Отдельную признательность за поддержку и обсуждение результатов автор выражает к.г.-м.н. Л.А. Кондратьевой и Е.С. Серкебаевой. За доброжелательную критику и советы автор благодарит коллектив ИГАБМ СО РАН: члена-корреспондента РАН, д.г.-м.н. В.Ю. Фридовского, к.г.-м.н. А.В. Прокопьева, к.г.-м.н. О.В. Королеву, д.г.-м.н. А.В. Костина, к.г.-м.н. А.А. Кравченко, к.г.-м.н. В.С. Гриненко. За выполнение аналитических работ и помощи в интерпретации данных сотрудника ИГГД РАН к.г.-м.н. В.М. Саватенкова. За бесценную помощь в проведении термобарогеохимических исследований автор благодарит сотрудников ИГМ СО РАН: д.г.-м.н. А.А. Томиленко, к.г.-м.н. Н.А. Гибшер, д.г.-м.н. Г.А. Пальянову и Е.О. Шапаренко. За обсуждение геологической ситуации района автор благодарит сотрудника АО «Якутскгеология» Е.П. Соколова.

Аналитические исследования были проведены при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант №19-35-90051) и в рамках плана НИР ИГАБМ СО РАН.

ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ СТРОЕНИЕ

Алгоминский рудный узел расположен в 300 км к юго-востоку от г. Нерюнгри в Республике Саха (Якутия) в восточной части Южно-Алданской металлогенической зоны, на стыке Тыркандинской зоны тектонического меланжа и зоны Станового разлома (рис. 1). Исследуемый район приурочен к региональным тектоническим структурам, к системе нарушений субширотной зоны Станового краевого шва и к нарушениям северо-западного направления, относящихся к системе Тыркандинской зоны тектонического меланжа (Соколов 2005ф; Соколов, 2012ф; Анисимова и др., 2017; Кардашевская и др., 2020).

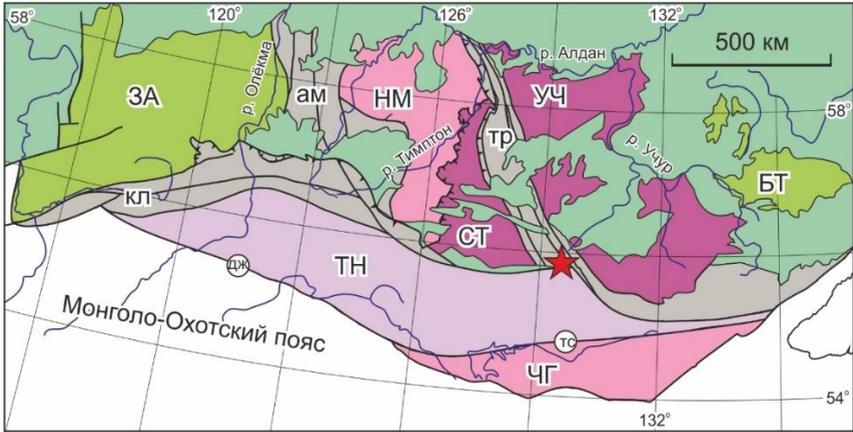


Рис. 1. Карта террейнов Алдано-Станового щита (по Смелову и др., 2001 с изменениями и дополнениями автора) и местоположение Алгоминского рудного узла и основных золоторудных месторождений. Восточно-Алданский супертеррейн – Батомгский (БТ), Учурский (УЧ) террейны; Центрально-Алданский супертеррейн – Нимнырский (НМ), Сутамский (СТ) террейны. 1 - гранит-зеленокаменные (ЗА – Западно-Алданский, БТ – Батомгский); 2 - тоналит-трондjemитогнейсовые (ТН – Тындинский); 3 - гранулит-ортогнейсовые (НМ – Нимнырский, ЧГ – Чогарский); 4 - гранулит-парагнейсовые (СТ – Сутамский, УЧ – Учурский); 5 - осадочный чехол; 6 - зоны тектонического меланжа (ам – Амгинская, кл – Каларская, тр – Тыркандинская); 7 - разломы (дж – Джелтулакский, тс – Таксакандинский); 8 – исследуемый район.

На территории исследований известно золото-кварцевое месторождение Бодороно и золото-сульфидно-кварцевое рудопроявление Дывок в 10 км к западу от него и ряд более мелких проявлений.

В строении рудного узла участвуют докембрийские образования (гнейсо-граниты и кристаллические сланцы различного состава) (рис. 2). Главными для исследуемой площади являются системы разломов северо-западного направления Тыркандинской зоны тектонического меланжа и с южной стороны она ограничена системой глубинных долгоживущих разломов субширотного простирания Станового краевого шва. Разрывные нарушения контролируют размещение основных интрузий докембрийского и мезозойского возрастов. По мнению исследователей, рудная минерализация обусловлена проявлением щелочного и

субшелочного магматизма, который происходил при мезозойской тектоно-магматической активизации древних разломов.

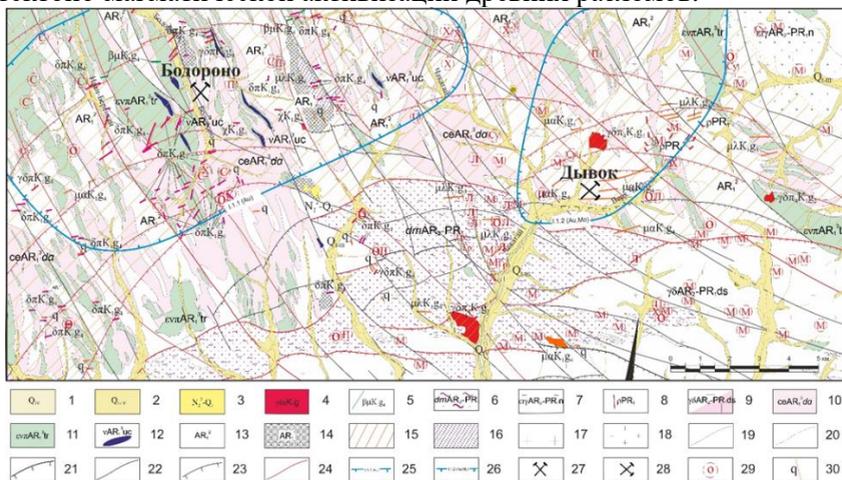


Рис. 2. Геологическая карта Алгоминского рудного узла по Ю.А. Маланину и Е.П. Соколову, 2005 г. с изменениями автора.

