

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт геологии алмаза и благородных металлов
Сибирского отделения Российской академии наук

На правах рукописи



КУДРИН МАКСИМ ВАСИЛЬЕВИЧ

**СТРУКТУРА, МИНЕРАЛОГИЯ И УСЛОВИЯ
ОБРАЗОВАНИЯ ОРОГЕННОГО ЗОЛОТОРУДНОГО
МЕСТОРОЖДЕНИЯ ХАНГАЛАС,
ЯНО-КОЛЫМСКИЙ МЕТАЛЛОГЕНИЧЕСКИЙ ПОЯС**

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

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата геолого-минералогических наук

Якутск – 2022

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте геологии алмаза и благородных металлов Сибирского отделения Российской академии наук

Научный руководитель: **Фридовский Валерий Юрьевич**,
член-корреспондент РАН, профессор,
доктор геолого-минералогических наук,
директор ИГАБМ СО РАН

Официальные оппоненты: **Волков Александр Владимирович**,
член-корреспондент РАН,
доктор геолого-минералогических наук,
заведующий лабораторией геологии
рудных месторождений
им. академика А.Г. Бетехтина ИГЕМ РАН

Глухов Антон Николаевич,
кандидат геолого-минералогических
наук, старший научный сотрудник
лаборатории петрологии, изотопной
геохронологии и рудообразования
СВКНИИ ДВО РАН им. Н.А. Шило

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение «Центральный научно-исследовательский геологоразведочный институт цветных и благородных металлов» (ФГБУ ЦНИГРИ)

Защита состоится «21» февраля 2023 г. в 15:00 ч. на заседании диссертационного совета 24.2.364.02 в Российском государственном геологоразведочном университете имени Серго Орджоникидзе по адресу: 117997, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, дом 23, аудитория 473.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Российского государственного геологоразведочного университета имени Серго Орджоникидзе и на сайте: <http://mgri.ru/>.

Автореферат разослан: «__» _____ 2022 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор геол.-минерал. наук



С.Д. Ганова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Ольчан-Нерская зона Яно-Колымского металлогенического пояса (Северо-Восток Якутии) является перспективной территорией на обнаружение крупных коренных месторождений золота. Здесь известны богатые россыпи с крупными самородками золота, эксплуатирующиеся с 30-х годов XX века по настоящее время (Рожков и др., 1971; Goryachev, Pirajno, 2014; Fridovsky, 2018), однако сопоставимых по масштабам коренных месторождений золота до сих пор не обнаружено. Источниками россыпей территории предполагаются орогенные золоторудные месторождения и проявления. Эталонным объектом данного типа месторождений золота в юго-восточной части Ольчан-Нерской металлогенической зоны является месторождение Хангалас (Fridovsky et al., 2018), в пределах которого в последние годы проводились разведочные работы. Изучение структуры, минералого-геохимического и изотопного состава, условий рудообразования, а также золотоносности жильно-прожилкового и вкрапленного типа оруденения позволяет разработать геолого-генетическую модель формирования оруденения и выделить прогнозно-поисковые критерии месторождения Хангалас, что может быть использовано для повышения эффективности развития минерально-сырьевой базы рудного золота и выбора направлений поисковых работ на Северо-Востоке Якутии.

Целью работы является разработка геолого-генетической модели формирования и прогнозно-поисковых критериев золотого оруденения месторождения Хангалас на основе изучения полидеформированных рудоконтролирующих структур, минералого-геохимических, изотопно-геохимических, изотопно-геохронологических характеристик жильно-прожилкового и вкрапленного золотого оруденения.

Задачи работы:

1. Установить структурные условия локализации золотого оруденения, реконструировать тектонические поля напряжений и их эволюцию по анализу золотоносных жильно-прожилковых тел и трещиноватости.
2. Изучить минеральный состав руд, выявить типоморфные характеристики и последовательность формирования минералов различных ассоциаций и установить их связь с развитием структуры месторождения.
3. Определить изотопный состав S, Re, Os рудных и O, He, Ag жильных минералов и изотопный возраст золотого оруденения.
4. Установить РТХ-параметры рудообразования.
5. Разработать геолого-генетическую модель формирования и выделить прогнозно-поисковые критерии золотого оруденения.

Личный вклад, фактический материал и методы исследований. В основу диссертации положены материалы, полученные лично автором при проведении полевых (2005, 2014, 2017-2019 гг.) и камеральных работ в ходе выполнения государственных заданий ИГАБМ СО РАН, гранта РФФИ мол_а

и НИР по Государственному контракту. Автором проведено детальное структурное картирование, собран фактический материал из естественных обнажений и горных выработок месторождений Хангалас и Нагорное, рудопроявлений Двойное, Амбир, Клич-Контрольное, Ожидание, участков Мудекен и Двойной Хангаласского рудного узла.

При подготовке диссертации использован обширный фактический материал. Выполнено большое количество замеров деформационных структур (более 2000 замеров). Горные породы, руды и минералы (218 образцов) изучены в полированных аншлифах (126 штук), прозрачно-полированных шлифах (98 штук) и препаратах эпоксидных шашек с зернами сульфидов (15 штук, 150 зерен). Микронзондовый рентгеноспектральный, рентгенофазовый и атомно-абсорбционный анализы проведены в ИГАБМ СО РАН. Микроэлементный LA-ICP-MS анализ состава пирита и арсенопирита (9 зерен) проведен в ИМин УрО РАН, г. Миасс. Изотопный состав благородных газов в газовой-жидких включениях из кварца (1 проба) и Re-Os изотопно-геохронологические исследования самородного золота (1 проба) определены в ФГБУ ВСЕГЕИ, г. Санкт-Петербург. Компьютерные микротомографические исследования пиритов (8 зерен) и арсенопиритов (7 зерен) сделаны в Научном парке СПбГУ, г. Санкт-Петербург. Измерения $\delta^{34}\text{S}$ сульфидов (16 анализов) и $\delta^{18}\text{O}$ кварца (5 анализов) выполнены в ДВГИ ДВО РАН, г. Владивосток. Микротермометрические исследования флюидных включений в кварце (36 анализов) проведены в СВКНИИ ДВО РАН, г. Магадан.

Защищаемые положения.

1. Строение месторождения Хангалас определяется позднеюрско-меловыми структурными парагенезами трех последовательных деформационных этапов: взбросо-надвигового D1, левосдвигового D2 и правосдвигового D3. Золотое оруденение образовалось на этапе D1 при региональной юго-запад–северо-восточной ориентировке оси сжатия.

2. На месторождении выделены пять последовательных парагенетических ассоциаций гидротермального минералообразования: ранняя метасоматическая пирит-арсенопирит-кварцевая, жильные пирит-арсенопирит-кварцевая, золото-полисульфидно-кварцевая, сульфосольно-карбонатная и поздняя серебро-кварцевая. В околорудных метасоматитах установлен вкрапленный тип минерализации с золотоносными пиритом-3 и арсенопиритом-1, имеющими нестехиометрический состав. В пирите-3 с избытком Fe и недостатком S концентрация структурно-связанного Au^+ прямо пропорциональна его мышьяковистости.

3. Гидротермальное золотое оруденение месторождения Хангалас формировалось на малых глубинах, в среднетемпературных условиях с участием низкоконцентрированных глубинных магматических флюидов в валанжинское время (около 137 млн лет назад) в связи с позднеорогенными процессами в Кулар-Нерском террейне.

Научная новизна.

