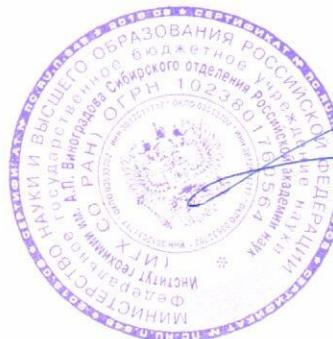


Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
ИНСТИТУТ ГЕОХИМИИ ИМ. А.П. ВИНОГРАДОВА СИБИРСКОГО
ОТДЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК
(ИГХ СО РАН)

УДК 550.4:551.2

Рег. № 121042100029-0



УТВЕРЖДАЮ

Директор ИГХ СО РАН

д.г.-м.н.

А.Б. Перепелов

«26» декабря 2025 г.

ОТЧЕТ
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

по теме:

БЛАГОРОДНОМЕТАЛЛЬНЫЕ РУДООБРАЗУЮЩИЕ СИСТЕМЫ
СКЛАДЧАТОГО ОБРАМЛЕНИЯ СИБИРСКОГО КРАТОНА

(заключительный)

Шифр проекта № 0284-2021-0001

Направление и разделы фундаментальных и поисковых научных исследований:

1.5.5. Геология твердых полезных ископаемых

1.5.5.2. Металлогенические провинции, эпохи и рудные месторождения: от генетических моделей к прогнозу минеральных ресурсов

Протокол Ученого совета ИГХ СО РАН
№10 от 26 декабря 2025 г.

Руководитель проекта

Главный научный сотрудник

Подпись, дата

академик РАН Н.А. Горячев
26 декабря 2025 г.

Иркутск 2025

СПИСОК ОСНОВНЫХ ИСПОЛНИТЕЛЕЙ ПРОЕКТА

Научный руководитель темы,
академик РАН

 26.12.2025 Н.А. Горячев (введение,
подпись, дата разделы 1, 2, 3, заключение)

Ответственные исполнители темы:

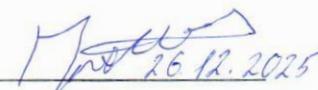
С.н.с., к.г.- м.н.

 26.12.2025 А.Е. Будяк (разделы 1, 2)
подпись, дата

С.н.с., к.г.- м.н.

 26.12.2025 Ю.И. Тарасова (разделы 1, 2)
подпись, дата

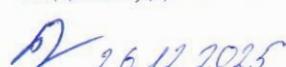
Н.с., к.г.- м.н.

 26.12.2025 С.Н. Просекин (раздел 3)
подпись, дата

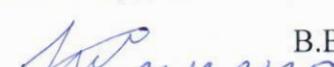
Вед.инж.

 26.12.2025 А.В. Блинов (раздел 3)
подпись, дата

Н.с., к.х.н.

 26.12.2025 Н.Н. Брюханова (раздел 3)
подпись, дата

С.н.с., к.т.н.

 26.12.2025 В.В. Кондратьев (раздел 3)
подпись, дата

Инж.-иссл.

 26.12.2025 С.А. Баранова (разделы 1, 3)
подпись, дата

Нормоконтроль

 26.12.2025 Т.Ю. Гармышева
подпись, дата

РЕФЕРАТ

Отчет включает 130 стр., 34 илл., 2 табл., 135 ист., 3 прил.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: ЗОЛОТОЕ И ПОРФИРОВОЕ ОРУДЕНЕНИЕ, БАЙКАЛО-ПАТОМСКИЙ, БАЙКАЛО-МУЙСКИЙ, ЗАБАЙКАЛЬСКИЙ РЕГИОНЫ, ГЕОЛОГО-ГЕНЕТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ПРОМЫШЛЕННОГО ОРУДЕНЕНИЯ И ИХ ПРОГНОЗНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ

При проведения работ по теме «Металлогенические провинции, эпохи и рудные месторождения: от генетических моделей к прогнозу минеральных ресурсов» получены следующие результаты:

- Показано, что процесс формирования рудной зоны месторождения Ключевское является результатом последовательно сменяющихся условий и представлен развитием наложенных друг на друга минеральных ассоциаций. По набору ассоциаций здесь фиксируется полный ряд типичный для эволюционирующей РМС.

- Для месторождения Верхне-Алиинское предложена модель рудно-магматической системы основанная на геологической ассоциации рудных тел с поздними монцонитоидными производными акатуйского комплекса среднепозднеюрского возраста.

- Продемонстрировано отсутствие значимой корреляционной связи нерастворимого углерода с золотом, что объясняется низкой сорбционной емкостью графитизированного органического вещества относительно его первичного аналога. Сопоставимое содержание золота в битумоидах из пород в пределах месторождений и отложений на удалении от таковых, указывает на первичную золотоносность органического флюида.

- Разработана и внедрена комплексная система геоинформационного обеспечения полевых геолого-geoхимических работ, основанная на связке программ QGIS/QField и авторском модуле автоматизации «GIS Project Updater». Система обеспечивает полевую геолого-geoхимическую съемку от планирования маршрутов до формирования итоговой базы данных.

- Получены результаты обогащения, свидетельствующие о возможности получения вторичных концентратов с содержанием промышленно осваиваемых концентраций золота, например, процессами выщелачивания цианированием.

- Предложено выделение 5 геодинамических подтипов орогенных месторождений золота: (1) аккреционный; (2) аккреционно-тыловодужный; (3) коллизионный; (4) трансформно-сдвиговый и (5) пллюмовый, характеризующиеся различной минералово-geoхимической и металлогенической нагрузкой. Учет специфики этих типов необходим при геолого-генетической и прогнозно-поисковой характеристики орогенных золоторудных систем.

СОДЕРЖАНИЕ

СПИСОК ОСНОВНЫХ ИСПОЛНИТЕЛЕЙ ПРОЕКТА	2
РЕФЕРАТ	3
ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ И ОБОЗНАЧЕНИЙ	5
ВВЕДЕНИЕ	6
РАЗДЕЛ 1 МЕСТОРОЖДЕНИЯ ЗАБАЙКАЛЬЯ.....	8
РАЗДЕЛ 2 МЕСТОРОЖДЕНИЯ БОДАЙБИНСКОГО РАЙОНА	34
РАЗДЕЛ 3 ПРИКЛАДНОЕ НАПРАВЛЕНИЕ	53
РАЗДЕЛ 4 ОРОГЕННЫЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ ЗОЛОТА: ГЕОДИНАМИКА И ТИПИЗАЦИЯ.....	72
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	78
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	105
ПРИЛОЖЕНИЕ А	119
ПРИЛОЖЕНИЕ Б	121
ПРИЛОЖЕНИЕ В.....	130

ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ И ОБОЗНАЧЕНИЙ

В настоящем отчете применяют следующие сокращения и обозначения:

АК – асфальтеновые кислоты

АСФ – асфальтены

БМКТ – Байкало-Муйский композитный террейн

БС – бензольные смолы

ЗИФ – золото-извлекательная фабрика

МООП – Монголо-Охотский орогенный пояс

МСБ – минерально-сырьевая база

НУВ – нерастворимое углеродистое вещество

ОВ – органическое вещество

ОП – осевая поверхность

ОПИ – опытно-исследовательские работы

ПМУВ – показатель металлоемкости углеродистого вещества

PMC – рудно-магматическая система

СБС – спиртобензольные смолы

СФЗ – структурно-формационная зона

СГТ – Сухоложский генетический тип

СЭМ – сканирующий электронный микроскоп MIRA3 LMH Tescan

УВ – углеродистое вещество

С_{опр} – органический углерод

ВВЕДЕНИЕ

Основная цель в выявлении условий, причин и путей накопления и реализации благороднометалльного потенциала складчатых структур и выявлении роли Сибирского кратона в рудном процессе. Изучение геологических и минералого-geoхимических процессов рудообразования благороднометалльных месторождений различных генетических и формационных типов, сформированных в различных геодинамических обстановках Забайкалья, Прибайкалья и Северо-Востока России. Определение источника рудного вещества и связь становления рудных систем с геодинамическими событиями в истории развития Сибирского континента.

С другой стороны, современные реалии требуют вклада фундаментальной науки в производство, что привело к формированию, в рамках работ по теме, прогнозно-технологического направления. Многократные обращения предприятий золотодобывающей отрасли, по заданию которых нами ежегодно проводятся научно-исследовательские работы, о изучении руд и хвостов производства, спровоцировало ИГХ СО РАН к созданию на своей базе дополнительного направления, направленного на усиление прикладного аспекта фундаментальных исследований связанных с освоением месторождений: выявление и апробацию технологических решений в сфере обогащения и доизвлечения полезного компонента руд горнообогатительных предприятий.

В настоящее время горно-металлургическая и обогатительная отрасли РФ зависимы от зарубежных технологий и оборудования в золотодобывающей промышленности. Имеющийся к настоящему времени научный задел позволяет как проводить реинжиниринг существующих зарубежных технологических решений на территории РФ, так и разрабатывать собственные аналоги, зачастую с более высокими технико-экономическими показателями. В частности, это касается физических методов обогащения золотосодержащих руд, таких как гравитационное обогащение, скоростная и основная флотация. Применение инновационных принципов процессов, построенных на междисциплинарном подходе геолого-минералогических знаний сотрудников ИГХ СО РАН, физических и химических наук, позволяют наиболее полно и селективно извлекать из руды необходимый компонент при кардинально меньших капитальных и операционных затратах.