1–3 – аллювиальные отложения; 4, 5 – умереннощелочные и щелочные породы кислого, среднего и основного составов (K_1); 6 – динамометаморфиты зон разломов; 7, 8 – граниты, плагиограниты, пегматиты; 9 – абиссолиты и мигма-плутоны гранитов, гранодиоритов, кварцевых диоритов; 10 – граниты; 11 – габбро-нориты; 12 – метаморфизованные габброиды и пироксенитов; 13 – гнейсы и плагиогнейсы, кристаллосланцы; 14 – кристаллические сланцы, реже гнейсы; 15 – площади проявления метасоматических изменений; 16 – тектонический меланж; 17 – граниты разномелкозернистые; 18 – граниты мелкозернистые; 19 – геологические границы; 20 – границы несогласного залегания; 21 – надвиги; 22 – сдвиги; 23 – сбросы, взбросы; 24 – разломы рудоконтролирующие; 25 – месторождение Бодороно; 26 – рудопроявление Дывок; 27 – находящиеся в разведке; 28 – отработанные; 29 – окварцевание (о), серицитизация (с), эпидотизация (э), хлоритизация (х), пиритизация (п), сульфидизация (Су), лимонитизация (л), гематизация (г), графитизация (Гр), мусковитизация (м); 30 – кварцевые жилы.

Вмещающие породы *месторождения Бодороно* представлены докембрийскими основными кристаллическими сланцами, гнейсами (метабазами), гранито-гнейсами, диопсидовыми кальцифирами и гранулитами. Породы смяты в сжатые изоклинальные складки общего северо-западного с отклонением до субмеридионального простирания (290° – 350°) и прорываются раннемеловыми дайками долеритов, диоритовых порфириров и лампрофиров, мощностью 0,5–1,5 м, представляющие собой линзовидные тела, с четкими контактами и крутым падением.

Структурный план определяется системой разрывных нарушений субсогласного северо-западного простирания. Гидротермально-метасоматические образования на площади представлены березитами, лиственитами. Рудные тела представлены полого и крутопадающими кварцевыми жилами северо-восточного направления с согласным и секущим залеганием. Мощность их составляет 0,1–0,5 м, протяженность – до 2 км. Взаимоотношение даек и жил неоднозначно, отмечаются случаи пересечения жил дайками и наоборот. На месторождении выделено 3 рудные зоны.

Рудопроявление Дывок сложено докембрийскими гранито-гнейсами, гранат-полевошпатовыми гнейсами. Кристаллический фундамент в центре участка прорван трещинной интрузией раннемеловых гранодиоритов, на водоразделах и склонах умереннощелочными дайками кислого и среднего состава. Мощность их от 10 см до 3 м, протяженность от 1 – 10 м. Оруденение контролируется системами разрывных нарушений северо-восточного субширотного простирания, наложенными на более ранние разрывные структуры субмеридионального простирания, которые являются рудолокализирующими. Рудные зоны сложены жилами и прожилками кварцевого, кварц-сульфидного, кварц-карбонат-баритового и карбонат-баритового состава и вмещающими их калишпат-кварцевыми метасоматитами, березитизированными и аргиллизированными породами. Мощность жил и прожилков от 5 до 0,4 м и прослеживаются до 60 м. Мощность зон дробления с кварцевыми жилами до 3 м. Всего выделено 6 рудных зон.

ЗАЩИЩАЕМЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

ПОЛОЖЕНИЕ 1. Рудная минерализация на месторождении Бодороно образовалась в три стадии: 1) ранняя – пирит-пирротин-кварцевая, 2) промежуточная – золото-полиметаллическая и 3) поздняя – золото-висмут-теллуридная. Рудопроявление Дывок сформировалось в четыре стадии: 1) ранняя – золото-пирит-арсенопирит-кварцевая, 2) промежуточная – пирит-халькопирит-сфалеритовая, 3) кварц-буланжеритовая и 4) поздняя – теллуридная.

Минеральный состав руд Алгоминского рудного узла

Минералы	Главные	Второстепенные	Редкие
<i>Месторождение Бодороно</i>			
Нерудные	кварц	кальцит, сидерит, анкерит	полевоы шпат, мусковит, апатит, ильменит, монацит, циркон
Рудные	пирит, галенит	сфалерит, пирротин, халькопирит, гематит, магнетит, лиллианит, самородное золото	висмутин, теллуровисмутит, тетрадимит, самородный висмут, пильзенит, хедлейит, лайтакарит, глаукоdot
Гипергенные		гетит	церуссит, англезит, смирнит
<i>Рудопроявление Дывок</i>			
Нерудные	кварц	кальцит, анкерит, сидерит, полевоы шпат	барит, хлорапатит, серицит, рутил, ильменит, циркон, монацит
Рудные	пирит, арсенопирит, сфалерит	халькопирит, пирротин, галенит, молибденит, самородное золото	буланжерит, гессит, алтаит, воынскийт, меренскиит, мелонит, раклиджит
Гипергенные		гетит	англезит

Месторождение Бодороно. Руды прожилково-вкрапленные и прожилково-гнездовые, убогосульфидные с содержанием сульфидов до 7% (Анисимова, Соколов, 2014; Кардашевская и др., 2020). В прожилково-вкрапленных и прожилково-гнездовых рудах сульфиды представлены пиритом, пирротином, галенитом, сфалеритом и теллуридами висмута (табл. 1). Продуктивность их связана с присутствием частиц самородного золота. В рудах выделены три стадии гипогенного этапа минералообразования и один гипергенный этап:

1. *Пирит-пирротин-кварцевая стадия* установлена повсеместно во всех трех рудных зонах. Сульфиды отлагались последовательно (пирротин→пирит I) и представлены идиоморфной вкрапленностью пирротина (до 0,5 мм) и пирита I (до 2 мм) и ассоциируют с кварцем I (рис. 3). Редко отмечается халькопирит.

Ранние минералы были частично катаклазированы, что свидетельствует о тектонических подвижках. Гидротермальные растворы первой стадии - слабощелочные (Кардашевская, Пономарева, 2021).

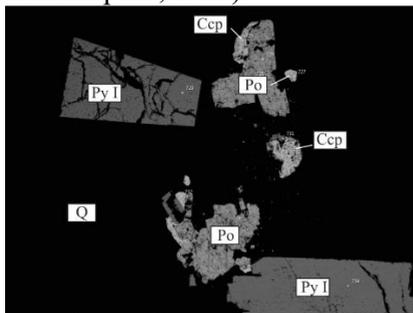


Рис. 3. Пирит и его взаимоотношение с другими минералами месторождения Бодороно. Ранний пирит (Py I) в ассоциации с пирротинитом (Po) и халькопиритом (Ccp) и кварцем (Q).