1. Впервые систематизированы деформационные структуры Хангаласского рудного узла, реконструированы поля тектонических напряжений, определены структурные условия локализации золотого оруденения.

2. Установлены минеральные ассоциации и последовательность минералообразования в связи с развитием структуры месторождения Хангалас.

3. Впервые установлена золотоносность вкрапленной пирит-арсенопиритовой минерализации околорудных метасоматитов месторождения Хангалас, определена ее природа и форма нахождения «невидимого» золота.

4. Показано широкое развитие гипергенных процессов, обнаружены два неизвестных гипергенных минерала.

5. Оценены РТХ-параметры рудообразования и определены источники рудного вещества и флюидов, участвовавших в формировании золотого оруденения месторождения.

6. Разработана геолого-генетическая модель формирования орогенного золотого оруденения месторождения Хангалас.

7. Выделены прогнозно-поисковые критерии орогенного золотого оруденения, что может быть использовано для развития минерально-сырьевой базы рудного золота в регионе.

Практическая значимость. Полученные автором результаты могут иметь практическое значение для ведения прогнозно-поисковых работ и повышения эффективности освоения золоторудных месторождений не только в Ольчан-Нерской зоне Верхне-Индигирского сектора Яно-Колымского металлогенического пояса, но и в целом на Северо-Востоке Якутии. Установленная золотоносность околорудных метасоматитов месторождения позволяет значительно увеличить запасы золота. Преобладание структурно-связанной формы «невидимого» золота Au^+ в сульфидах необходимо учитывать при выборе технологии переработки руд. Полученные результаты также могут быть использованы при проведении учебных занятий на геологоразведочном факультете СВФУ им. М.К. Аммосова.

Апробация. Результаты исследований докладывались на 10 международных и всероссийских конференциях и симпозиумах, в том числе: на Всероссийской научно-практической конференции «Геология и минерально-сырьевые ресурсы Северо-Востока России» (ИГАБМ СО РАН, СВФУ, Якутск, 2015, 2017, 2018, 2020, 2021, 2022 г.), в «The 2019 International Symposium on Low Temperature Mineralization» (Институт геохимии КАН, Гуйян, Китай, 2019 г.), в «15th Quadrennial International Association on the Genesis of Ore Deposits Symposium» (IAGOD, Сальта, Аргентина, 2018 г.), на 8-й Российской молодежной научно-практической

школе с международным участием «Новое в познании процессов рудообразования» (ИГЕМ РАН, Москва, 2018 г.), на международной научно-практической конференции молодых ученых и специалистов памяти академика А.П. Карпинского (ВСЕГЕИ, Санкт-Петербург, 2017 г.). По теме диссертации опубликовано 27 работ в российских и зарубежных изданиях. Основные выводы (защищаемые положения) диссертационной работы приведены в 3 статьях в журналах, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы и приложений, объем работы – 210 страниц. Она содержит 17 таблиц, 96 рисунков, 2 приложения; список литературы включает 336 наименований. Защищаемое положение №1 раскрыто в главе 3, положение №2 – в главе 4, положение №3 – в главе 5.

В *первой главе* приведены общие сведения и развитие представлений о геологическом строении и рудоносности Хангаласского рудного узла (ХРУ), описаны типы золоторудных месторождений, развитые в пределах Верхне-Индигирского сектора Яно-Колымского металлогенического пояса. Во *второй главе* рассмотрены методы исследований, использованные при подготовке диссертации. В *третьей главе* изложены результаты структурно-тектонических исследований в ХРУ. Описаны строение рудных объектов, ключевые структурные парагенезисы и эволюция развития деформационных структур рудного узла в связи с региональными геологическими процессами в Кулар-Нерском террейне. Определено место рудного процесса в эволюции деформационных структур, показано широкое проявление пострудных сдвигов. В *четвертой главе* приводятся результаты минералого-геохимических исследований месторождения Хангалас, показаны типоморфные особенности минералов различных этапов и стадий минералообразования. Приводятся сведения о золотоносности сульфидов из околорудных пирит-арсенопирит-серицит-карбонат-кварцевых метасоматитов и форме нахождения «невидимого» золота в сульфидах. В *пятой главе* рассмотрены результаты изотопно-геохимических и изотопно-геохронологических исследований, определен возраст золотого оруденения, обсужден вклад в рудообразующую систему мантийно-коровых источников. Построена геолого-генетическая модель формирования и выделены прогнозно-поисковые критерии золотого оруденения.

Благодарности. Автор признателен своему научному руководителю, член-корреспонденту РАН В.Ю. Фридовскому за оказанное доверие, постоянную поддержку, ценные и конструктивные советы, помощь в подготовке диссертации. Автор благодарит канд. геол.-минер. наук Л.И. Полуфунтикову за ее неоценимый вклад в помощь в исследовании минералого-геохимических аспектов диссертации и поддержку научных идей, ведущего инженера Я.А. Тарасова за участие в отборе и обработке проб, канд. геол.-минер. наук Г.С. Анисимову за полезные консультации, безвременно ушедшего канд. геол.-минер. наук А.И. Зайцева за бесценные советы, добрые пожелания в подготовке диссертации и научной деятельности

в целом, доктора геол.-минер. наук Г.Н. Гамянина за советы и готовность помочь в любое время. Автор признателен коллегам, канд. геол.-минер. наук Н.В. Заякиной, канд. биол. наук Т.И. Васильевой, вед. инженеру Н.Н. Емельяновой за совместные исследования гипергенной минерализации и изучение неизвестных минералов.

Автор благодарен сотрудникам Лаборатории геологии и минералогии благородных металлов ИГАБМ СО РАН, доктору геол.-минер. наук А.В. Костину, доктору геол.-минер. наук З.С. Никифоровой за поддержку, всему коллективу Отдела физико-химических методов анализа ИГАБМ СО РАН за помощь в проведении аналитических исследований и работникам шлифовальной мастерской. Автор признателен водителю И.В. Никифорову за помощь в проведении экспедиционных работ.

Благодарность автор приносит канд. геол.-минер. наук Е.Е. Коловой (СВКНИИ ДВО РАН, г. Магадан) за помощь в изучении флюидных включений в кварце, доктору геол.-минер. наук Т.А. Веливецкой (ДВГИ ДВО РАН, г. Владивосток) за сотрудничество в проведении изотопных исследований, канд. геол.-минер. наук Л.Ю. Крючковой (СПбГУ, г. Санкт-Петербург) за совместную работу в изучении минералов методом компьютерной микротомографии, канд. геол.-минер. наук В.В. Аристову (ИГЕМ РАН, г. Москва) и Д.А. Артемьеву (Институт минералогии УрО РАН, г. Миасс) за помощь в проведении LA-ICP-MS микроэлементного анализа сульфидов. Автор выражает признательность всем соавторам, которые участвовали в исследовании. Автор выражает благодарность Ю.П. Собынину, Ю.И. Смолинову, Г.А. Рыковой за помощь в проведении полевых исследований.

Отдельную благодарность автор выражает своей любимой жене Татьяне за постоянную поддержку в выполнении исследований, терпение и понимание.