Одновременно, с применением совокупности химических и механохимических принципов возможно повысить извлекаемость упорного золота (или других благородных металлов) с меньшими вложениями в гидрохимические переделы и сниженной экологической нагрузкой на промышленные зоны. Данный факт, например, может быть

обусловлен оптимизированными процессами механохимической активации упорных руд и ресурсосберегающими подходами по использованию оборотных растворов выщелачивания.

В период 2025 работы были сосредоточены на реализации следующих задач.

Геолого-генетическое направление:

1) Разработка геолого-генетические модели благороднометалльных месторождений сложно-дислоцированных разнотипных орогенных поясов и определены фундаментальные параметры формирования металлогенических, метаморфических и магматических ассоциаций разнотипных орогенных структур возникших в разные периоды времени и в результате разных геотектонических процессов

2) Разработка прогнозно-поисковые критерии промышленной минерализации для разных обстановок и в разных орогенных поясах.

Технологическое направление:

- описание методов и приборного обеспечения по хвостам обогащения месторождения Олимпиадинское;
- результаты исследований по доизвлечению золотосодержащих фаз;
- временный технологический регламент на ОПИ.

В ходе выполнения программы исследований по теме «Металлогенические провинции, эпохи и рудные месторождения: от генетических моделей к прогнозу минеральных ресурсов» были подготовлены промежуточные отчеты:

1. с 01.01.2021 по 31.12.2021 – регистрационный номер 222031600056-3
2. с 03.01.2022 по 30.12.2022 – регистрационный номер 223020800728-0
3. с 01.01.2023 по 31.12.2023 – регистрационный номер 224021800027-0
4. с 01.01.2024 по 31.12.2024 – регистрационный номер 225021310034-9

РАЗДЕЛ 1 МЕСТОРОЖДЕНИЯ ЗАБАЙКАЛЬЯ

На территории Забайкалья работы были сосредоточены на восстановлении условий формирования золоторудный объектов на основании выявления последовательности минералообразования и установления химических особенностей выявленных минералов. Проведено прослеживание эволюции рудно-магматической системы (РМС) через смену ассоциаций минералов в пределах золоторудных объектов (Восточное Забайкалье). Полученные результаты могут быть использованы для выявления формационной принадлежности рудных объектов и разбивки комплексных геохимических ореолов на зоны соответствующие пространственному положению ассоциаций минералов той, или иной стадии минерализации.

1.1 Последовательность минералообразования Пильненского месторождения золота (Карийский рудный узел Восточное Забайкалье) С.В. Ефремов, А.Е. Будяк, Ю.Д. Щербаков, Н.В. Брянский // Геология рудных месторождений – в редакции

Для сопоставления выделенной минеральных ассоциации Карийского рудного узла с тем или иным этапом эволюции РМС, был использован ряд последовательных парагенезисов/ассоциаций минералов созданный для месторождений касситерит-сульфидной формации [78], по сути, являющейся универсальным для всех гидротермальных месторождений связанных с гранитоидами. Фактически, этот ряд полностью соответствует ассоциациям минералов кристаллизующихся в порфировой системе при снижении температуры флюида отделяющегося от магматического очага [125].

По результатам работ выделено две группы минеральных ассоциаций отражающих существование двух этапов рудообразования, связанных с эволюцией объектов Мо-Си порфировой формации. Первый этап рудообразования формирует рудный объект Мо-порфировой рудной субформации. В его пределах выделяются кварц-магнетитовая, кварц-молибденитовая с вольфрамитом и карбонат-сидеритовая минеральные ассоциации, соответствующие пневматолитовому и гидротермальным этапам развития РМС.

Первая группа ассоциаций выделена в большинстве изученных образцов руд. В ее составе присутствуют: кварц-магнетитовая; кварц-молибденитовая с вольфрамитом и кварц-сидеритовая минеральные ассоциации. Кристаллизация минералов кварц-магнетитовой ассоциации предваряется интенсивным дроблением вмещающих пород. Наиболее ранним минералом ассоциации является магнетит, который вместе с кварцем «цементирует» обломки кварцевых жил и гранитоидов. Магнетит обычно присутствует в

виде сростка кристаллов октаэдрического облика, в соответствии с рисунком 1.1, часто содержит пластинки гематита. Содержит незначительные количества Mn и V.

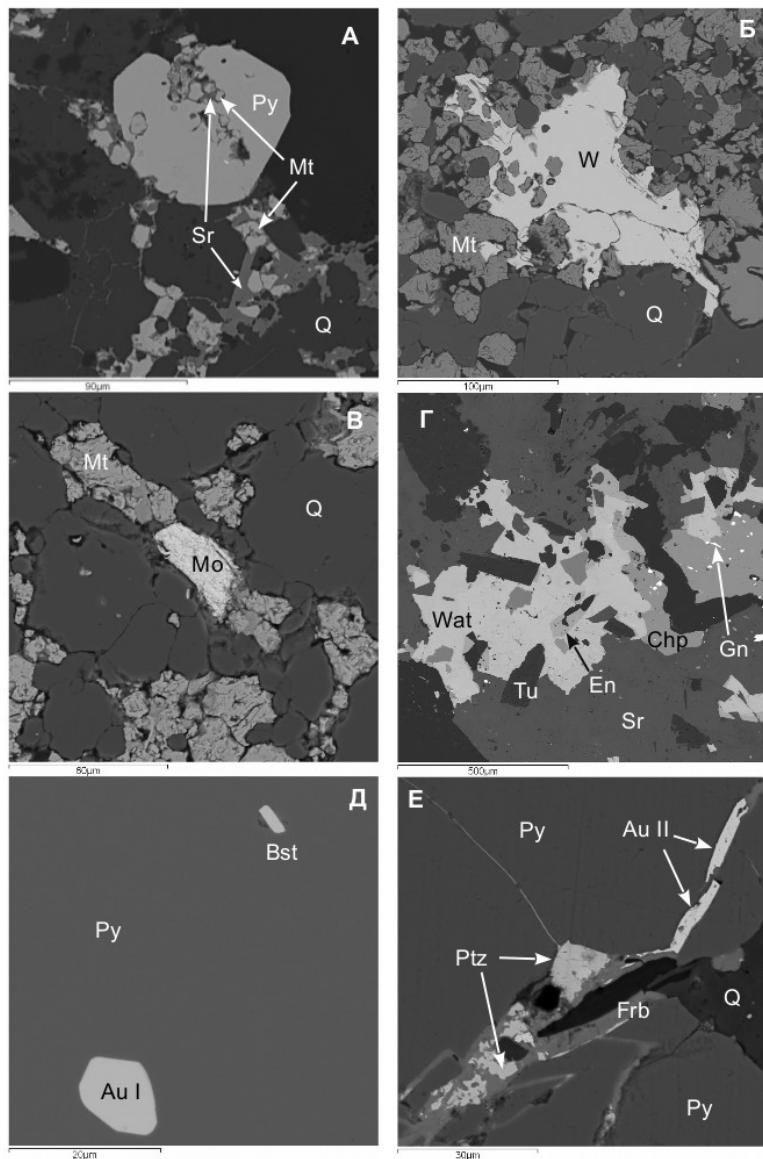


Рисунок 1.1 – Типоморфные ассоциации минералов Пильненского месторождения

а - пирит замещает магнетит и сидерит; б – зерно вольфрамита в кварц-магнетитовом агрегате; в – зерно молибденита в кварц-магнетитовом агрегате; г – взаимоотношение халькопирита с ватанабеитом и галенитом; д – включение золота и висмутина в пирите; е – выделение золота, теллуридов золота и сульфосолей серебра в трещинах в пирите

В интерстициях зерен магнетита кристаллизуется вольфрамит, довольно редок. Образует таблитчатые кристаллы, замещает магнетит, в соответствии с рисунком 1.1 б. По

химическому составу он соответствует фербериту, примесей других элементов не содержит.

Молибденит образует небольшие ксеноморфные зерна, чешуйки, в соответствии с рисунком 1.1в, иногда выполняет трещины в магнетите. Химических примесей не имеет. Взаимоотношения между вольфрамитом и молибденитом неясны, непосредственные контакты этих минералов не наблюдались. Размеры зерен рудных минералов колеблются от десятых до сотых долей мм, что затрудняет их изучение под оптическим микроскопом. Наиболее поздним минералом этой группы ассоциаций является сидерит, заполняющий интерстиции между зернами перечисленных выше минералов, в соответствии с рисунком 1.1а. Содержит небольшую примесь кальция.

Минеральные ассоциации связанные со вторым этапом рудообразования наложены на первую. Он формирует объект Mo-Cu с Au порфировой рудной субформации. В его пределах выделяются кварц-пирит-турмалиновая, кварц-молибденит-шеелитовая с золотом, пирит-халькопирит-сульфоарсенидная, золото-висмутотеллуридная минеральные ассоциации, соответствующие пневматолитовому и гидротермальным этапам развития РМС. Золотая минерализация свойственна только этому этапу рудообразования и может быть связана с эволюцией порфировой системы, фиксируя невысокий уровень эрозионного среза. Наиболее поздним минералом этой группы ассоциаций является сидерит, заполняющий интерстиции между зернами перечисленных выше минералов, в соответствии с рисунком 1.1а. Содержит небольшую примесь кальция.

Вторая группа минеральных ассоциаций наложена на первую, более изменчива и присутствует в меньшем количестве образцов. Кристаллизация входящих в нее минералов предваряется интенсивным дроблением вмещающих пород (зоны дробления, эксплозивные брекчии). В ее состав включены: кварц-пирит-турмалиновая, пирит-халькопирит-сульфоарсенидная, золото-висмутотеллуридная минеральные ассоциации.