2. *Золото-полиметаллическая стадия* встречается во всех трех рудных зонах. Вкрапленники галенита I, сфалерита и самородного золота I образуют прожилки и ассоциируют с кварцем II и отлагаются последовательно (галенит I→сфалерит→самородное золото I) (рис. 4а). Размер их достигает до 7 мм. Самородное золото I формирует комковидные выделения в сростании с галенитом I и сфалеритом, размером до 3 мм, реже самостоятельные зерна в ассоциации с кварцем II (рис. 4б). Пробность золота – 840–870%. Прожилковая текстура руд свидетельствует о спокойной тектонической обстановке при формировании руд. Образование данной стадии происходило в условиях кислой-слабокислой среды и менее восстановительной обстановки (Кардашевская, Пономарева, 2021).

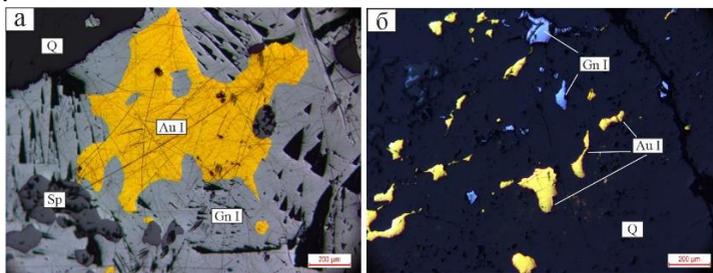


Рис. 4. Взаимоотношение минералов золото-полиметаллической стадии месторождения Бодороно: а – комковидное золото первой генерации (Au I) в центральной части зерна раннего галенита (Gn I); б – мелковкрапленные, пластинчатые выделения золота в ассоциации с кварцем III (Q). Sp – сфалерит. Минералы: Qz – кварц, Gn – галенит, Sp – сфалерит, Au – самородное золото.

3. *Золото-висмут-теллуридная стадия* проявлена локально во всех трех рудных зонах и является поздней. Минералы отлагались в следующей последовательности: висмутин → лиллианит → группа тетрадимита → се-содержащий галенит → лайтакарит → самородный висмут → самородное золото II (рис. 5). Форма кристаллов группы тетрадимита – изометричная, лиллианита, висмутина, самородного висмута и лайтакарита – неправильная. Самородное золото II образует самостоятельные изометричные выделения, реже сростается с лиллианитом, теллуrowисмутом и висмутином и ассоциирует с кварцем III (рис. 5а, б). Пробность золота – 820–940%. По литературным данным, примесь Se свидетельствует об эпитермальном характере минерализации (Vikentiev et.al., 2005; Кемкина, Кемкин, 2007; Лотина, 2011). Гидротермальные растворы становятся более кислыми, а минералообразующая среда слабо восстановительной (Кардашевская, Пономарева, 2021).

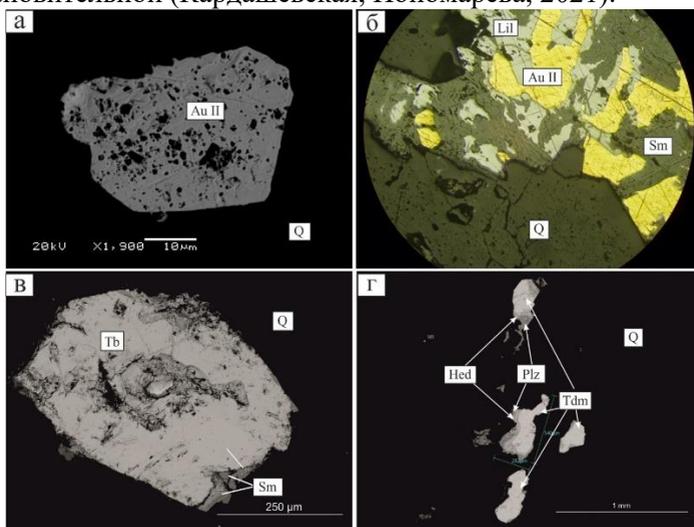


Рис. 5. Взаимоотношение минералов золото-висмут-теллуридной стадии месторождения Бодороно: а – пористое золото второй генерации (Au II) в сростании с кварцем (Q); б – сростание золота и лиллианита (Lil) и замещение лиллианита смирнитом (Sm); в - теллуrowисмутит (Tb) замещается смирнитом (Sm); г - сростание тетрадимита (Tdm), хедлейита (Hed) и пильзенита (Plz). Минералы: Q – кварц, Tb – теллуrowисмутит, Tdm – тетрадимит, Plz – пильзенит, Hed – хедлейит, Lil – лиллианит, Sm – смирнит, Au – самородное золото.

Рудопроявление Дывок. Руды прожилково-вкрапленные и массивные сульфидные с содержанием сульфидов до 15% (Анисимова и др., 2017; Кардашевская и др., 2021). В прожилково-вкрапленных рудах сульфиды представлены пиритом, арсенопиритом, сфалеритом, халькопиритом, теллуридами Ag, Bi, Pb, Ni, Pd, Pt. Продуктивность их связана с присутствием частиц самородного золота. По структурно-текстурным и минералогическим особенностям выделено четыре стадии минералообразования гипогенного этапа и один гипергенный этап: 1) золото-арсенопирит-пирит-кварцевая, 2) пирит-халькопирит-сфалеритовая, 3) кварц-буланжеритовая и 4) теллуридная.

Золото-арсенопирит-пирит-кварцевая стадия встречается в рудной зоне 1, 2 и 3. Ранний минерал стадии – пирит I, наблюдающийся в виде метакристаллов в срастании с кварцем I или включений в арсенопирите (рис. 6). Арсенопирит образует призматические кристаллы (до 3 мм) в ассоциации с кварцем I, кристаллизовался позже пирита I, так как постоянно содержит включения его кристаллов, нередко окаймляя выделения пирита, но чуть раньше кварца I, так как в нем он идиоморфен. Кварц отлагался в конце стадии в виде крупнозернистого агрегата, нарастающего на пирит I и арсенопирит, и содержащего их идиоморфные зерна. Самородное золото формирует комковидные и изометричные выделения в пирите I и арсенопирите, размером до 0,03 мм. Пробность золота – 630–820‰.