ОБОСНОВАНИЕ ЗАЩИЩАЕМЫХ ПОЛОЖЕНИЙ

Первое защищаемое положение. *Строение месторождения Хангалас определяется позднеюрско-меловыми структурными парагенезами трех последовательных деформационных этапов: взбросо-надвигового D1, левосдвигового D2 и правосдвигового D3. Золотое оруденение образовалось на этапе D1 при региональной юго-запад–северо-восточной ориентировке оси сжатия.*

Хангаласский рудный узел расположен в юго-восточной части Кулар-Нерского террейна центральной части Верхояно-Колымской складчатой области (Рисунок 1, врезка) (Тектоника..., 2001). Положение месторождений и проявлений Хангаласского рудного узла определяется продольными разрывными нарушениями в своде Нерского антиклинория, представленного здесь Хангаласской и Двойной антиклиналями (Рисунок 1-3). Оруденение на месторождении локализуется в пяти протяженных до 1400 м рудных зонах (Северная, Промежуточная, Центральная, Южная, Зимняя) с межпластовыми

и секущими кварцевыми жилами мощностью 0.1-1 м, в раздувах до 5 м (Рисунок 2). Мощность зон до 32 м, падение изменяется от юго-западного до южного и юго-восточного под углами от 30-50° до 70-80°. Простираение рудных зон от северо-западного до субширотного, на отдельных отрезках до северо-восточного. Запасы и ресурсы золота месторождения составляют более 9 т при среднем содержании 3.9 г/т (<https://www.vedk.com/assets/resources>). Статистический анализ залегания кварцевых жил и прожилков позволил выделить на стереографических проекциях 4 системы (Рисунок 2, диаграммы). Жилы системы V11 имеют выдержанные параметры, залегают согласно вмещающим породам и межпластовым зонам дробления. Кварцевые жилы системы V12 согласны простираению слоистости и рудных зон, но падают в противоположном направлении. Жилы V12 развиты в пластах песчаников, характеризуются невыдержанной мощностью. Широко проявлены пологопадающие жилы системы V13 различного простираения. Система жил V14 ориентируется согласно плоскости сжатия и растяжения σ_3/σ_1 . На отдельных участках развития всех систем формируются линейные штокверки. Установленные взаимоотношения деформационных элементов ХРУ свидетельствуют об их формировании в ходе трех деформационных событий – ранних прогрессивных складчато-надвиговых D1, поздних лево- D2 и праводвиговых D3 (Таблица 1).

Этап D1 характеризуется развитием прогрессивных деформаций во взбросо-надвиговом поле тектонических напряжений в поздней юре – начале раннего мела при фронтальной аккреции/коллизии Колымо-Омолонского супертеррейна и восточной окраины Сибирского кратона (Таблица 1). Вначале формируются сжатые и изоклиналильные складки F1 C3 простираения, межслоевые срывы на контактах пород с контрастными физико-механическими свойствами и ramпы. Минерализация представлена редкими рассеянными по площади не золотоносными жилами кварц-хлоритового или кварц-хлорит-кальцитового состава. Далее при прогрессивных взбросо-надвиговых деформациях D1 ранние межслоевые срывы трансформируются в надвиги. Происходит формирование линейных открытых и сжатых складок F1 концентрического типа с преобладающим C3 простираением кливажа осевой плоскости. В крыльях рудных зон образуются складки F1 сжатые до изоклиналильных, нередко опрокинутые в соответствии с ЮЗ направлением транспорта пород. На крыльях складок F1 проявлены борозды скольжения, ориентированные по падению пород и будинаж-структуры, параллельные их шарнирам. Образуются гранитоиды и дайки комплекса малых интрузий (Фридовский и др., 2022), зарождаются орогенные рудообразующие системы. Происходит формирование орогенной жильной, жильно-прожилковой и вкрапленной золоторудной минерализации. Рудные тела локализуются в зонах смятия и дробления, в замках складок (седловидные жилы), пластах песчаников (жильно-прожилковые и вкрапленные тела).

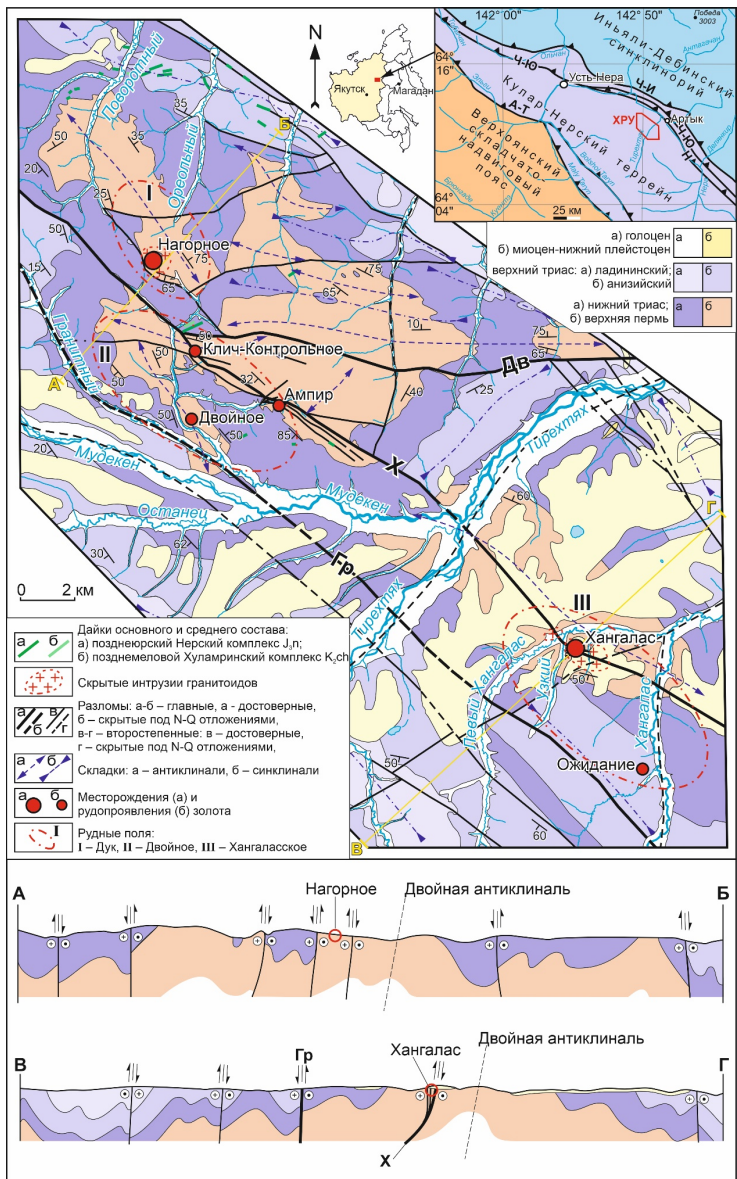


Рисунок 1 – Схема геологического строения, разрезы, положение золоторудных объектов Хангаласского рудного узла. На врезке показано положение рудного узла. Рудоконтролирующие разломы: Гр – Гранитный, X – Хангаласский, Дв – Двойной. На врезке показано положение рудного узла, региональные разломы: Ч-И – Чаркы-Индигирский, Ч-Ю – Чай-Юреинский, Н – Нерский, А-Т – Адыча-Тарынский.

Статистический анализ положения золотоносных кварцевых жил и трещиноватости позволил установить *связь оруденения со взбросо-надвиговым полем тектонических напряжений этапа D1*. Ориентировка плоскости σ_3/σ_1 этапа D1 – ЮЗ-СВ, падение крутое (σ_3 – 210-232/8-22 и 22–55/4–20; σ_1 – 4-75/70-88; σ_2 – 134-142/6-12 и 310-315/6-10) (Рисунок 2).