Кварц-пирит-турмалиновая ассоциация является сложной. Она может быть подразделена на кварц-пиритовую, кварц-турмалиновую и кварц-пирит-турмалиновую минеральные ассоциации. Как правило, они встречаются вместе, приурочены к единым зонам дробления.

Пирит первой генерации является наиболее ранним минералом, часто образуется вне зон турмалинизации, однако пространственно с ними ассоциирует – пирит приурочен к кварц-магнетитовому агрегату, вмещающему прожилок с кварцем и турмалином. Обычно образуется в результате метасоматического замещения магнетита более ранней минеральной ассоциации. В результате подобного взаимодействия кристаллизуется барит

(фиксирует избыток серы и кислорода), зерна которого часто присутствуют в виде включений в пирите.

Пирит первой генерации образует кристаллы пентагон-додекаэдрического габитуса, в соответствии с рисунком 1.1а, часто содержит примесь кобальта (0,48-2,32 масс %), иногда, включения Au. Практически всегда присутствует в виде угловатых обломков в зонах дробления залеченных кварц-турмалиновым агрегатом.

Пирит второй генерации часто образует прожилки в турмалине первой генерации (крупные кристаллы и их обломки) и более идиоморфен чем турмалин второй генерации (игольчатые кристаллы в срастании с кварцем). Часто находится в срастаниях с шеелитом, иногда с молибденитом, содержит включения висмутина и Au, в соответствии с рисунком 1.1д, однако высокие содержания кобальта ему не свойственны. Включения золота всегда имеют хорошо выраженную форму, размер частиц достигает десятых долей мм. Золото высокопробное, доля серебра обычно не превышает 2 %.

Пирит-халькопирит-сульфоарсенидная минеральная ассоциация. Наложена на предыдущую с предварительным дроблением, часто слагает центральные части кварц-пирит-турмалиновых прожилков.

Главный минерал ассоциации халькопирит. Образует крупные кристаллы, иногда достигающие размера в несколько сантиметров. Халькопирит корродирует магнетит, находится в срастании с обломками и зернами пирита ранних генераций, содержит небольшие кристаллы пирита кубической формы (3-я генерация), кристаллизовавшегося вместе с ним. Халькопирит замещается ватанабеитом (сульфоарсенид меди) и содержит просечки галенита, в соответствии с рисунком 1.1г.

Ватанабеит находится в срастании с халькопиритом, в соответствии с рисунком 1.1г, замещает его, часто содержит включение энаргита (сульфоарсенат меди). Иногда образует зональные кристаллы на границе зерен халькопирита. Зональность обусловлена замещением мышьяка сурьмой в группе As_2S_3 . Наличие зональности в ватанабеите и его срастание с энаргитом свидетельствуют о вариации состава гидротермальных растворов (поступление Sb) и окислительно-восстановительных условий ($As^{3+} \rightarrow As^{5+}$) при кристаллизации этого минерала.

Галенит формирует вытянутые зерна (просечки) в халькопирите, включения в ватанабеите не отмечены, в соответствии с рисунком 1.1г, часто находится в срастании с айкинитом (сульфовисмутит свинца и меди), более идиоморфен чем сидерит. Содержит примеси серебра и железа.

Сидерит - последний минерал этой ассоциации. Выполняет полости между зернами более ранних минералов, в соответствии с рисунком 1.1г, часто образует хорошо ограненные, зональные кристаллы, находится в срастании с идиоморфными зернами кварца. Химический состав отличается от сидерита первой группы ассоциаций. Помимо кальция, ему свойственна примесь магния и марганца, скорее всего, свидетельствуя о смене состава/источника рудных растворов.

Золото-висмутотеллуридная минеральная ассоциация. Макроскопически не диагностируется. Представлена мелкими выделениями блеклых руд, сульфотеллуридов висмута, теллуридов золота и серебра, «низкопробного» золота. Отлагаются по трещинам в ранее выделившихся минералах, в соответствии с рисунком 1.1.

Блеклые руды представлены минералами из группы тенантита-тетраэдрита с преобладанием среди сульфоангидридов мышьяка над сурьмой.

Сульфотеллуриды и теллуриды висмута, золота и серебра. Теллуриды золота и серебра в большинстве случаев представлены петцитом и гесситом. Распространены незначительно, обычно заполняют трещины вместе с золотом, в соответствии с рисунком 1.1. В качестве примесей содержат немного меди и железа. Сульфотеллуриды висмута представлены тетрадимитом. Встречается в виде отдельных зерен в пирите, выполняет трещины в пирите и сидерите, находится в срастаниях с гесситом и айкинитом. В качестве примеси присутствует немного железа. Теллуриды висмута представлены раклиджитом (висмутотеллурид свинца). Выделяется по трещинам в пирите и сидерите. Содержит небольшую долю серебра.

Золото находится в срастании с описанными выше минералами, часто заполняет прожилки, в соответствии с рисунком 1.1е, образует ксеноморфные включения в пирите, либо присутствует в виде неправильных зерен в кварц-карбонатном агрегате. Золото «низкопробное», содержит примеси серебра (10-15 %) и меди (0-5 %).

Доломит является последним минералом этой ассоциации, выполняет прожилки и находится в срастании с перечисленными выше минералами

Выделенные ассоциации минералов были объединены в две группы и сопоставлены с разными этапами рудообразования. Установленная рудная минерализация является полихронной и может быть связана с разноглубинными очагами амуджикано-сретинского магматического комплекса, хотя не исключен вариант связи минерализации первого рудного этапа с рудным/жирекенским гранитоидным комплексом.

Это вывод является важным, так как значительно упрощает генетическое соотнесение элементных и минеральных ассоциаций, фиксирующих эволюцию рудного

процесса, при геохимических съемках в пределах рудного узла. В нашем случае, элементная ассоциация соответствующая той, или иной стадии минерализации будет целиком определяться набором химических элементов слагающих минералы рудных ассоциаций.

Вновь полученные данные позволили рассмотреть формирование рудного объекта в рамках модели эволюции порфировой рудной системы, с отнесением минеральных ассоциаций первого этапа рудообразования к Мо-порфировой субформации, второго этапа рудообразования к Мо-Си-порфировой субформации медно-молибден порфировой формации. Золотая минерализация Карийского рудного узла может быть связана с порфировой системой, фиксируя невысокий уровень эрозионного среза.

1.2 Восстановление условий формирования Ключевского месторождения на основе состава минеральных ассоциаций

Щербаков Ю.Д, Тарасова Ю.И., Будяк А.Е., Горячев Н.А. Восстановление условий формирования Ключевского месторождения на основе состава минеральных ассоциаций (подготовлена).

Типоморфизм самородного золота Ключевского рудно-rossыпного узла (Восточное Забайкалье). Ю.И. Тарасова, Ю.Д. Щербаков, С.В. Ефремов, А.Е. Будяк, Н.А. Горячев, В.А. Ванин, А.В Чугаев // Тихоокеанская геология (принята к печати)

Проведено исследование морфологии, гранулометрического и химического составов, характерных парагенезисов минералов самородного золота Ключевского месторождения, а также их сопоставление с золотом россыпных источников Давенда-Ключевского района. На основании взаимоотношений минералов выделены две разновидности самородного золота, отличающиеся по пробности

Сравнительный анализ золота из коренных месторождений и россыпей дает возможность не только устанавливать источники последнего, но и дает возможность получать дополнительные данные для уточнения генезиса золото-кварц-сульфидных объектов Восточного Забайкалья. Так сопоставление полученных результатов изучения самородного золота из рудной зоны Ключевского месторождения и из шлиховых проб, таких как типоморфные минеральные ассоциации, состав золота, морфологические особенности и гранулометрический состав показывает, что по многим характеристикам они хорошо согласуются между собой. В целом, данный вывод не противоречит результатам аналогичных исследований для Давенда-Ключевского рудного узла [31], и в целом для месторождений Забайкальского региона [36]. Кроме того, в большинстве россыпей района преобладает слабо окатанное золото, часто сохранившее первичную морфологию и сростки, что указывает на тесную связь с коренными источниками. Это повышает объем информации, а следовательно достоверность выводов о условиях формирования минерализации, при комплексном изучении рудного и россыпного золота.

Отдельно следует обратить внимание на высокопробные каймы частиц самородного золота из россыпей. Их не следует оценивать, как первичные, т.к. длительное нахождение частиц самородного золота в приповерхностных средах приводит к удалению Ag путем растворения по границам, в то время как Au остается. Все имеющиеся исследования свидетельствуют в пользу формирования высокопробного ободка путем удаления Ag, а не добавления Au [132].

На основании на работы [132], демонстрирующей связь изменения содержаний Au–Ag–Cu для различных месторождений, нами построена тройная диаграмма в соответствии с рисунком 1.2, отражающая составы рудного и россыпного золота. По результатам анализа химического состава самородного золота, включений в нем и минеральных ассоциаций, связанных с ним, можно выделить две отличающиеся группы. Самородное золото с пониженной пробностью, фиксируемое как в карьере, так и в россыпях, можно связать с наиболее ранними процессами формирования Ключевского месторождения. Другая группа золотин, характеризующаяся относительно повышенной пробностью, является результатом влияния поздних гидротермальных растворов одновременно с выделением минералов полиметаллической ассоциации. Пятнистые структуры самородного золота, предположительно, можно объяснить с тем, что на более ранних этапах формирования зерен были образованы мелкие кристаллические частицы, послужившие затравкой для последующего нарастания золота, связанного с более поздними процессами перераспределения вещества. Выделение двух типов золоторудной минерализации наглядно подтверждается результатами диагностического травления, а также изменчивостью пробности и содержания элементов-примесей в виде включений и прожилков самородном золоте.