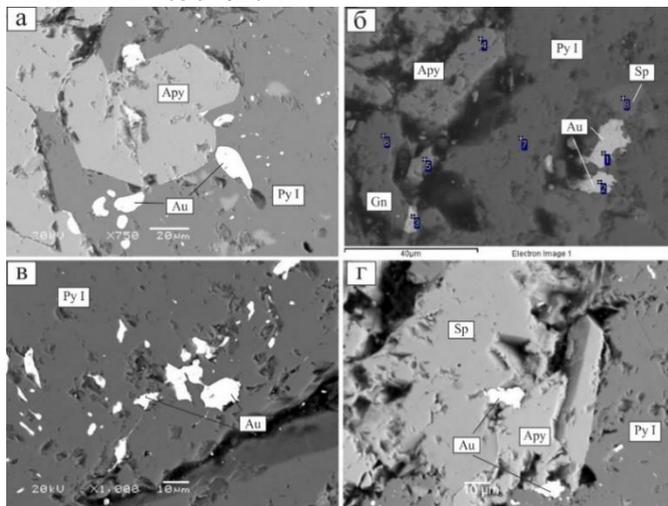


Рис. 6. Взаимоотношение минералов золото-арсенопирит-пирит-кварцевой стадии рудопроявления Дывок: а – ранний пирит I (Py I) в ассоциации с арсенопиритом (Ару) и кварцем I (Q); б – микропрожилок пирита II (Py II) секущий сфалерит (Sp); в – разнозернистые сферолиты пирита III (Py III); г – каймы позднего пирита IV (Py IV) вокруг пирита III.

Пирит-халькопирит-сфалеритовая стадия выполняет друзовые полости в кварце II и ранних сульфидах, реже наблюдаются явления пересечения и коррозии минералов арсенопирит-пирит-кварцевой стадии в рудной зоне 1 и 2. Сфалерит нередко содержит вкрапленность халькопирита III, располагающуюся вдоль трещин спайности сфалерита, реже наблюдающуюся в виде пятнообразных скоплений (рис. 7). Сфалерит обрастает зерна пирита I, кварца I и арсенопирита, иногда корродирует зерна последнего. Размер выделений сфалерита определяется размером друзовых полостей иногда достигает 4 мм. Пирит II наблюдается в виде микропрожилков, размером до 1,5 мм. Он находится в ассоциации со сфалеритом и халькопиритом I. Халькопирит I пересекает пирит I и арсенопирит вместе с кварцем II, и образует сростки со сфалеритом. Еще более редок галенит, также наблюдающийся в сростках со сфалеритом.

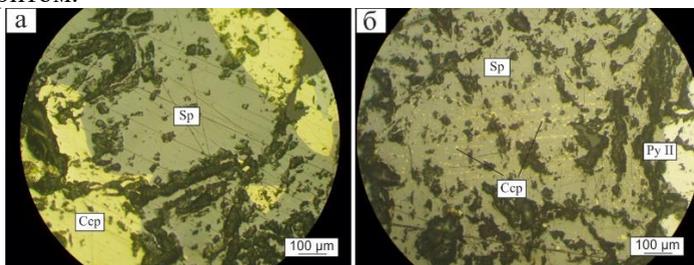


Рис. 7. Взаимоотношение минералов пирит-халькопирит-сфалеритовой стадии рудопроявления Дывок: а – секущий микропрожилок пирита II (Py II) в сфалерите (Sp); б – эмульсиевидная вкрапленность халькопирита II в сфалерите.

Кварц-буланжеритовая стадия встречается sporadически в рудной зоне 1, в котором буланжерит наблюдается в виде одиночных иголок в сростании с кварцем, реже наблюдается в ассоциации с галенитом (рис. 8).

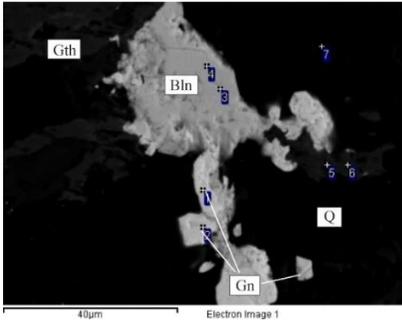


Рис. 8. Буланжерит и его соотношение с другими минералами рудопроявления Дывок. Срастание буланжерита (Bln) и галенита (Gn) в кварце (Q). Gth – гетит.

Теллуридная стадия образует тонкодисперсную вкрапленность в гетите, реже в пирротине, спорадически в пирите III и халькопирите III в рудной зоне 3 (рис. 9).

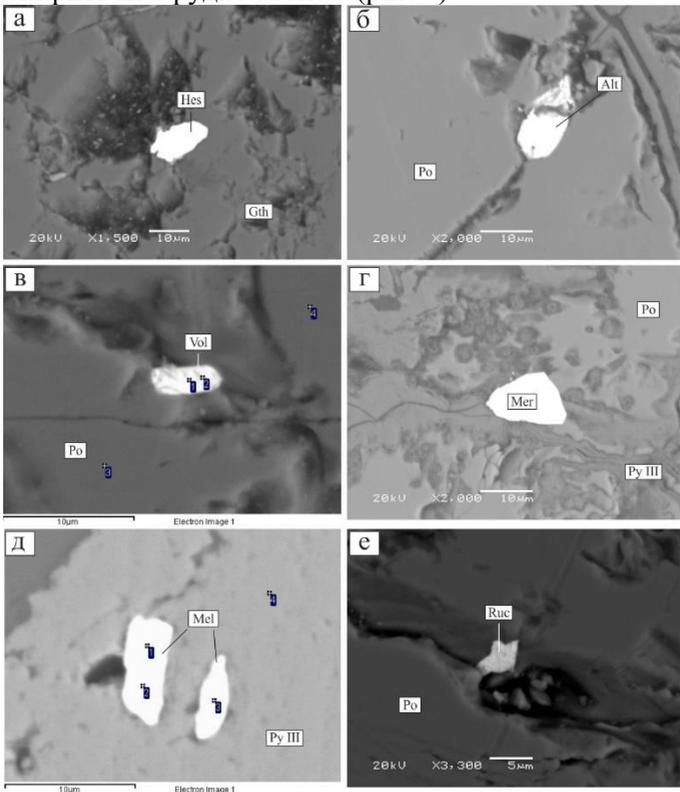


Рис. 9. Выделения теллуридов в сульфидах рудопроявления Дывок: а – включение гессита (Hes) в гетите (Gth); б – каплевидное выделение алтаита (Alt) в пирротине; в – включение вольтинскита (Vol) в пирротине; г – кристалл меренскиита

(Mer) в интерстициях зерен пирита III (Py III) и пирротина; д – выделение мелонита (Mel) в пирите III; е – включение раклиджита (Ruc) в пирротине.