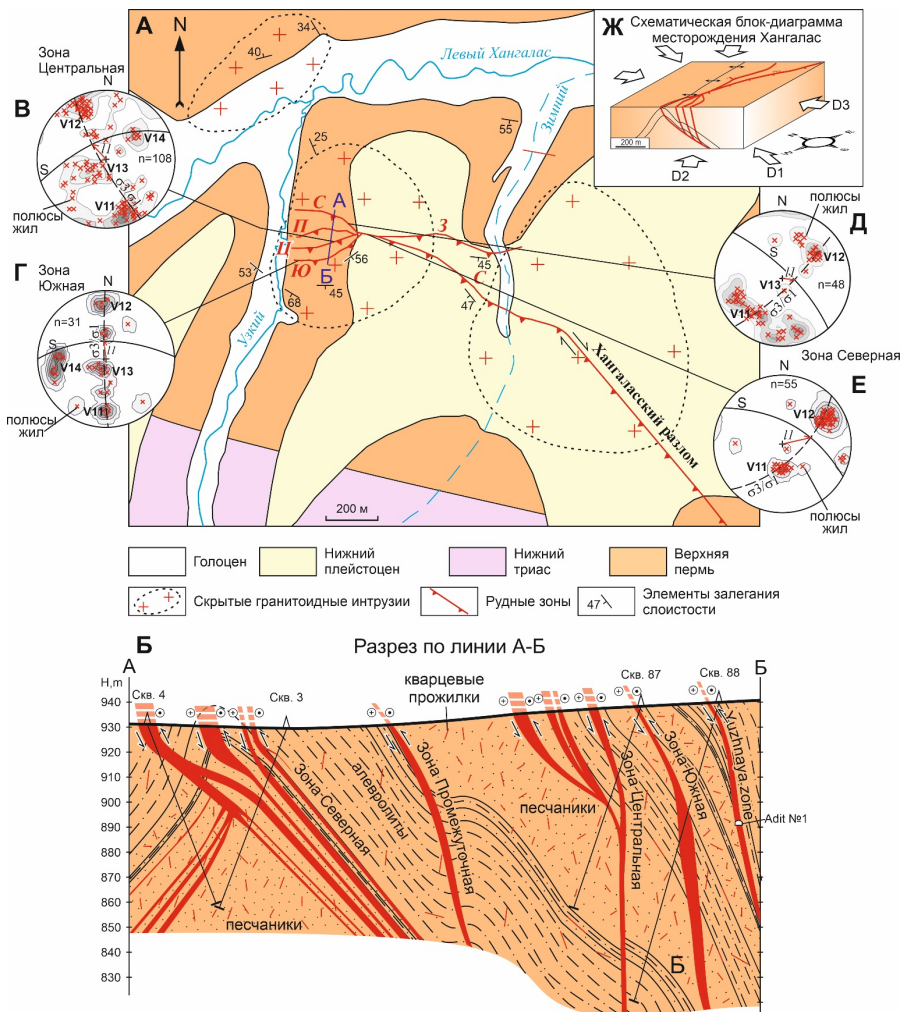


Рисунок 2 – Схема геологического строения (А), геологический разрез (Б), стереограммы полюсов кварцевых жил (В-Е) и схематическая блок-диаграмма (Ж) месторождения Хангалас (Fridovsky et al., 2018). Минерализованные зоны смятия и дробления: С – Северная, П – Промежуточная, Ц – Центральная, Ю – Южная, З – Зимняя. На

стереограммах здесь и далее на рисунках показаны: S – положение разлома, рудной зоны, l_1 – расчетное направление смещения пород, σ_3/σ_1 – плоскость максимальных напряжений.

Этап D_2 характеризуется левосторонними движениями по разломам северо-западного простирания при доминирующем 3-В направлении сжатия (σ_3 – 77-98/10-18, σ_1 – 175-190/10-12, σ_2 – 254-279/56-59), вызванным сменой направления движения Колымо-Омолонского супертеррейна (Тектоника..., 2001) (Таблица 1). Со сдвигами ассоциируют открытые складки F_2 . Шарниры складок погружаются к СВ и северу под углами до 70–75°. Деформируются ранние структуры, формируется кливаж разлома S_3 простирания. Левые сдвиги наиболее широко проявлены вдоль осевой части Адыча-Тарынского разлома (Fridovsky, 2018), где с этим этапом связано формирование сурьмяного оруденения, наложенного на золотое (Гамянин, 2000; Бортников и др., 2010).

Этап D_3 представлен правыми сбросо-сдвигами (Fridovsky, 2018, Fridovsky et al., 2018) (Таблица 1). Предполагается связь этих деформаций с косою субдукцией плит палео-Тихого океана под восточную окраину Северной Азии (Тектоника..., 2001) и (или) развитием трансформной окраины на северо-востоке Азии (Ханчук, Иванов, 1999). Происходит повторное смятие пород, активизация S_3 структур, развиваются широтные складки (σ_3 – 350-22/20-40, σ_1 – 84-118/10-16 и 250/14, σ_2 – 149-200/36-60 и 246/60).

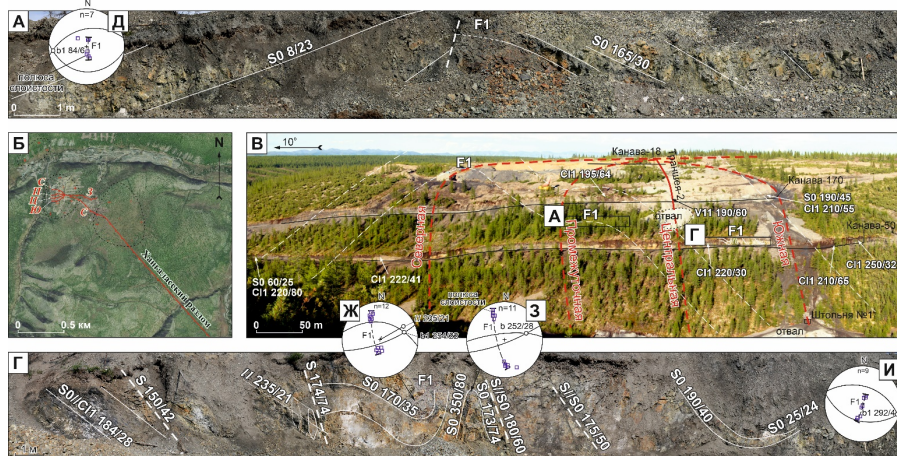


Рисунок 3 – Космический снимок (Б), панорама (В) и складки F_1 (А и Г) месторождения Хангалас (Fridovsky et al., 2018). Д-И – стереограммы полюсов слоистости складок F_1 ; C_1 – кливаж, S_0 – слоистость, l_1 – будинаж. Минерализованные зоны смятия и дробления: С – Северная, П – Промежуточная, Ц – Центральная, Ю – Южная, З – Зимняя.