На основании изучения большого количества самородного золота месторождений различных типов проведены работы по анализу и сопоставлению состава самородного золота коренных [107, 109, 132] и аллювиальных источников [87, 121]. В состав самородного золота в виде твердых растворов наиболее часто входит Ag, существенно реже отмечаются Cu, Fe, As и Bi, наличие которых напрямую зависит от термодинамических условий переноса и осаждения, а также от общего содержания металлов в системе [90, 102, 121, 127]. Температурная зависимость содержания Cu в сплаве Au–Ag предложенная [87] подтверждается и для относительно высоких концентраций Cu в золоте магмато-гидротермальных систем [93, 94, 119]. Так например золото из эпигермальных систем характеризуется низким содержанием Cu, в то время, как в самородном золоте, связанном с порфировыми системами богатыми Au, отмечается низкое содержание Cu и более высокое содержание Ag по сравнению с эпигермальными средами, в соответствии с рисунком 1.2. Самородное золото медно-порфировых систем, имеет высокое содержание меди и переменное содержание Ag. Увеличение Ag может быть также объяснено и за счет уравновешивания с более поздними флюидами, являющимися результатом эволюции гидротермальной системы [92].

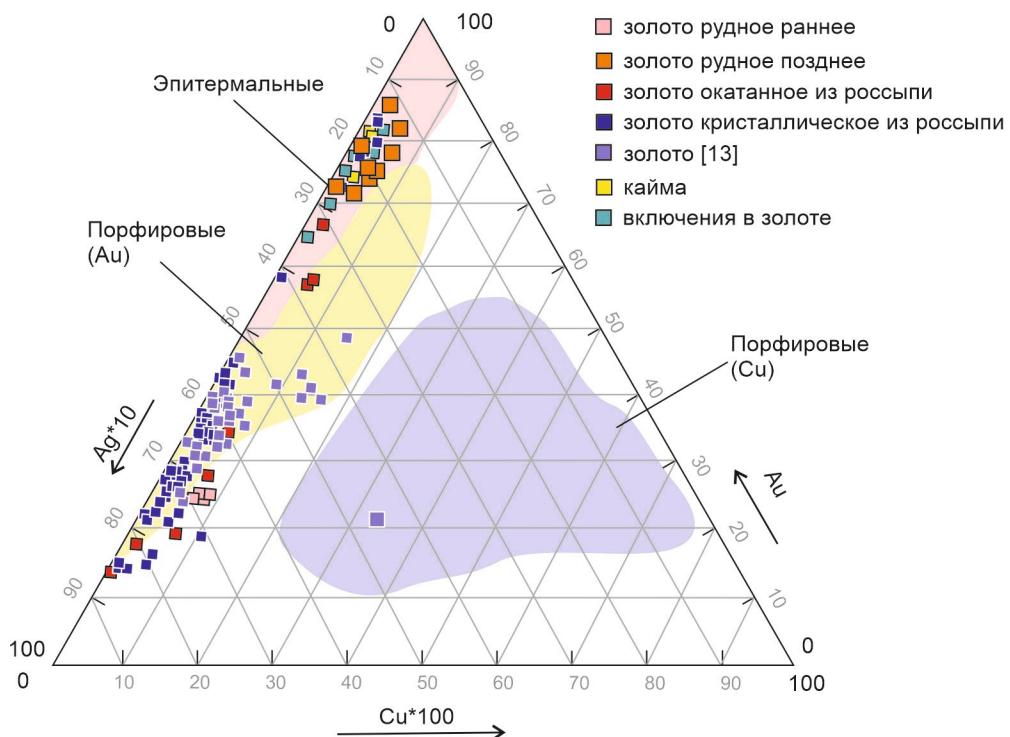


Рисунок 1.2 – Дискриминационная диаграмма [70] состава золота из коренных и россыпных источников Забайкальского края

Аналогичный характер развития золоторудных месторождений характерен и в целом для Забайкальского края и объясняется сложным процессом формирования золоторудной минерализации, нестабильностью Р-Т-Х условий во время рудоотложения, быстрой эволюции состава рудообразующих флюидов при формировании рудных жил [104, 105]. Так, для месторождения Дарасун проведен расчет равновесной минеральной ассоциации, представленной самородным золотом, пиритом, кварцем, халькопиритом, мусковитом, хлоритом, являющейся характерной для данного типа природных объектов [55]. В результате расчетов также показано отложение двух генераций золота: раннего высокотемпературного и позднего, температура кристаллизации которого близка к 210°C, соответствующей отложению самородного золота в ассоциации с сульфосолями в природных рудах [65, 74]. Изучение флюидных включений проведено и для наиболее близкого к Ключевскому месторождению месторождения Александровское [4], которое также подтверждает образование золотоносных жил при участии разных по солевому составу и РТ-параметрам флюидов. Все приведенные данные, определенно указывают на различные процессы формирования самородного золота в переделах Ключевского месторождения.

В результате проведённого исследования наглядно показано, что морфологические особенности самородного золота россыпей Давенда-Ключевского рудно-россыпного узла его пробность, гранулометрические характеристики, а также установленные для него минеральные ассоциации сходны с самородным золотом коренных источников региона, которые представлены магматогенными месторождениями [27, 36, 132]. Особенности химического состава и взаимоотношения самородного золота с сульфидными минералами подтверждают предположение, о двух разновидностях золоторудной минерализации. Что также согласуется с выделенными ассоциациями раннего самородного золота с турмалином и более позднего с пиритом, блеклой рудой, галенитом, сфалеритом, арсенопиритом. Результаты наших исследований коренного и россыпного золота могут использованы для корректировки представлений о генезисе золото-кварц-сульфидной минерализации Восточного Забайкалья [27], а также для цели выявления перспективных участков локализации коренных руд.

В продолжении восстановления условий формирования золоторудной минерализации Ключевского месторождения была проведена реконструкция последовательности минералообразования. С этой целью, для представления о составе первичных, вторичных минералов, порядке их кристаллизации были изучены образцы с наименьшей степенью вторичных преобразований достаточно высоким уровнем сохранности первичных минералов, а также для сопоставления руды сульфидно-кварц-турмалиновой стадии с прожилками более позднего карбоната. Эволюция составов минеральных парагенезисов этих образцов позволяют делать предположения о степени влиянии метасоматоза и гидротермальных изменений на формирование минеральных ассоциаций, а также предположительного состава участвовавших флюидов

Основными пордообразующими минералами являются полевые шпаты и чуть менее распространенные амфиболы. Амфиболы, являющиеся главными темноцветными минералами, также являются первыми в порядке кристаллизации, что следует из наличия, широко развитых в породе, крупных зональных прямоугольных кристаллов амфибала, соответствующих по составу магнезиально-железистой роговой обманке. Эволюция состава амфиболов ярко отражена в зональности наиболее крупных вкрашенников. Крупные прямоугольные кристаллы магнезиально-железистой роговой обманки обладают прямой концентрической зональностью от центра краю, выражющейся в уменьшении содержаний MgO и Cr_2O_3 и росте содержаний FeO^t , TiO_2 и Al_2O_3 , что приводит к тому, что края некоторых вкрашенников отвечают по составу уже паргизиту, более высокоглиноземистому и относительно более титанистому амфиболу. В породе также

присутствуют вкрапленники паргазита, как правило неправильной формы и с зонами замещения, где активно развивается кальцит. Такие вкрапленники также обладают зональностью также концентрического типа, но демонстрируют обратную зональность, с ростом содержаний MgO и FeO^t , и уменьшением содержаний Al_2O_3 . Важно отметить, что для магнезиально-железистых роговых обманок характерен постоянный рост соотношения Fe^{2+} к Fe^{3+} от центра вкрапленника к кайме (от 2 до 4), тогда как для вкрапленников паргазита соотношение обратное (от 7 до 3), что указывает на изменение окислительно-восстановительных условий в ходе эволюции породы. Среди амфиболов редко встречается актинолит, который относится к более поздним этапам кристаллизации, он распространен в виде микролитов. Во вкрапленниках магнезиально-железистой роговой обманки отмечаются включения титанита, в крупных трещинах присутствует минерал завершающих стадий – барит, а также отмечаются зоны замещения биотитом. Вкрапленники паргазита, образующие скопления из кристаллов неправильной формы, в центральных частях обладают зонами заполненными кальцитом и мелкими реликтами кварца, где встречаются мелкие кристаллы сульфидов – пирита.

Следующими после магнезиально-железистой роговой обманки по порядку кристаллизации являются полевые шпаты. Наиболее ранние полевые шпаты представлены крупными зональными кристаллами таблитчатой формы с зонами перекристаллизации. Центральные части вкрапленников представлены наиболее ранним по порядку кристаллизации андезином, далее к краю кристаллов отмечается рост минальных содержаний Ab и Or , с переходом состава в поле олигоклаза, для кайм таких кристаллов характерно резкое повышение Ab минала, что свидетельствует о повышении щелочности среды в ходе роста кристалла. Вторичные изменения во вкрапленниках плагиоклаза выражаются в наличии зон распада на альбит и микроклин с предельными содержаниями Ab и Or молекул, такие зоны образуются по трещинам. Также подобными перититовыми прорастаниями и кварцем сложена основная часть породы между вкрапленниками основных минералов – амфиболов, полевых шпатов и слюд.