ПОЛОЖЕНИЕ 2. Продуктивные (Au-Polym, Au-Bi-Tel) стадии минералообразования на месторождении Бодороно происходили из двух типов флюидов: 1) хлоридно-натриевого состава с низкой соленостью при среднетемпературных условиях (270–300° С) с присутствием CO₂ и CH₄ в газовой фазе, и 2) хлоридно-натрий-железо-магниевого состава на фоне некоторого понижения солености при низкотемпературных условиях (145–200° С) с присутствием CO₂, CH₄ и N₂ в газовой фазе. Золотоносная (Au-Apy-Py-Q) стадия минералообразования на рудопроявлении Дывок формировалась из флюида хлоридно-натрий-железо-магниевого состава с невысокой соленостью при среднетемпературных условиях (310–360° С) с присутствием CO₂ и CH₄ в газовой фазе.

На месторождении Бодороно в кварце двух минеральных стадий первичные включения подразделены на три типа: 1) однофазные (Г); 2) двухфазные (Г+Ж); и 3) трехфазные (Г+Ж_{CO2}+Ж_{H2O}) (рис. 10) (Кардашевская, Пономарева, 2021). Встречаются неправильные, вытянутые, округлые, с отрицательной формой огранки флюидных включений (ФВ), размером до 150 мкм.

Во включениях II типа золото-полиметаллической стадии температура гомогенизации в жидкую фазу составляет 270–300° С (рис. 11а). ФВ содержат NaCl раствор с концентрацией солей 2.6–5.0 мас. %-экв. NaCl (рис. 12). Жидкая углекислота (Ж_{CO2}) во включениях III типа гомогенизируется в газ при температурах 29–30° С. По данным Рамановской спектроскопии, газовая фаза ФВ III типа состоит из смеси CO₂ (68.4 мол. %) и CH₄ (31.6 мол. %).

Включения II типа в золото-висмут-теллуридной стадии гомогенизируются в жидкую фазу при низких температурах 145–200° С (рис. 11б). Они содержат солевой раствор NaCl с возможной примесью (FeCl₂ и MgCl₂) и концентрацией 1.9–3.4 мас. %-экв. NaCl (рис. 12). Ж_{CO2} во включениях III типа гомогенизируется в газ при T_{гом}=28–29°С. По данным Рамановской спектроскопии газовая составляющая ФВ III типа представлена CO₂ (95.2 мол. %), N₂ (2.9 мол. %) и CH₄ (1.9 мол. %).

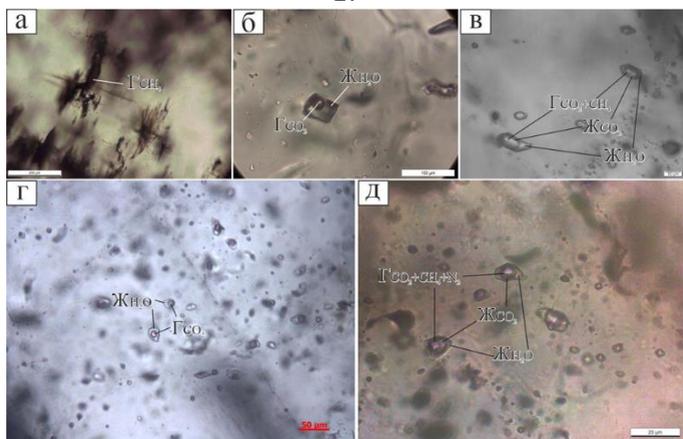


Рис. 10. Типы первичных включений в кварце из золото-полиметаллической (а–в) и золото-висмут-теллуридной (г–д) стадий месторождения Бодороно: а – однофазные; б, г – двухфазные; в, д – трехфазные. Г – газ, Ж – жидкость.

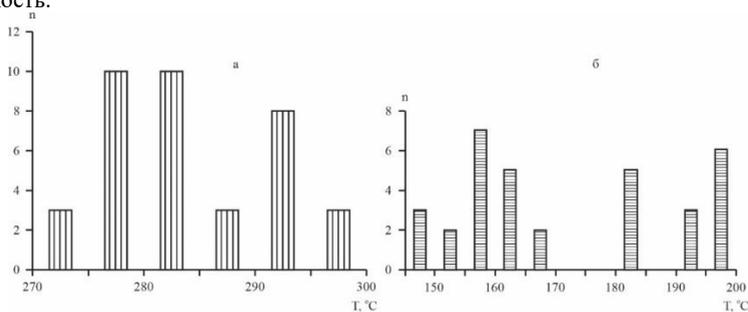


Рис. 11. Температуры гомогенизации ФВ продуктивных стадий месторождения Бодороно: а – золото-полиметаллическая, б – золото-висмут-теллуридная.

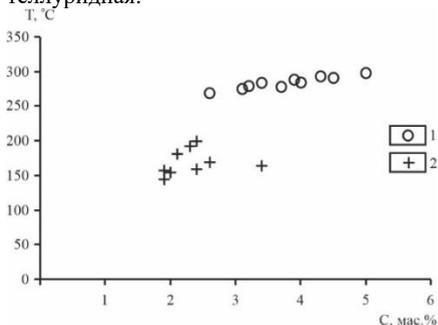


Рис. 12. Температура-концентрация включений продуктивных стадий месторождения Бодороно: 1 – золото-полиметаллическая, 2 – золото-висмут-теллуридная.

На рудопроявлении Дывок изучены первичные и первично-вторичные ФВ двух типов: 1) двухфазные (Г+Ж); и 2) трехфазные

(Г+Ж_{СО2}+Ж_{Н2О}) в кварце трех минеральных стадий (рис. 13) (Kondratieva et.al., 2021). Встречаются неправильные, вытянутые, округлые, с отрицательной формой огранки ФВ, размером до 100 мкм.

Во включениях II типа золото-арсенопирит-пирит-кварцевой стадии температура гомогенизации в жидкую фазу составляет 310–360° С и содержат NaCl±MgCl₂+FeCl₂ раствор с концентрацией солей 0.9–9.2 мас.%-экв. NaCl (рис. 14а, 15). Ж_{СО2} во включениях III типа гомогенизируется в газ при температурах 29,3–30,5° С. По данным Рамановской спектроскопии, в газовой фазе ФВ III типа абсолютно преобладает СО₂ (97.0 мол.%) и следы СН₄ (3.0 мол.%).