Таблица 1. Эволюция тектонических событий и ассоциирующая минерализация Хангаласского рудного узла

Характеристика	Деформационные этапы			
	D1, прогрессивный		D2	D3
Кинематика главных разломов северо-западного простирания	Взбросо-надвиговая		Левосдвиговая	Право-сдвиговая
Структурный парагенезис	Межслоевые срывы, внутрислоевые рампы, надвиги и взбросы, сжатые и изоклиальные СЗ складки с горизонтальными шарнирами F1, кливаж разлома, борозды скольжения по падению пород, будинаж	Активизация надвигов и взбросов, будинаж, ороженное золотое оруденение	Левосторонние сдвиги, СВ и СЮ складки F2 с умеренно крутыми и крутыми шарнирами, горизонтальные и пологие борозды скольжения, кливаж разлома, деформирование ранних структур	Правосторонние сдвиги, складки F3 близширотного и СЮ простирания, горизонтальные борозды скольжения, деформирование ранних структур
Ориентировка плоскости σ_3/σ_1	Близвертикальная, северо-восточная		Пологая, субширотная	Пологая, субмеридиональная
Графическая модель				

Второе защищаемое положение. На месторождении выделены пять последовательных парагенетических ассоциаций гидротермального минералообразования: ранняя метасоматическая пирит-арсенопирит-кварцевая, жильные пирит-арсенопирит-кварцевая, золото-полисульфидно-кварцевая, сульфосольно-карбонатная и поздняя серебро-кварцевая. В окологорудных метасоматитах установлен вкрапленный тип минерализации с золотоносными пиритом-3 и арсенопиритом-1, имеющими нестехиометрический состав. В пирите-3 с избытком Fe и недостатком S концентрация структурно-связанного Au^+ прямо пропорциональна его мышьяковистости.

Рудные тела месторождения Хангалас представлены малосульфидным золото-кварцевым жильно-прожилковым и впервые выделенным золото-сульфидным вкрапленным типами. Выделены четыре этапа минералообразования: диагенетический, метаморфогенный,

гидротермальный и гипергенный. Рудообразование происходило в *гидротермальный этап*, который характеризуется пятью парагенетическими ассоциациями (Рисунок 4):

1) метасоматическая пирит-арсенопиритовая ассоциация локализуется в околорудных серицит-карбонат-кварцевых метасоматитах (Рисунок 5). Главные рудные минералы пирит (Py3) и арсенопирит (Apy1) встречаются в виде отдельных кристаллов, сростков, мелких агрегатов размером от долей до 2-3 мм, и прожилков мощностью до первых мм. Py3 имеет кубическую и пентагондодекаэдрическую формы. Apy1 образует рассеянные зерна и сростки, а также агрегаты и микропрожилки.

2) жильная пирит-арсенопирит-кварцевая ассоциация присутствует, в основном, в рудных телах, сложенных крупно- и среднекристаллическим ангедральным кварцем. Главные сульфиды Py4 и Apy2 встречаются в виде сростков и агрегатов, реже в виде отдельных зерен и прожилков, измененных в ходе катаклаза и коррозии.

3) золото-полисульфидная ассоциация представлена мелкими агрегатами и микропрожилками сфалерита, халькопирита, галенита и выделениями самородного золота. Они заполняют пустоты в кварце и трещины в пирите и арсенопирите ранних ассоциаций, а также формируют в них микро- и нановкрапленность.

4) минералы кварц-карбонат-сульфосольной ассоциации встречаются редко и локализуются в трещинах и пустотах ранних рудных и жильных минералов в виде агрегатов и отдельных зерен.

5) серебро-кварцевая ассоциация завершает гидротермальный этап минералообразования. Халцедоновидный темно-серый до черного кварц цементирует обломки раннего кварца, в нем встречаются вкрапления акантита.

Первые четыре ассоциации гидротермального минералообразования связаны со взбросо-надвиговыми деформационными событиями D1 в раннем мелу. Серебро-кварцевая ассоциация, вероятно, связана с позднемеловыми праводвиговыми деформациями D3.

Одним из отличительных особенностей месторождения Хангалас является широкое проявление гипергенных процессов (Нестеров, 1970; Кудрин и др., 2018, 2019). В зоне окисления месторождения нами обнаружено большое количество новообразованных минералов, среди которых два неизвестных: водный сульфат Fe (Kudrin et al., 2020; Zayakina et al., 2020) и водный сульфат-арсенат-фосфат Fe и Al (Заякина и др., 2020).

Минералы \ Стадия	Метасоматическая Ру-Ару-Qz	Жильная Ру-Ару-Qz	Аu-полисульфидно- Qz	Сульфосольно- карбонатная	Ag-кварцевая
Жильные: Кварц Карбонат Серицит Рудные: Пирит, FeS ₂ Арсенопирит, FeAsS Самородное золото, Au ⁰ «Невидимое» золото, Au ⁺ Галенит, PbS Халькопирит, CuFeS ₂ Сфалерит, (Zn _{0,97} Fe _{0,03})S Фрейберит, (Ag, Cu) ₁₂ Sb ₄ S ₁₃ Буланжерит, Pb ₂ Sb ₄ S ₁₁ Тетраэдрит, Cu ₁₂ Sb ₄ S ₁₃ Fe-герсдорфит, (Fe _{0,4} Co _{0,06} Ni _{0,54})As _{0,97} S _{1,03} Акантит, Ag ₂ S					
Структура	Гипидио- морфно-мета- зернистая	Гипидио- морфно- бластическая	Аллотрио- морфно- бластическая, эмульсионная, гребенчатая	Аллотрио- морфно- бластическая	Аллотрио- морфно- бластическая
Текстура	Жильно- прожилковая, прожилково- вкрапленная, вкрапленная, сетчатая, ориентиро- ванно- прожилковая	Полосчато-гнездовая, брекчиевидная, вкрапленная, пятнисто- вкрапленная, пятнисто- инъецированная, инъекционно-прожилковая, «ложного» пересечения, друзовидная		Вкрапленная	Прожилково- вкрапленная, вкрапленная
РТХ-параметры	T=340-148 °C, P=0.2-0.4 кбар, 1.8-5.5 мас. % экв. NaCl, CO ₂ в газовой составляющей				
Деформационный этап	Взбросо-надвиговый D1				Правосдвиговый D3

Рисунок 4 – Схема последовательности гидротермального минералообразования в жилах и околожилвных метасоматитах месторождения Хангалас.

Результаты *атомно-абсорбционного анализа* околорудных метасоматитов, Ру3 и Ару1 месторождения Хангалас показали средние содержания Au в них 0.81 г/т, 12.51 г/т и 17.51 г/т соответственно.

По данным микронзондового анализа для всех генераций Ру и Ару установлена нестехиометричность составов, а также наличие примесей As, Co, Ni, Cu и Sb. В пирите-3 выявлен избыток Fe и недостаток S, главной примесью является As (0.38-3.27 мас. %). По данным LA-ICP-MS анализа установлена тесная корреляция между Au и As в Ру3 ($r = 0.9$) (Рисунок 6А). В структуре пирита As изоморфно замещает S с образованием в ряде случаев мышьяковистого пирита ($As > 1.7\%$), что характерно для восстановительных условий (Reich et al., 2005, Gao et al., 2019). Reich M. и др. (2005) отмечают повышенную растворимость золота в структуре пирита с увеличением содержания As: $C_{Au} = 0.02 \cdot C_{As} + 4 \cdot 10^{-5}$ (Рисунок 6). В координатах Au-As на рисунке 6 Ару1 и Ру3 месторождения Хангалас расположены в поле

структурно-связанной формы «невидимого» золота Au^+ в кристаллических решетках этих сульфидов.