На ряду с наиболее ранними плагиоклазами отмечается формирование биотита, также широко распространенного в гранодиорите, но имеющим подчиненное положение по отношению к амфиболам и полевым шпатам. Таблички биотита не имеют ярко выраженной зональности по составу, однако, по спаянности отмечается хлоритизация, а в зонах контакта с магнезиально-железистой роговой обманкой характерно также развитие титанита. В Срастаниях с биотитом часто встречаются циркон и апатит относящиеся акцессорным минералам. Апатит часто имеет выделяющуюся повышенными

содержаниями редкоземельных элементов промежуточную между центром и каймой. Цирконы дейтритовые, содержания Hf до 1 мас.%, признаки митамиктизации отсутствуют.

Позже накладывается минерализация представлена образованием кварцевых жил с развитием таких минеральных ассоциаций как – кварц-молибденитовой, кварц-турмалиновой, кварц-пиритовой, и кварц-полиметаллической. Завершающим этапом минералообразования является формирование карбонат-кварцевой ассоциации, являющейся продуктом низкотемпературного метасоматоза. Кварц-молибденитовая ассоциация развивается параллельно пертитизации крупных вкрапленников полевого шпата в ходе первых метасоматических этапов в породах кислых породах комплекса. Она характерна преимущественным развитием вкрапленников кварца обрастающих сростки первичных минералов, а также образованием микролитов молибденита и первыми этапами генерации молибденита, что свидетельствует о начале участия обогащенного флюида в минералообразовании.

Кварц-турмалиновая минеральная ассоциация как следует из своего названия содержит в себе турмалин – ключевой минерал, являющийся индикатором взаимодействия породы и метасоматических растворов. Изученные турмалины представляют из себя большие зональные агрегаты, развивающиеся в кварцевых жилах и крупных вкрапленниках кварца. Дровит, вероятно, наиболее ранний минерал из группы турмалинов, сохранившийся в виде реликтов в агрегатах. Реликты обрастают более железистыми турмалинами, фигуративные точки составов которых образуют тренд в сторону шерлов. Промежуточные и краевые части агрегатов турмалинов имеют включения пиритов, некоторые из которых имеют примесные содержания As (0.4-1.3 вес.%), зерна пирита располагающиеся ближе к центральным частям, также имеют примесные содержания Co (до 2 вес.%). Кристаллы турмалина, отвечающие по составу шерлам, имеют округлую форму и концентрическую зональность с уменьшением FeO_t и ростом Al₂O₃ от центра к краю, в соответствии с рисунком 1.3. Неравномерный градиент состава турмалина с трендом от дравита к шерлу свидетельствует о смене условий с окислительных на восстановительные в 3 этапа и увеличением активности H₂S и обильным осаждением пирита [88]. К этому этапу минерализации относится рутил развивающийся, как в пределах кварцевых жил, так и в срастаниях с пиритом, турмалином и микролитами биотита, в виде агрегатов неправильной формы и дендритов, микролиты обладают зональность с ростом содержания WO₃ от центра к краю (1-4 мас.%).

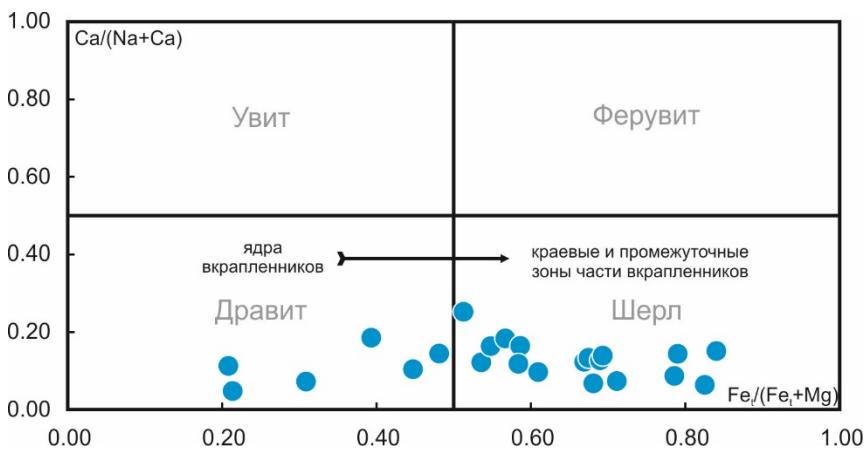


Рисунок 1.3 – Классификационная диаграмма составов турмалинов из пород Амуджиканского гранитного комплекса (соотношения элементов рассчитаны в формульных единицах)

Вместе с образованием шерлов формируется рудоносная кварц-пиритовая минеральная ассоциация. В кварцевых жилах и вкрапленниках наблюдается продолжительная кристаллизация пирита, обладающего неравномерной зональностью формирующей каймы вокруг центральных частей зерен и имеющих повышенные примесные содержания As и Co. Текстуры пирита в этой ассоциации варьируют от массивных до пористых, с преобладанием пористых, где полости в пирите заполнены поздними биотитом и амфиболом. В пределах зон с повышенным содержанием As отмечено развитие минеральных включений арсенопирита и реже сульфосолей.

Вместе с понижением температуры кварц-пиритовая ассоциация сменяется кварц-полиметаллической. Наиболее распространенным минералом этой ассоциации по-прежнему является пирит, схожий по морфологии и примесям с каймами пиритов из кварц-турмалиновой и кварц-пиритовой ассоциаций. Характерной особенностью этой минерализации является большое разнообразие входящих в нее сульфидов - халькопирит, теннантит, тетраэдрит, фрейбергит, галенит, сфалерит, нукундамит, люценит, тетрадимит, ватанабеит, формирующих как собственные зональные агрегаты, развивающиеся по зонам хлоритизации и между вкрапленниками минералов предшествующих ассоциаций, так и в виде минеральных включений в каймах более ранних пиритов и центральных частях более поздних.

Завершающий этап вторичной минерализации представляется из себя карбонат-кварцевую минерализацию. Кальцит и доломит замещают перитовые прорастания и заполняют трещины в кварцевых жилах. Среди кварцевого прожилкования отмечается развитие шеелита, крупных зерен до 400 мкм, обладающих зональным строение выражаящемся в колебаниях содержаний WO₃ от 9 до 12 вес.% от центра краю и резким

возрастанием его содержания до 17 масс.% в кайме зерна. Также в кварцевых жилах присутствуют небольшие зерна флюорита достигающих размером до 100 мкм и развивающимися в ассоциации с доломитом и кальцитом. К этому же этапу относится образование агрегатов гоязита минерала из группы алунита. В зонах хлортитизации биотита образуется гётит и барит.

Эволюция минеральных парагенезисов пород амуджиканского гранитного комплекса является отражением процессов, которые испытывали породы на протяжении всей своей истории. Наиболее ранняя магматическая стадия с формированием, характерных для гранитоидных серий, первичных минералов – амфибола и плагиоклаза, а также акцессориев – биотита, апатита, магнетита, титанита и циркона. Зональность в темноцветных минералах выражаясь в снижении #Mg (магнезиальности) от центра к краю, для лейкократовых минералов рост сдвиг фигуративных точек составов от андезина к олигоклазу, отражает постепенное понижение температуры и давления, а также рост щелочности остаточного расплава. Ассоциации вторичной минерализации можно разделить на два этапа – связанные с генерацией кварца и карбонатным, оба напрямую отражают метасоматические изменения пород. Первый этап связан с постепенным изменением состава флюида, изменением среды с восстановительной на окислительную, что подтверждается эволюцией состава турмалина от дравита до шерла, а так же обратной зональностью в некоторых поздних микролитах амфибола и биотита с ростом Fe^{2+} в сравнении с Fe^{3+} на ряду с возрастанием активности сероводорода на что указывает обильная генерация сульфидов и сульфосолей. Активное гидротермальное воздействие является характерным признаком второго этапа на котором образуется кальцит и доломита замещающие пертитовые прорастания альбита и микроклина, а также зональный по содержанию Mo шеелит.

Для формирования представлений об эволюции рудоформирующего флюида проведен был проведён анализ состава проходящих рудных минералов. В данной работе особое внимание уделено распределению элементов-примесей в различных морфологических разновидностях пирита и минералов группы блеклых руд.

Наиболее ранней является кварц-молибденитовая ассоциация представленная кварцем, молибденитом, пиритом-I, магнетитом.

Пирит-1 является более ранней разновидностью пирита, т.к. приурочена к трещинам во вмещающих породах, которые не дробят более поздние минеральные ассоциации. Пирит-1 представлен в основном мелкими округлыми и гексагональными зернами, реже идиоморфными и гипидиоморфными кубическими кристаллами. Размеры

отдельных зерен пирита-1 достигают первых сотых долей миллиметра, размеры образованных ими агрегатов около 0.5 мм. Агрегаты, образованные пиритом-1 интенсивно брекчированы, чаще приурочены к трещинам во вмещающих породах и слагают вытянутые образования. Пирит-1 встречается в виде реликтов в более поздних ассоциациях, связанных с развитием кварц-турмалиновых прожилков и рудным процессом. Чаще всего в них пирит-1 представлен включениями в халькопирите. По периферии и по трещинам в пирите-1 отмечается **рутит** в виде изометрических включений. В ассоциации с пиритом-1 развивается **магнетит** по трещинам в породе, образуя крупные дендритовидные выделения, а также по периферии кристаллов пирита-1, образуя ореолы и каймы. **Молибденит** отмечается в ранней минеральной ассоциации в виде мелких единичных включений. Зерна молибденита достигают 30 мкм по длиной оси.