Включения II типа в пирит-халькопирит-сфалеритовой стадии гомогенизируются в жидкую фазу при низких температурах 170–227° С (рис. 14б). Они содержат раствор NaCl с концентрацией 3.9–6.0 мас.%-экв. NaCl (рис. 15). По данным Рамановской спектроскопии газовая составляющая ФВ III типа представлена СО₂ (95.9 мол.%) и СН₄ (4.1 мол.%).

Во включениях II типа теллуридной стадии температура гомогенизации в жидкую фазу составляет 160–213° С и содержат NaCl раствор с концентрацией солей 4.2–6.7 мас.%-экв. NaCl (рис. 14в, 15). Ж_{СО2} во включениях 3 типа гомогенизируется в газ при температурах 30,0–30,5° С. По данным Рамановской спектроскопии, в газовой фазе ФВ III типа состоит из смеси СО₂, СН₄ и N₂.

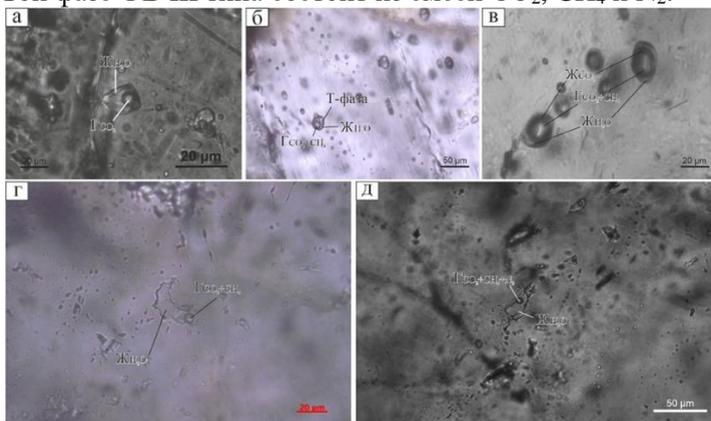


Рис. 13. Типы первичных и первично-вторичных ФВ в кварце золото-арсенопирит-пиритовой (а–в), пирит-халькопирит-сфалеритовой (г) и теллуридной (д) стадий рудопроявления Дывок: а, г, д – двухфазные; б, в – трехфазные. Г – газ, Ж – жидкость, Т-фаза – твердая фаза.

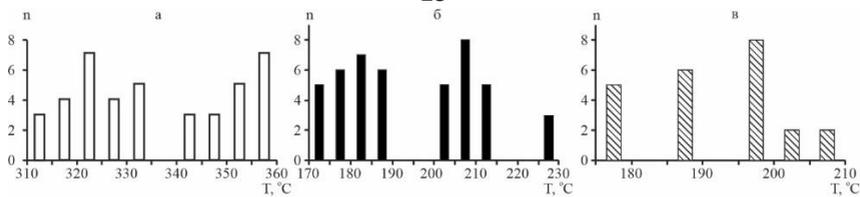


Рис. 14. Температуры гомогенизации ФВ для трех минеральных стадий рудопоявления Дывок: а – золото-арсенопирит-пирит-кварцевая, б – пирит-халькопирит-сфалеритовая, в – теллуридная.

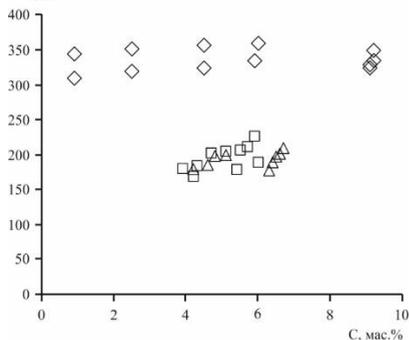


Рис. 15. Диаграмма температура-концентрация для флюидных включений трех минеральных стадий рудопоявления Дывок: 1 – золото-арсенопирит-пирит-кварцевая, 2 – золото-пирит-халькопирит-сфалеритовая, 3 – теллуридная.

ПОЛОЖЕНИЕ 3. Изотопные характеристики Рв месторождения Бодороно указывают на мантийно-коровый источник рудного вещества. Возраст дорудных метасоматитов составляет 150 млн лет ($^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$). Узкий интервал значений изотопного состава S сульфидов (2.9–4.5%) рудопоявления Дывок характеризует единый магматический (мантийный) источник рудного вещества. Золотое оруденение сформировалось в аптское время (125 млн лет, $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$) и соотносится с раннемеловым этапом тектоно-магматической активизации Алданского щита.

Оценка источника вещества для месторождения Бодороно проводилась с помощью анализа изотопного свинца в сульфидах кварцевых жил (Кардашевская и др., 2021). Для сравнения использованы данные для месторождения Бамское и рудопоявления Петровское, которые локализованы в докембрийских толщах в Алдано-Становом щите (Неймарк и др., 1996).

Изотопный состав свинца варьирует в диапазонах: $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ – 16.40–18.58; $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ – 15.29–15.63; $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ – 36.23–38.87. Соотношения изотопов свинца ^{206}Pb , ^{204}Pb и ^{207}Pb в сульфидах месторождения Бодороно (Kramers, Tolstikhin, 1997) попадают в поле смешанного мантийно-корового источника (рис. 16). Точки

сульфидов месторождения Бамское приурочены к деплетированной мантии. Проявление Петровское напротив тяготеет к эволюционной кривой континентальной коры. Тогда как изотопные характеристики Pb в сульфидах месторождения Бодороно расположены между коровой и мантийной эволюционной кривой, что может предполагать о смешанном мантийно-коровом источнике вещества.

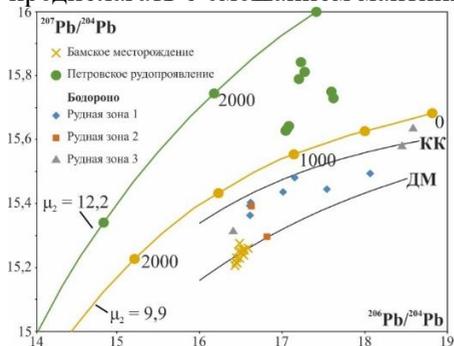


Рис. 16. Pb-Pb диаграммы для сульфидов месторождения Бодороно. На диаграммах приведены тренды изотопной эволюции Pb в деплетированной мантии (ДМ) и континентальной коре (КК) (Kramers, Tolstikhin, 1997). На диаграмме показаны Pb-Pb данные месторождений Бамское и Петровское (Неймарк и др., 1996).

Для оценки источника вещества рудопроявления Дывок был проанализирован изотопный состав серы в сульфидах кварцевых жил. Для сравнения использованы данные, полученные для месторождений Центрально-Алданского рудного района (Бойцов и др., 2006; Кочетков, 2006; Добровольская и др., 2016; Борисенко и др., 2017; Гузев и др., 2021 и др.).