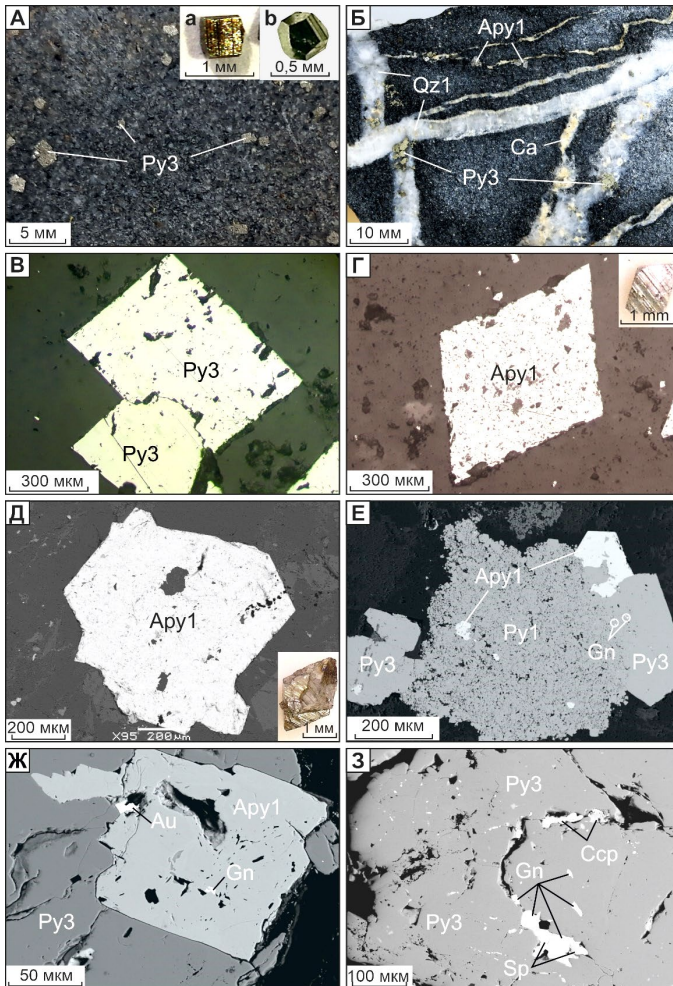


Рисунок 5 – Фотографии (А, Б) и микрофотографии Py3 и Apy1 в отраженном свете (В, Г) и обратно-рассеянных электронах (Д-З). А – вкрапления метасоматического Py3 в песчанике, на врезке а – кубический пирит, b – пентагододекаэдрический пирит; Б – прожилково-вкрапленная карбонат-кварц-Py3-Apy1 минерализация; В – сростки кристаллов Py3; Г – эвгедральный Apy1; Д – совоинованные кристаллы Apy1; Е – сростки Py1, Py3 и Apy1 с включениями галенита (Gn); Ж – вкрапления золота (Au) и галенита (Gn) в Py3 и Apy1; З – включения сульфидов золото-полисульфидной ассоциации (галенит – Gn, халькопирит – Csp, сфалерит – Sp) в Py3.

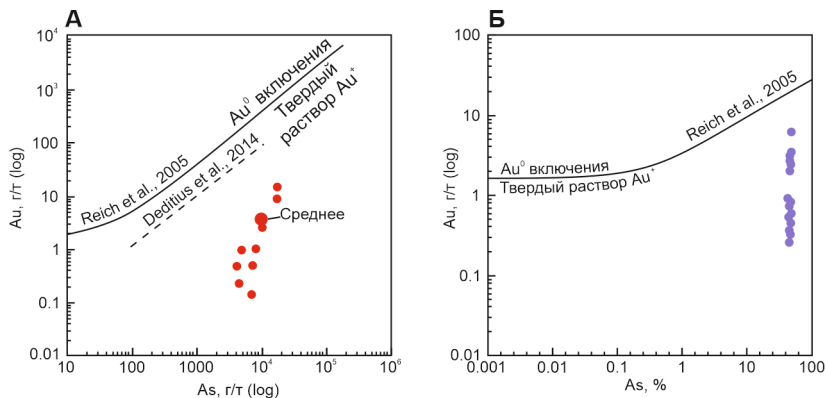


Рисунок 6 – Бинарные корреляционные диаграммы As и Au для Py3 (А) и Aru1 (Б).

Третье защищаемое положение. Гидротермальное золотое оруденение месторождения Хангалас формировалось на малых глубинах, в среднетемпературных условиях с участием низкоконцентрированных глубинных магматических флюидов в валанжинское время (около 137 млн лет назад) в связи с позднеорогенными процессами в Кулар-Нерском террейне.

Изучение Re-Os изотопной системы самородного золота из кварца месторождения Хангалас показало изменение концентрации рения от 0.439 до 1.862 мг/т, осмия – от 0.205 до 1.443 мг/т, однородные величины изотопного отношения $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ – от 0.2212 до 0.2338 и $^{187}\text{Re}/^{188}\text{Os}$ – от 2.329 до 24.883. Установлен Re-Os изотопный возраст (около 137 млн лет назад) образования золотого оруденения месторождения Хангалас (Рисунок 7). Начальные отношения изотопов осмия $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ изученных образцов и фракций золота месторождения Хангалас указывают на существенную долю нерадиогенной компоненты, которая ассоциирует с глубинными магматическими/мантийно-коровыми источниками (Фридовский и др., 2021).

Узкий диапазон значений изотопного состава кислорода $\delta^{18}\text{O}$ кварца от +15.2 до +16.1 ‰ соответствует значениям изотопного состава кислорода рудного кварца ряда орогенных месторождений Верхояно-Колымской складчатой области и может указывать на однородную, глубинную термальную систему, сформировавшую оруденение (Goldfarb, Groves, 2015; Горячев и др., 2008).

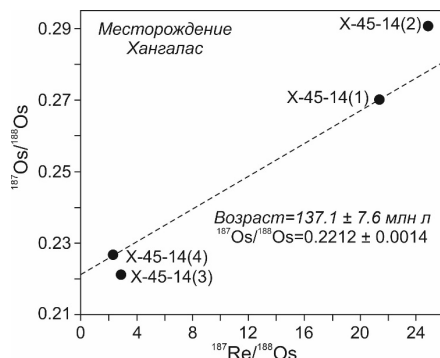


Рисунок 7 – Re-Os изохронные диаграммы для самородного золота месторождения Хангалас. Залитые кружки – образцы и их номера.

Изотопный состав $\delta^{34}\text{S}$ серы пирита и арсениопирита из метасоматитов и жил месторождения Хангалас хорошо согласуется с кривой изменения изотопного состава $\delta^{34}\text{S}$ в зависимости от возраста вмещающих пород для орогенных месторождений в терригенных толщах и характеризуется узким интервалом отрицательных значений от -2.1 до -0.6 ‰ (Kudrin et al., 2021). Схожий околонулевой изотопный состав серы арсениопирита и пирита рудных жил и вкрапленной минерализации может свидетельствовать об их формировании в ходе единого гидротермального события и участия в рудообразовании серы мантийно-магматического происхождения.