Следующей по времени развивается кварц-пиритовая ассоциация представляет собой начало рудоформирующего процесса, связанное с высокими температурами. Здесь формируются кварц, пирит-2 и арсенопирит.

Пирит-2 представлен мелкими преимущественно идиоморфными и гипидиоморфными кристаллами, развивающимися в виде рассеянной вкрапленности в кварцевых прожилках, либо образующими агрегаты, вытянутые вдоль них. Размеры зерен около 100 мкм, размеры образованных им агрегатов достигают 0.5 мм. Зерна пирита-2 брекчированы и разбиты более поздними прожилками в значительно меньшей степени, чем пирит-1, тоже самое касается и агрегатов, образованных пиритом-2 разбиты более поздними прожилками. В пирите-2 установлены захваченные более ранние изометрические выделения рутила. В тоже время кристаллы пирита-2 часто встречаются в более поздней кварц-полиметаллической ассоциации и отмечаются в виде включений в халькопирите и сульфосолях. Пирит-2 отличается по своему химическому составу, так здесь появляется примесь мышьяка.

Кварц-полиметаллическая ассоциация является золотоносной. Преобладающим развитием здесь пользуются кварц, халькопирит, теннантит, тетраэдрит, пирит-3, сфалерит, люсонит, ватанабеит, в меньшей степени распространены фрейбергит, галенит, нукундамит, тетрадимит, висмутин, сфалерит, фламатенит, бенжаменит, альгодонит, валерит, борнит, глаукодот. По периферии агрегатов, образованных набором этой ассоциации отмечается развитие оксидных минералов. Самородное золото в изученных анишлифах представлено единичными знаками.

Блеклые руды широко развиваются на стадии рудного процесса и представлены обширным кругом минералов: теннантит, тетраэдрит, люсонит, ватанабеит, фрейбергит,

нукундамит, тетрадимит, фламатенит, бенжаменит, альгодонит, валерит, обладающих сходными условиями развития. Наиболее часто встречаются ватанабеит, Сульфосоли развиваются по трещинам и пустотам в пирите-3 заполняя их, по периферии агрегатов пирита-3, находятся постоянно в тесной ассоциации с халькопиритом, галенитом, реже сфалеритом. Морфология агрегатов блеклых руд угловатая, неправильная, часто ограниченная гранями или трещинами в пирите-3.

Пирит-3 является одним из наиболее распространенных минералов как среди минералов кварц-полиметаллической ассоциации, так и в целом в пределах Ключевского месторождения. Пирит-3 представлен крупными агрегатами неправильной формы, преуроченными к кварц-карбонатным прожилкам. Размеры агрегатов достигают нескольких сантиметров. Агрегаты пирита-3 разбиты трещинами разного направления и мощности, а также с периферии корродированы вторичными минералами. В пределах зерне и агрегатов пирита-3 выделяется морфологическая и химическая зональности. Так в центральной части видны пористые участки, в большинстве случаев пустоты заполнены вмещающими породами. Предположительно это ранние разновидности пирита-1 и пирита-2, вокруг которых развивается массивный пирит-3 с редкими включениями халькопирита. Внешняя часть агрегатов пирита-3 имеет рваный край. В этой части установлено большое количество включений мелких зерен турмалина и шеелита, захваченных при росте пирита-3. Самородное золото установлено в виде округлых включений в пирите.

В ассоциации с крупными агрегатами пирита-3 повсеместно встречаются сульфосоли, представленные разнообразными минералами этого ряда (ватанабеит, тетрадимит, люционит, энаргит) и халькопирит, развивающиеся по периферии и по трещинам. Сульфосоли развиваются по трещинам и пустотам в пирите заполняя их, следовательно определяя их морфологию, ограниченную гранями пирита.

На основании морфологических и химических признаков описанных выше, зерна пирита были распределены на 3 разновидности. В соответствии с рисунком 2.4 наглядно виден переход от пирита-1 к пириту-2, где не проявляется примесь Ni-Co-Cu-As. В пирите-3 по сравнению с более ранними разновидностями пирита отмечается снижение количества Ni-Co-Cu при сохраняющемся значительном количестве мышьяка, превышающем 3 % мас.

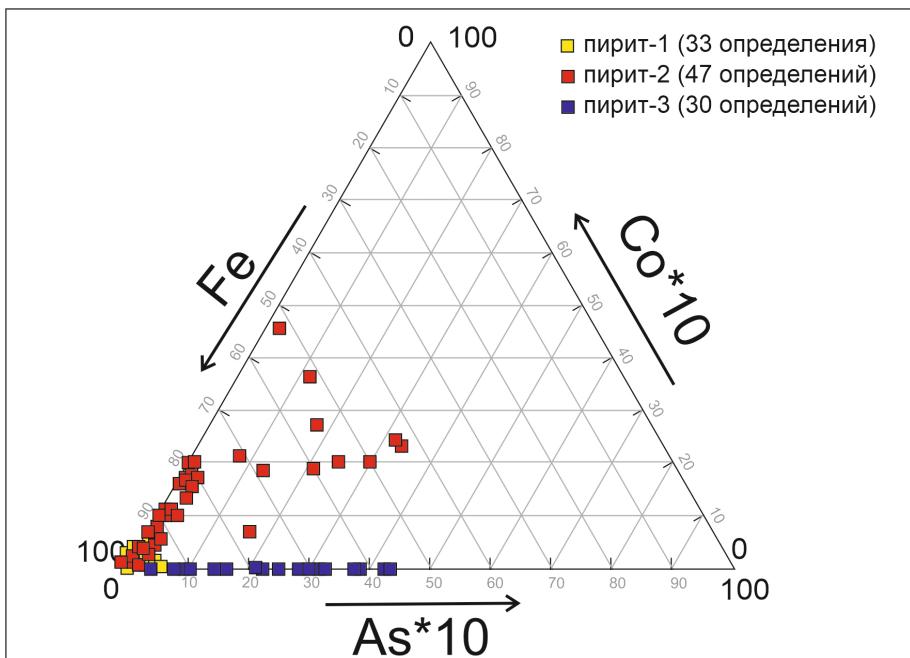


Рисунок 1.4 – Состав разновидностей пирита

Изменчивость состава минералов напрямую связана с нестабильностью условий кристаллизации, так показано [116] влияние высокотемпературных флюидов на обогащение пирита медью, поскольку растворимость Cu в гидротермальных флюидах, содержащих Cl, увеличивается с повышением температуры флюида [97, 98]. Более высокие температуры способствуют проникновению в пирит большого количества металлов (таких как Cu, Co и Ni), что приводит к значительным дефектам кристаллической решетки и вакансиям [103, 111, 115], что в свою очередь делает элементарную ячейку нестабильной и благоприятствует сочетанию более тяжелых и крупных элементов, таких как Au [112].

Соответственно, можно предполагать кристаллизацию пирита-2 в условиях роста температуры, а пирита-3 при ее снижении. Колебания такого рода могут быть объяснены тем, что морфологические разновидности пирита были сформированы в результате различных процессов.

Обратная картина складывается на основании изучения минералов группы блёклой руды. Во всех изученных образцах из рудной зоны месторождения выделяется ассоциация самородного золота с пиритом, халькопиритом и минералами группы блеклых руд, представленных непрерывным рядом тенантит–тетраэдрит. Агрегаты сложенные блеклыми рудами не обладают резко выраженной зональностью, поскольку формируются в упорядоченных условиях при постепенном снижении температуры. Зональность блёклых руд обусловлена вариациями содержаний As–Sb. В блёклых рудах Давенда-Ключевского рудного узла наблюдается эволюция от тенантита к тетраэдриту, в

соответствии с рисунком 1.5, что отвечает стандартному тренду снижения температуры кристаллизации минералов группы блёклых руд [77]. Экспериментально установлено, что с понижением температуры возрастает сурьмянистость блёклых руд, ассоциирующих с энаргитом [99]. Отсюда можно сделать вывод, что изменения состава блеклых руд связаны с постепенным снижением температуры, отражая, только заключительный этап формирования месторождения.

Отсутствие примеси Ag и серебристых блёклых руд возможно обусловлено эрозионным срезом, т. к. по данным [55] более высокие содержания серебра и сурьмы в блёклых рудах наблюдаются на периферии порфировоэпимеральной системы. Согласно [127] появление теллуридной минерализации совместно золотом указывает на температурный интервал формирования этой ассоциации около 253–181 °С.