Изотопный состав серы $\delta^{34}\text{S}$ в сульфидах проявления Дывок для пирротина из рудной зоны 3 составляет +2.9‰; для пирита и сфалерита $\delta^{34}\text{S} = +4.5\%$ из рудной зоны 4 и 1 (рис. 17) (Кардашевская и др., 2021). Утяжеленный состав сульфидов кварцевых жил может указывать на единый гидротермальный источник магматического характера (Ohmoto, 1986). Значения $\delta^{34}\text{S}$ сульфидов проявления Дывок отличаются от приведенных месторождений, занимают положение близкое к нулю и попадают в интервал значений мантийно-магматического источника.

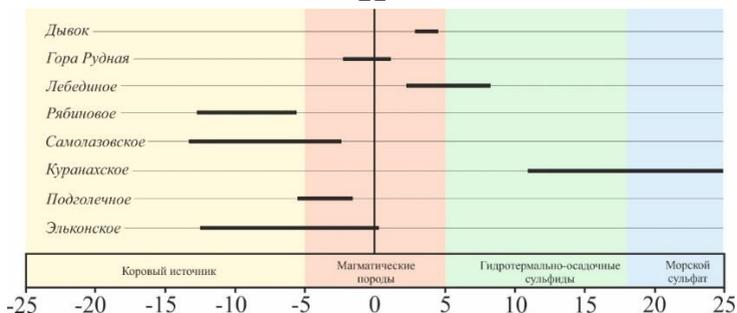


Рис. 17. Изотопный состав серы сульфидов проявления Дывок и золоторудных месторождений Центрально-Алданского рудного района (по Гузеву и др., 2021 с изменениями и дополнениями автора).

Полученные данные по $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ датированию позволяют нам определить возраст дорудного метасоматоза (150 млн лет) и рудной минерализации (125 млн лет) Алгоминского рудного узла, близкий к событию позднемезозойской тектоно-магматической активизации. Помимо результатов данного исследования, опубликованы другие геохронологические данные для Алдано-Станового щита, имеющие близкий (155–125 млн лет) возраст: Эльконское (155–140 млн лет) (Мигута, 2001), Самолазовское (<127 млн лет) (Борисенко и др., 2017), Бамское (129 млн лет) (Моисеенко и др., 1997), Рябиновое (125–139 млн лет) (Шатова и др., 2019), Кировское (126–131 млн лет) (Моисеенко и др., 1999) и др.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования позволили сделать следующие выводы:

На золоторудном *месторождении Бодороно* выделены три минеральные стадии гипогенного этапа: 1) ранняя – пирит-пирротин-кварцевая; 2) промежуточная – золото-полиметаллическая со среднепробным золотом (до 870‰); и 3) поздняя – золото-висмут-теллуридная с высокопробным золотом (до 940‰) и один гипергенный этап. На *рудопроявлении Дывок* выделено четыре минеральные стадии: 1) золото-арсенопирит-пирит-кварцевая с низко-среднепробным золотом (до 820‰); 2) пирит-халькопирит-сфалеритовая; 3) кварц-буланжеритовая; и 4) теллуридная. На обоих объектах Алгоминского узла развита наложенная поздняя теллуридная минерализация. Отличие заключается в видовом составе теллуридов. В рудах месторождения Бодороно присутствуют

только теллуриды (селениды) Vi , а в рудах проявления Дывок развиты теллуриды Ag , Bi , Ni , Pb и Pd . По принятой нами типизации месторождений с теллуридной минерализацией Бодороно относится к - Au-Bi-Te , а рудопроявление Дывок - к Au-Ag-Bi-Te смешанному типу.

На месторождении Бодороно самородное золото, в основном, связано с полиметаллической и висмут-теллуридными стадиями. В рудах проявления Дывок видимое самородное золото отмечается спорадически, золото, преимущественно, тонкодисперсное. Об этом свидетельствует золотоносность пирита, арсенопирита и сфалерита по данным анализов.

На месторождении Бодороно арсенопирит отсутствует, в то время как на рудопроявлении Дывок он один из главных минералов. Галенит Бодороно - один из концентраторов золота, а на Дывке – он второстепенный минерал. Также в рудах проявления Дывок появляется буланжерит.

Продуктивные минеральные стадии на *месторождении Бодороно* Алгоминского рудного узла образовались из двух типов флюидов: 1) хлоридно натриевого состава со среднетемпературными ($270\text{--}300^\circ\text{C}$) значениями и низкой соленостью (2.6–5.0 мас.%-экв. NaCl). В составе газовой фазы присутствуют CO_2 (68.4 мол.%) и CH_4 (31.6 мол.%) и 2) хлоридно натриевого состава с примесью FeCl_2 и MgCl_2 при низкотемпературных ($145\text{--}200^\circ\text{C}$) условиях и более пониженной концентрацией солей (1.9–3.4 мас.%-экв. NaCl) с газовой составляющей CO_2 (95.2 мол.%), N_2 (2.9 мол.%) и CH_4 (1.9 мол.%). Минеральные стадии на *рудопроявлении Дывок* формировались из трех типов флюидов: 1) хлоридно натрий-железо-магниевого состава при среднетемпературных ($310\text{--}360^\circ\text{C}$) значениях с соленостью (0.9–9.2 мас.%-экв. NaCl). В составе газовой фазы присутствуют CO_2 (97 мол.%) и CH_4 (3 мол.%), содержит давсонит ($\text{NaAlCO}_3(\text{OH})_2$) и самородную серу в твердой фазе и карбонат ион (CO_3^{2-}) в составе водного раствора; 2) хлоридно натриевого состава при низкотемпературных ($170\text{--}227^\circ\text{C}$) условиях и концентрацией солей (3.9–6.0 мас.%-экв. NaCl), с составом газовой фазы CO_2 (95.9 мол.%), CH_4 (4.1 мол.%) и 3) хлоридно натриевого состава при низкотемпературных ($160\text{--}213^\circ\text{C}$) значениях с соленостью (4.2–6.7 мас.%-экв. NaCl). В составе газовой фазы присутствуют CO_2 , CH_4 и N_2 .

Изотопные характеристики Рb указывают на то, что рудное вещество на месторождении Бодороно связано с мантийно-коровым источником. Узкий интервал значений изотопного состава S сульфидов рудопроявления Дывок указывает на единый магматический источник вещества. Возраст предрудных метасоматитов для Бодороно составляет 150 млн лет. Возраст золотого оруденения Дывок оценивается в 125 млн лет.