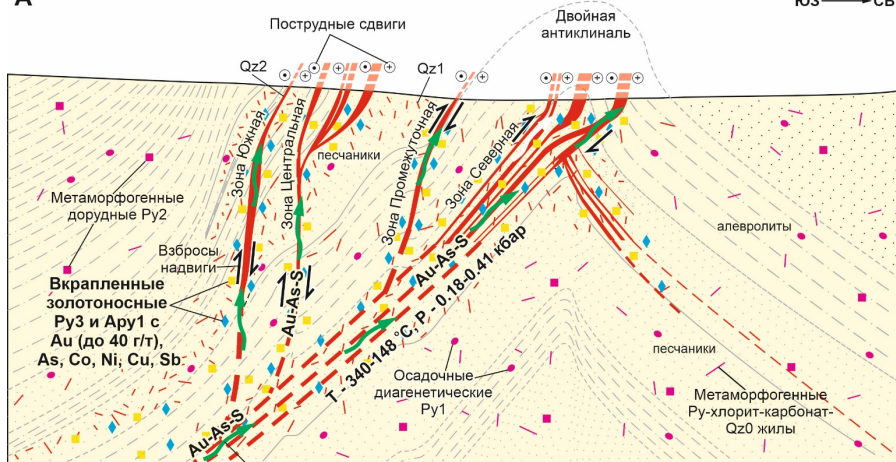
В формировании месторождения принимали участие низкоконцентрированные (1.8-5.5 мас. % экв. NaCl) флюиды с CO_2 в газовой составляющей в интервале температур от 340 до 148 °C (Кудрин и др., 2022). Рассчитанное давление рудообразующего флюида колеблется от 0.18 до 0.41 кбар, среднее 0.33 кбар, что может указывать на малые 1-3 км глубины формирования месторождения.

С учетом полученных результатов разработана геолого-генетическая модель формирования орогенного золотого оруденения месторождения Хангалас (Рисунок 8).

В начале раннего мела (валанжин) (около 137 млн лет назад) в Кулар-Нерском террейне происходили позднеорогенные процессы, остывание магматических образований комплекса малых интрузий, активизация ранних разломов в осевой части Нерского антиклинория во взбросо-надвиговом поле напряжений. Процессы завершились формированием орогенного вкрапленного и жильно-прожилкового золотого оруденения месторождения Хангалас. Полученные изотопно-геохимические результаты позволяют предположить участие рудообразующих глубинных магматических источников в формировании месторождения.

A

ЮЗ → СВ



Б

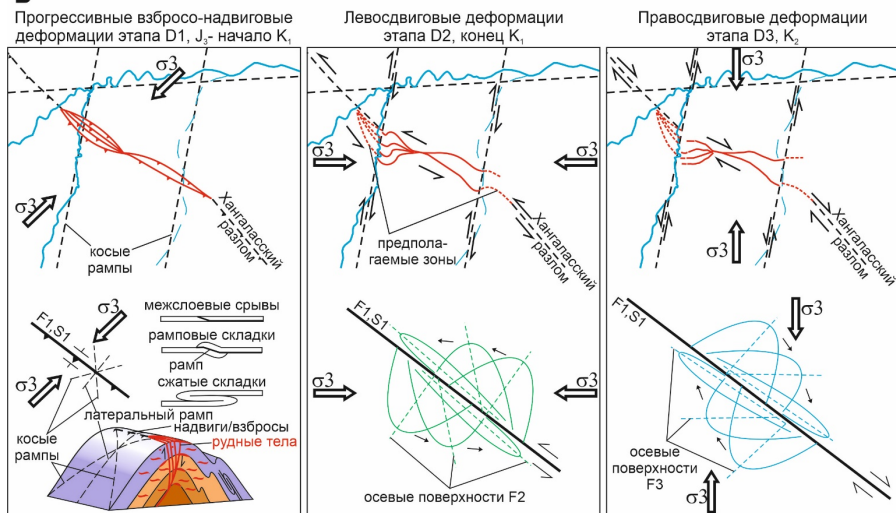


Рисунок 8 – Схематическая геолого-генетическая модель формирования месторождения Хангалас, учитывающая источники и условия локализации оруденения (А) и эволюция деформационных структур (Б).

На основе полученной геолого-генетической модели месторождения Хангалас, результатов проведенных исследований и опубликованных данных выделены прогнозно-поисковые критерии орогенного золотого оруденения: *структурно-тектонические, литологические, магматические, геохимические, гидротермально-метасоматические, физико-химические, минералогические, изотопно-геохронологические и изотопно-геохимические.*

Критерии могут быть использованы недропользователями на стадиях регионального изучения недр, поисковых и оценочных работ в Яно-Колымском металлогеническом поясе.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Комплексные структурно-тектонические, минералого-геохимические, изотопно-геохимические и геохронологические исследования орогенного золотого оруденения месторождения Хангалас позволили получить следующие результаты:

1. Систематизированы деформационные структуры, определено место рудного процесса в эволюции тектонических структур. Формирование структуры ХРУ происходило в течении трех этапов деформаций: взбросо-надвиговом прогрессивном D1, левосдвиговом D2 и правосдвиговом D3. Золотое оруденение формировалось во взбросо-надвиговом поле напряжений этапа D1. Реконструированы поля тектонических напряжений полидеформированных структур трех этапов.

2. Выделены минеральные ассоциации и последовательность минералообразования в связи с развитием структуры месторождения. Установлены четыре генерации пирита и две генерации арсенопирита. Для гидротермально-метасоматических сульфидов характерна нестехиометричность составов и наличие примесей As, Co, Ni, Cu и Sb.

3. Впервые установлена золотоносность вкрапленной пирит-арсенопиритовой минерализации околорудных метасоматитов, определена природа и форма нахождения «невидимого» золота, преобладающей формой которого является твердый раствор Au^+ в кристаллических решетках Pu_3 и Aru_1 .

4. На месторождении установлено широкое развитие гипергенных процессов и линейного корообразования, построена модель вторичного минералообразования. Обнаружены два неизвестных минерала.

5. Изотопный состав S, Re, Os рудных и жильных O, He, Ar минералов позволил определить участие глубинных магматических источников в формировании оруденения.

6. Разработана геолого-генетическая модель формирования орогенного месторождения Хангалас, образовавшегося в начале раннего мела (около 137 млн лет назад, валанжин) в ходе позднеорогенных процессов в Кулар-Нерском террейне.

7. Выделены прогнозно-поисковые критерии орогенного золотого оруденения месторождения Хангалас, которые могут быть использованы для развития минерально-сырьевой базы рудного золота в регионе.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В рецензируемых изданиях, рекомендуемых ВАК Минобрнауки РФ:

1. Фридовский В.Ю., Горячев Н.А., Крымский Р.Ш., **Кудрин М.В.**, Беляцкий Б.В., Сергеев С.А. Возрастные рубежи формирования золотого оруденения Яно-Колымского металлогенического пояса, Северо-Восток России: первые данные Re-Os изотопной геохронологии самородного золота // Тихоокеанская геология. 2021. Т. 40, №4. С. 18-32.
2. **Kudrin M.V.**, Polufuntikova L.I., Fridovsky V.Yu., Aristov V.V., Tarasov Ya.A. Geochemistry and form of «invisible» gold in pyrite from metasomatites of the Khangalas deposit, NE Russia // Arctic and Subarctic Natural Resources. 2020, V. 25, No. 3. P. 7–14.
3. **Kudrin M.V.**, Zayakina N.V., Fridovsky V.Yu., Galenchikova L.T. Hydrous ferric sulfate – $\text{Fe}(\text{SO}_4)(\text{OH})2\text{H}_2\text{O}$ from the supergene zone of the Khangalas gold deposit, Eastern Yakutia, Russia // Notes Rus. Min. Soc. 2020, V. 149. P. 126–141.