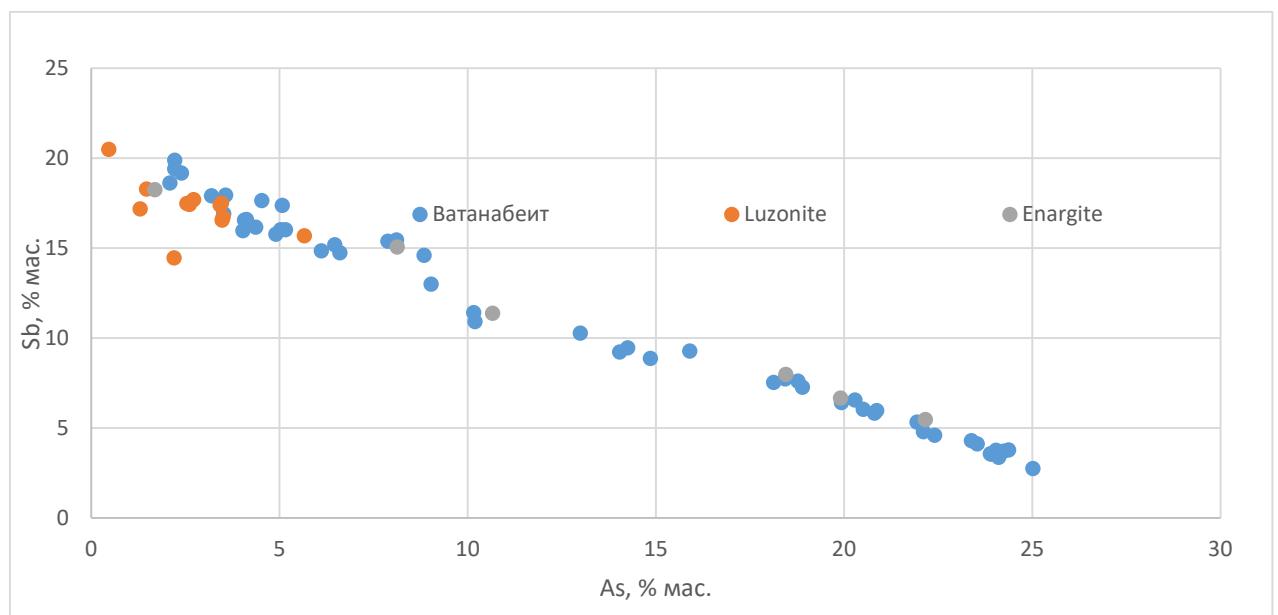


Рисунок 1.5 – Содержание Sb и As в минералах группы блеклых руд

Выделенные ассоциации минералов были объединены в две группы и сопоставлены с разными этапами рудообразования. Сделано предположение о полихронной природе рудной минерализации и связи минерализации разных этапов рудообразования с разноглубинными очагами амуджикано-сретинского магматического комплекса.

Таким образом процесс формирования рудной зоны месторождения Ключевское является результатом последовательно сменяющихся условий и представлен развитием наложенных друг на друга минеральных ассоциаций. Наиболее ярко этот процесс виден

по постепенному увеличению сульфидных минералов, их разнообразию, с последующим затуханием. Отдельно следует отметить привнос мышьяка с переходом от его отсутствия к постепенному появлению в виде примеси в пирите и более поздним образованием собственных минеральных форм арсенопирита и сульфосолей. В целом изучение показало, что по набору ассоциаций фиксируется полный ряд типичный для эволюционирующей РМС. Присутствуют минеральные ассоциации относимые к пневматолитовому этапу, ассоциации характеризующие высоко-, средне- и низкотемпературный гидротермальный процесс. Особый интерес вызывает два этапа турмалинизации наложенных один на другой, предваряемый интенсивным дроблением. Теоретически, они должны быть пространственно разобщены и фиксировать разные зоны по удалению от магматического очага. Однако в этом случае этого не происходит, что дает возможность связать второй этап турмалинизации со самостоятельным магматическим очагом.

Важным является выделение двух разновидностей самородного золота. Золото из этих образований отличается различиями пробности, приуроченностью к ассоциациям, и морфологическими особенностями. Подобное распределение золота свойственно всем золото-турмалиновым объектам региона. Полученные результаты Ключевского месторождения довольно хорошо согласуются с результатами полученными для Кариjsкого рудного узла. Здесь также выделяется молибденовая минерализация в ассоциации с магнетитом и сидеритом, наложенная на них турмалиновая минерализация в ассоциации с пиритом, молибденитом и шеелитом, пирит-халькопирит-сульфоарсенидная минерализация, возможно золото-висмутовая минерализация.

Все эти данные могут быть использованы при выделении критериев при построении поисковой модели рудных объектов золото-турмалинового генетического типа. Схожесть в развитии рудно-магматических систем для рудных объектов расположенных на значительном удалении друг от друга говорит об унифицированности процесса рудообразования и об постоянстве источника химических элементов. Это позволяет довольно уверенно идентифицировать эти объекты и, используя особенности эволюции РМС, оценивать их важные параметры такие как объем оруденения и уровень эрозионного среза.

1.4 Рудная минерализация Алиинского рудного поля (Забайкальский сектор монголо-Охотского орогенного пояса): структурные соотношения, минералогия, геохимия и зональность. Горячев, Н. А., Юргенсон Г. А., Никанюк Т. Н. // Геология и геофизика, т. 66, № 7, с. 831–843, DOI: 10.15372/GiG2025109, EDN: MTSQLQ

Алиинское рудное поле включает в себя эксплуатируемое Верхне-Алиинское золоторудное месторождение и ряд рудопроявлений (Контактовое, Мунгинское, Новое и др.) и расположено на юго-восточном фланге Балейского рудного района. В настоящее время это один из немногих геологических объектов, где производится добыча рудного золота в Забайкалье. Верхне-Алиинское месторождение введено в эксплуатацию недавно и привлекло меньше внимания исследователей, по сравнению с его знаменитыми соседями (Балейское, Тасеевское, Средне-Голготайское и д р.) [15, 21, 22]. Собран новый материал по жиле Главной, включая глубокие горизонты месторождения, и с рудопроявлений Рябоконь и Новое, а также получены новые данные по минералогии, позволяющие подойти к вопросу зональности оруденения в пределах всего рудного поля.

Верхне-Алиинское месторождение золота входит в состав Мунгинского рудного узла и расположено на юго-восточном фланге Балейского рудного района Забайкалья [1, 21, 61]. Вместе с месторождениями Сосновским, Майским, Средне-Голготайским и Андрюшкинским оно формирует субширотную полосу рудопроявлений и месторождений мезотермального золотого оруденения на южном фланге Балейского рудного района. Полоса золотого оруденения несогласна с основным северо-восточным направлением главных разломов района (Борщовочным, Саранинским и Алиинским) и маркирует южный фланг позднеюрско-раннемелового вулканогенного прогиба, обрамляющего позднемезозойский Борщовочный гранитно-метаморфический вал, наложенный на палеозойские терригенно-карbonатные отложения.

В геологии Алиинского рудного поля (Мунгинский рудный узел) отчетливо выделяются два структурных яруса: палеозойский, представленный терригенно-карбонатными осадками и пермскими гранитоидами ундинского комплекса, и мезозойский, состоящий из среднепозднеюрских вулканогенно-осадочных образований шадоронской серии и интрузивных образований шахтаминского и акатуйского среднепозднеюрских комплексов [1, 45].

К специфике распределения минералов относится заметное увеличение роли антимонита на дальнем фланге Восточной зоны, где в жиле Антимонитовой его концентрация достигает первых процентов, а также в жилах участка Новый. Главные рудные жилы полисульфидные встречаются двух типов: пирит-арсенопиритовые с

кварцем и пирит-халькопирит-полиметаллические, иногда оба типа сочетаются в едином рудном теле. В пределах Алиинского рудного поля авторами выделяется два этапа формирования гидротермальной минерализации: ранний турмалин-мусковит-кварцевый, связанный с ундинскими гранитами, и поздний, собственно рудный, в составе которого иногда отмечается, помимо кварца и сульфидов, вторая генерация турмалина [15]. В пользу этого свидетельствуют наблюдения пересечения турмалиновых полос, заметно проявленных в ундинских гранитах, прожилками кварца с сульфидами на проявлении Новом. Это можно также видеть и на участках многократного брекчирования жилы Главной, состоящих из обломков пропилитизированного и окварцованных граносиенита в кварц-турмалиновом цементе с мелкой вкрапленностью пирита, арсенопирита, висмутина и тетрадимита, рассеченной поздними тонкими прожилками тонкозернистого полосчатого кварца или карбонатно-кварцевого состава.

Сочетание продуктивных жил разнотипного кварца и широкое распространение жил халцедоновидного кварца среди них может свидетельствовать о меньшей глубине формирования Верхне-Алиинского месторождения, по сравнению с другими месторождениями южного фланга Балейского рудного района. В пользу такого предположения свидетельствуют и данные по СКС рудоносного кварца Верхне-Алиинского месторождения [86], согласно которым в пределах месторождения выявляется вертикальная зональность от халцедоновой разновидности кварца с СКС 35 % на восточном фланге до хорошо раскристаллизованного кварца с СКС более 60 % (до 93 %, по [86]) для жил Широтного и Западного участков, максимально приближенных к выходам граносиенит-порфиров III фазы.

Особенностью валовых проб жильного кварца Верхне-Алиинского месторождения является также уменьшение с глубиной содержаний рубидия в жиле Главной (г/т): 182 в надрудной, 109 в верхнерудной и 54 в рудной ее части [85]. В этом отношении интересные данные получены при сопоставлении составов арсенопирита, отобранного из разных участков жильной зоны Главной по вертикали – от сурьмянистого, характерного для малоглубинных уровней формирования золотой минерализации, к слабомышьяковистому более глубинных уровней. Аналогично арсенопирит участков Западный и Рябоконь, максимально приближенных к телу поздних граносиенит-порфиров, также наиболее мышьяковистый. Интересно, что пирит глубоких горизонтов не содержит мышьяка и немного сернистый, равно как и пирит зон Западной и Рябоконь.

Авторами выполнен в Аналитическом центре ДВГИ ДВО РАН (аналитик Т.А. Веливецкая) анализ изотопного состава серы арсенопирита, пирита, пирротина и

халькопирита Верхне-Алиинского месторождения из Западного участка, показавший преобладание ювенильной серы: арсенопирит – +1.5 %, пирит – +2.0 %, пирротин – +0.5 %, халькопирит – +1.4 %.