Полученные результаты могут быть использованы при прогнозировании объектов-аналогов на территории Алдано-Станового щита.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Список публикаций, входящих в журналы ВАК

1. Анисимова Г.С., Соколов Е.П., Кардашевская В.Н. Золоторедкометалльное (Au-Mo-Bi-Te) оруденение Верхнеалгоминского золотоносного района (Южная Якутия) //Отечественная геология. 2017. №5. С.12–22.

2. Кардашевская В.Н., Анисимова Г.С., Баданина Е.В., Бочаров В.Н., Пономарева Н.И. Условия образования золоторудного месторождения Бодороно, Саха (Якутия) //Записки РМО. 2020. Т.149. №3. С.96–110.

3. Кардашевская В.Н., Пономарева Н.И. Условия формирования сульфидной минерализации месторождения Бодороно (Южная Якутия): термодинамический аспект / Записки РМО. 2021. Т.150. №3. С.114–129.

4. Kondratieva L.A., Anisimova G.S., Kardashevskaja V.N. Types of tellurium mineralization of gold deposits of the Aldan Shield (Southern Yakutia, Russia) //Minerals, 2021. V.11. P.698.

Другие публикации

1. Кардашевская В.Н., Баданина Е.В., Пономарева Н.И., Анисимова Г.С., Бочаров В.Н. Физико-химические параметры золото-сульфидной ассоциации месторождения Бодороно (Южная Якутия) /Материалы XVII Всероссийской конференции по термобарогеохимии посвященной 80-летию со дня рождения д-ра геол.-минерал.наук Ф.Г.Рейфа (1936-2008). С. 73-75.

2. Кардашевская В.Н., Баданина Е.В., Пономарева Н.И., Анисимова Г.С., Бочаров В.Н. Условия формирования золото-сульфидного оруденения месторождения Бодороно (Южная Якутия)

/Сборник материалов VI Российской молодежной научно-практической Школы с международным участием «Новое в познании процессов рудообразования». С.139–140.

3. **Кардашевская В.Н.**, Анисимова Г.С., Баданина Е.В., Власенко Н.С., Шиловских В.В. Золотоносные минеральные ассоциации месторождения Бодороно (Южная Якутия) /Юбилейный съезд Российского минералогического общества «200 лет РМО». Материалы конференции. 2017. Т.2. С.86–87.

4. Анисимова Г.С., Кондратьева Л.А., **Кардашевская В.Н.** Золото-теллур-висмутовые минеральные ассоциации в золоторудных месторождениях (Якутия) /Юбилейный съезд Российского минералогического общества «200 лет РМО». Материалы конференции. 2017. Т.2. С.48–50.

5. Анисимова Г.С., Соколов Е.П., **Кардашевская В.Н.** Золото-редкометалльное (Au-Mo-Bi-Te) оруденение Верхнеалгоминского района (Южная Якутия) /Геология и минерагения Северной Евразии, материалы совещания, приуроченного к 60-летию Института геологии и геофизики СО АН СССР. 2017. С.18–19.

6. **Кардашевская В.Н.**, Анисимова Г.С. Особенности формирования золоторудного месторождения Бодороно (Южная Якутия) /Геология и минерально-сырьевые ресурсы Северо-Востока России: материалы VIII Всероссийской научно-практической конференции. 2018. Т.1. С.57–61.

7. **Kardashevskaja V.N.**, Anisimova G.S. Mineralogical-geochemical characteristics and the formation conditions of Dyvok ore occurrence (South Yakutia, Russia) /18th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2018, Conference proceedings, vol. 18. P.259–264.

8. Анисимова Г.С., **Кардашевская В.Н.** Золото-теллур-висмутовое оруденение Южно-Алданской металлогенической зоны (Южная Якутия) /Материалы Международной научно-технической конференции «Интеграция науки и практики как механизм эффективного развития геологической отрасли Республики Узбекистан». 2018. С.150–153.

9. **Kardashevskaja V.**, Anisimova G., Badanina E. Mineralogy and conditions of formation of gold-arsenopyrite-pyrite-quartz association of the Dyvok ore occurrence (South Yakutia, Russia) /ACROFI VII. 2018. Abstract volume. P.68–69.

10. **Кардашевская В.Н.**, Анисимова Г.С. Теллуриды Pd, Ni, Bi, Pb и Ag /Геология и минерально-сырьевые ресурсы Северо-Востока России: материалы VIII Всероссийской научно-практической конференции. 2019. Т.1. С.32–35.

11. **Kardashevskaja V.**, Anisimova G., Badanina E. New data on the formation conditions of the Dyvok ore occurrence (South Yakutia, Russia) / ACTA Mineralogica-Petrographica. Abstract series. 2019. V.10. P.56.

12. **Kardashevskaja V.N.**, Anisimova G.S. New data on the formation conditions of the Dyvok ore occurrence (South Yakutia, Russia) / IOP Conference Series: Earth and environmental science. The conference proceedings WMESS. 2019. 012081.

13. Анисимова Г.С., **Кардашевская В.Н.** Формы нахождения теллура и селена в рудах золоторудного месторождения Бодороно (Южная Якутия) /Геология и минерально-сырьевые ресурсы Северо-Востока России: материалы VIII Всероссийской научно-практической конференции. 2020. С.13–16.

14. **Кардашевская В.Н.**, Анисимова Г.С. Данные об изотопном составе серы и осмия сульфидов рудопроявления Дывок (Верхнеалгоминский район, Южная Якутия) /Геология и минерально-сырьевые ресурсы Северо-Востока России: материалы VIII Всероссийской научно-практической конференции. 2021. С.164–165.

15. Кондратьева Л.А., Анисимова Г.С., Кардашевская В.Н. Эпитермальная минерализация Алданского щита (Южная Якутия) /Материалы международной научной конференции, посвящённой 100-летию со дня рождения акад. АН Руз И.Х. Хамрабаева. Т.: Изд-во “Lesson Press”, 2021. С.93-97.

16. Кардашевская В.Н., Анисимова Г.С., Баданина Е.В., Пономарева Н.И., Бочаров В.Н., Саватенков В.М. Условия образования Алгоминского рудного узла /В сборнике: X Российской молодежной науч.-практ. Школы с межд. участием. М. 2021. С.131–135.

17. Кондратьева Л.А., Анисимова Г.С., **Кардашевская В.Н.** Теллуридная минерализация золоторудных месторождений Алданского щита /XIII Съезд РМО «Минералогия во всем пространстве сего слова: Проблемы развития минерально-сырьевой базы и рационального использования минерального сырья». В печати.