Статьи и материалы конференций, индексируемые в WoS и SCOPUS:

1. **Kudrin M.V.**, Fridovsky V.Yu., Polufuntikova L.I., Kryuchkova L.Yu. Disseminated Gold–Sulfide Mineralization in Metasomatites of the Khangalas Deposit, Yana–Kolyma Metallogenic Belt (Northeast Russia): Analysis of the Texture, Geochemistry, and S Isotopic Composition of Pyrite and Arsenopyrite. Minerals. 2021. V. 11(4). P. 403.
2. Fridovsky V.Yu., **Kudrin M.V.**, Polufuntikova L.I. Multi-stage deformation of the Khangalas ore cluster (Verkhoyansk-Kolyma folded region, northeast Russia): ore-controlling reverse thrust faults and post-mineral strike-slip faults // Minerals. 2018. V. 8, No. 7. P. 270.
3. **Kudrin M.V.**, Fridovsky V.Yu. Structural evolution of ore-controlling trans-crustal faults of the Olchan–Nera zone: constraints from the Khangalas ore cluster, Yana–Kolyma metallogenic belt, NE Russia // IOP Conference Series. 2021. V. 906. P. 012010.
4. Fridovsky V.Yu., **Kudrin M.V.** Ore geology, Re–Os isotope geochemistry of the Au and Au-Sb mineralizations, Kular-Nera terrane, northeast Asia: implications for time of formation and ore genesis // IOP Conference Series. 2021. V. 906. P. 012011.
5. Zayakina N.V., **Kudrin M.V.**, Fridovsky V.Yu. Thermal Dehydration Of Natural Hydrous Ferric Sulfate $\text{Fe}(\text{SO}_4)(\text{OH})\cdot 2\text{H}_2\text{O}$, Eastern Yakutia, Russia// 20th SGEM. 2020. P. 863-870.

Материалы конференций и тезисы докладов (РИНЦ):

1. **Кудрин М.В.**, Колова Е.Е., Фридовский В.Ю. Изотопия благородных газов ($^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$, $^3\text{He}/^4\text{He}$, ^{20}Ne) во флюидных включениях кварца и РТХ-параметры рудообразования мезотермального орогенного месторождения золота Хангалас (Восточная Якутия) // Материалы ВНИК «Геология и минерально-сырьевые ресурсы СВ России». 2022. С. 206-209.

2. **Кудрин М.В.**, Фридовский В.Ю. Пострудные деформации Хангаласского рудного узла (Восточная Якутия) // Материалы XI Всероссийской научно-практической конференции. Якутск, 2021. С. 189-191.
3. Фридовский В.Ю., Крымский Р.Ш., **Кудрин М.В.** Первые данные Re–Os изотопной геохронологии орогенных золоторудных месторождений Верхояно-Колымской минерагенической провинции (СВ России) // Материалы XI Всероссийской НПК. 2021. С. 254-256.
4. Полуфунтикова Л.И., **Кудрин М.В.**, Фридовский В.Ю. Пирит из метасоматитов золоторудного месторождения Хангалас (Восточная Якутия): кристалломорфология, элементы-примеси и золотоносность // Материалы XIII Съезда РМО и Федоровской сессии. Том 2. СПб: ЛЕМА. 2021. С. 67-68.
5. **Кудрин М.В.**, Фридовский В.Ю., Полуфунтикова Л.И. Рентгеновская компьютерная микротомография сульфидов с «невидимым» золотом месторождения Хангалас (Восточная Якутия) // Материалы X Всероссийской научно-практической конференции с международным участием 8-10 апреля, 2020 г. 2020. С. 242-246.
6. Заякина Н.В., **Кудрин М.В.**, Фридовский В.Ю. Неизвестный сульфат-арсенат-фосфат Al и Fe из месторождения Хангалас (Восточная Якутия) // Материалы X Всероссийской научно-практической конференции с международным участием 8-10 апреля, 2020 г. 2020. С.203-207.
7. Фридовский В.Ю., **Кудрин М.В.**, Яковлева К.Ю. Тектонические деформации пород в зоне Чаркы-Индигирского надвига (Верхояно-Колымская складчатая область, Северо-Восток России) // Материалы LIТектонического совещания. 2020. С. 368-371.
8. Фридовский В.Ю., Полуфунтикова Л.И., **Кудрин М.В.** Золоторудные месторождения центральной части Яно-Колымского металлогенического пояса: геология, геохронология, условия формирования // Научно-методические основы прогноза, поисков, оценки месторождений алмазов, благородных и цветных металлов. 2019. С. 145-146.
9. **Кудрин М.В.**, Фридовский В.Ю., Полуфунтикова Л.И., Тарасов Я.А. Изотопный состав серы сульфидов, кислорода кварца и осмия самородного золота Хангаласского рудного узла (Северо-Восток России) // Новое в познании процессов рудообразования. 2019. С. 214-216.
10. **Кудрин М.В.**, Васильева Т.И., Фридовский В.Ю., Заякина Н.В., Полуфунтикова Л.И. Минералы коры выветривания Хангаласского рудного узла (Северо-Восток России) // Материалы IX Всероссийской научно-практической конференции. Якутск: Изд. дом СВФУ, 2019. С. 53-56.
11. **Кудрин М.В.** Вкрапленная минерализация золоторудного месторождения Хангалас (Яно-Колымский золотоносный пояс) // Новое в познании процессов рудообразования. М.: ИГЕМ РАН, 2018. С. 221-223.
12. **Кудрин М.В.**, Фридовский В.Ю. Структурные условия локализации оруденения Хангаласского рудного узла (Северо-Восток Якутии) // Материалы IV Всероссийской конференции с международным участием. Владивосток, 2018. С. 266-269.

13. Fridovsky V.Yu., Gamyanin G.N., **Kudrin M.V.** Metallogeny of the western part of the Yana-Kolyma gold-bearing belt, northeast Russia // Proceedings of the 15th Quadrennial IAGOD Symposium. Buenos Aires: ANALES 56 – SEGEMAR, 2018. P. 146-147.

14. **Кудрин М.В.**, Заякина Н.В., Васильева Т.И. Минералы зоны окисления золоторудного месторождения Хангалас (Восточная Якутия) // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Северо-Востока России: материалы VIII Всероссийской научно-практической конференции. Якутск: Изд-во Инс-та мерзлотоведения им. П.И. Мельникова. 2018. Т. 1. С. 77-80.

15. Fridovsky V.Yu., **Kudrin M.V.** Late Mesozoic-Early Paleogene strike-slip tectonics of the Kular-Nera slate belt (northeast Russia) // EGU 2018 General Assembly, 7-12 April, Vienna.

16. **Кудрин М.В.**, Фридовский В.Ю. Многоэтапные тектонические деформации и золоторудная минерализация Ольчан-Нерской металлогенической зоны (Северо-Восток России)// Материалы V Международной конференции молодых ученых и специалистов памяти академика А. П. Карпинского. СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 2017. С. 72-75.

17. Полуфунтикова Л.И., Фридовский В.Ю., **Кудрин М.В.** Геохимические особенности пирита и арсенопирита золоторудных месторождений Верхне-Индигирского района // Материалы VII Всероссийской научно-практической конференции. – Якутск: Издательский дом СВФУ, 2017. С. 163-169.

18. Фридовский В.Ю., **Кудрин М.В.**, Полуфунтикова Л.И. Тектонические структуры и оруденение центральной части Кулар-Нерского террейна // Материалы XLVIII Тектонического совещания. Том 2. М.: ГЕОС, 2016. С. 249-253.

19. Фридовский В.Ю., **Кудрин М.В.** Деформационные структуры Хангаласского рудного узла // Материалы Всероссийской научно-практической конференции. Якутск: Изд. дом СВФУ, 2015. С. 537-540.