Имеющиеся в нашем распоряжении материалы по минералогии отдельных рудных тел (участок Восточный, зона Главная и жила Рябоконь), также показывают специфику проявления второстепенных и редких минералов в намечающейся зональности рудной минерализации. Так, зона Главная характеризуется присутствием не только редких джириита и сульфосолей свинца, но и беспримесным галенитом и достаточно высокожелезистым сфалеритом. В то время как в жиле Рябоконь место сульфосолей свинца занимают его сульфовисмутиды, и сам галенит оказался богат висмутом и серебром.

Следует также отметить наличие своеобразной микроминеральной зональности сульфидно-сульфосольных включений в кварце жильной зоны Главной, характеризующейся наличием зоны отложения сульфосолей в ассоциации с джириитом вдоль контакта галенита с кварцем. Это явное проявление неустойчивости минеральной системы в процессе рудоотложения, характерной для малых глубин.

Золото в первичных рудах находится в самородном виде, других минеральных форм не обнаружено. При изучении технологических проб установлено, что золото в руде ассоциирует в основном с кварцем, пиритом и арсенопиритом. Крупные золотины в основном имеют удлиненно-неправильную, уплощенную, реже комковидно-неправильную и ажурную формы. В то же время данные электронной микроскопии показывают, что ультрамелкие частицы золота имеют массивный псевдокристаллический и дендритовидный (листоватый) облик.

По результатам гранулометрического анализа установлено, что основная масса золота (50.6–75.4 %) представлена мелкими и тонкими золотинами класса –0.071 мм. При этом масса более крупного золота (19.8–26.8 %) достаточно равномерно распределена по классам крупности от –0.5 до –0.1 мм. На долю золота, представленного золотинами, размер которых превышает 0.5 мм, приходится от 1.1 до 11.7 %.

Данные сцинтилляционного анализа показали, что среди мелкого и тонкого золота преобладают золотины крупности от 3 до 25 мкм. Установлено, что содержание золота данной крупности составляет 18.6 % от общего содержания драгоценного металла в пробе руды, притом, что 80 % его относится к классу 25–15 мкм.

Цвет основной массы золота имеет тусклый, грязно-желтый оттенок. Пробность золота, по данным атомно-абсорбционного анализа, составляет 848–870 %, а по

результатам 23 микрозондовых анализов (TESCAN TIMA) варьирует в более широких пределах – 680–925 ‰ (участок Западный, жила 5 – 713–925 ‰, участок Восточный, зона Главная жила 1-бис – 839–728 ‰, рудопроявление Рябоконь – 680 ‰), очень редко отмечены выделения электрума в зоне Главной [86].

Анализ монофракций пирита и арсенопирита из состава технологических проб показал близкие концентрации золота в них (г/т): пирит – 18.1–35.5, арсенопирит – 15.6–35.5.

В составе первичных руд преобладают кварц, силикаты и пирит с арсенопиритом. Большое значение для извлечения играют такие показатели, как степень окисления руд, степень сульфидности и упорность руд. Первичные руды по степени сульфидности занимают большой диапазон от слабосульфидных до сульфидных, в основном являясь умеренно-сульфидными и относительно слабоокисленными.

При этом уровень содержания полезного компонента в них близок и варьирует в пределах 6.0–13.6 г/т при относительном обогащении окисленных руд (9.7–48.2 г/т) вследствие высвобождения и концентрирования в них свободного золота. Частицы золота с чистой поверхностью, не задетых оксидными пленками, практически нет, все они в разной степени ассоциируют с гидроксидами железа. Важным аспектом является то, что окисленные руды характеризуются более крупным золотом (50 % более 0.07 мм), в отличие от первичных (75 % менее 0.07 мм).

Первичные руды месторождения являются упорным в технологическом отношении сырьем, поскольку в рудах преобладает очень мелкое и тонкое золото, и часть его в тонкодисперсной форме содержится в сульфидах. Кроме того, в рудах присутствует значительная доля вредных примесей, находящихся в виде сульфидных, карбонатных и сульфатных минералов цветных металлов и железа. Поэтому извлечение из руды золота цианистым процессом составило 70.3–78.4 %.

Геохимия рудных тел верхних горизонтов участка Восточный [86], демонстрирует с одной стороны, общий уровень концентраций элементов в верхней части рудных тел, где оказались высокие содержания Zn, Pb, Cu, Sb, Bi, As, с тенденцией к их уменьшению к нижним горизонтам, которые характеризуются также низкими концентрациями Co, Ni, Mo. В то же время новые данные, полученные нами при опробовании руд на горизонте 675 и 775 м, достаточно контрастно отличаются существенно большей концентрацией As, Co, Ni, Bi, Mo и весьма низкой концентрацией Sb, Zn. В целом, на горизонте 675 м рудная жила оказалась обогащена типоморфными элементами As, Bi, Co, Cu, Mo, S, а также Cd, Ni, Sn. Для окологильных метасоматитов характерно обогащение пордообразующими

элементами Al, Ca, K, Mg, Mn, Na, P при относительно повышенных концентрациях As, Cu, Ni, S, т. е. геохимическая зональность, выявленная ранее, получила дополнительное подтверждение нашими новыми данными.

Таким образом, характеризуя геохимические особенности рудной минерализации Алиинского рудного поля, отметим, что, несмотря на разную представительность данных, можно утверждать, что руды Верхне-Алиинского месторождения характеризуются постоянно высокими концентрациями As, S, Bi, иногда высокими Cu, Co, Sb, Pb и Zn относительно фоновых концентраций и концентраций в оклорудных березитах. При этом следует отметить неравномерность распределения Sb, Co, Ni, Cu, Pb и Zn, что, вероятнее всего, связано с геохимической и минеральной зональностью минерализации количеством сульфидной вкрапленности, что находит отражение в неравномерном распределении в них серы, меди, свинца и цинка.

Если же рассматривать вариации микроэлементного состава в масштабах рудного поля, то можно отметить дополнительное подтверждение нашими новыми данными вывода [86] о наличии минералого-геохимической зональности не только в пределах месторождения, но и всего рудного поля в целом. Так, отчетливее проявляется обогащенность руд флангов рудного поля Sb, Pb и Zn, а для центральных частей, максимально приближенных к ареалу выходов граносиенит-порфиров третьей фазы, характерны повышенные концентрации Co, Ni, Cu и появление высоких содержаний бора.

По нашим наблюдениям, рудная минерализация Верхне-Алиинского месторождения и рудопроявлений Алиинского рудного поля отличается от таковой типичных мезотермальных месторождений (Средне Голготайского [32], Сосновского, Майского и Андрюшкинского) высокой сульфидностью продуктивных руд, малыми размерами частиц самородного золота, относительной редкостью находок турмалина и минералов висмута и заметно меньшей ролью кварца в составе продуктивных ассоциаций. Типоморфные свойства кварца (низкая степень его кристаллического строения, халцедоновидный облик, особенно наименее эродированной зоны Восточной [86]), повышенная сульфидность руд и локализация свинцовых и висмутовых сульфосолей в виде тонких микровключений в пирите и арсенопирите с элементами зонального отложения сульфосолей и галенита в кварце, высокая доля частиц самородного золота (менее 0.07 мм более 50–70 %) – все это свидетельствует о малых глубинах минералообразования: переходных от среднеглубинных, характерных для вышеуказанных месторождений, к приповерхностным, типоморфным для основного оруденения Балейского рудного района. Узкий диапазон изотопного состава серы рудных минералов

(+0.5...+2.0 ‰ – 4 пробы) свидетельствует о ювенильном, магматогенном источнике серы. Составы сосуществующих пирита и арсенопирита, арсенопирита и сфалерита указывают на среднетемпературные условия их кристаллизации (350–300 °C). В то же время текстурные характеристики руд, наличие микровключений золота и сульфосолей Pb и Bi в арсенопирите и пирите свидетельствуют о нестабильности $P-T-X$ условий во время рудоотложения, быстрой эволюции состава рудообразующих флюидов с угнетенной сульфосольной ассоциацией и широком распространении антимонитовой минерализации в конце процесса. Это также отличает Алиинское рудное поле от мезотермального оруденения Средне-Голготайского, Майского, Казаковского и Сосновского месторождений. Данное отличие, на наш взгляд, связано с выявленной в пределах рудного поля и месторождения минералого-геохимической зональностью относительно выходов на поверхность интрузивных пород III фазы акатуйского комплекса. Степень СКС кварца Западного и Широтного участков, максимально приближенных к интрузивному телу этой фазы, устойчиво выше, чем в рудах восточного участка Верхне-Алиинского месторождения, максимально удаленного от плутона.

Западного участка Верхне-Алиинского месторождения, которая, с одной стороны, максимально приближена к гребню слабовскрытого массива граносиенит-порфиров III фазы акатуйского комплекса, трассируемого по штокообразным и дайковым выходам северо-северо-западном направлении, а с другой – локализована частично в габбро-монцонитах I фазы этого комплекса, возможно, обеспечивших их высокие концентрации [86]. Косвенно о возможном влиянии основных пород на содержание Co и Ni свидетельствуют их низкие концентрации в жиле Рябоконь, находящейся также недалеко от выхода поздних граносиенит-порфиров. Тем не менее это следствие их максимальной близости к магматитам заключительной фазы, под воздействием флюидной системы которых произошло извлечение этих элементов из пород ранней фазы. Можно отметить также и роль Bi, повышенные концентрации которого и его минералы также тяготеют к выходам граносиенит-порфиров заключительной фазы (зоны Западная и Широтная). Вместе с тем в рудопроявлении Новое индикаторность удаленности от основного магматического тела проявляется в аномально высокой концентрации Sb не только в рудных жилах, но и в окорудных метасоматитах. Здесь уместно отметить высокую концентрацию В и Bi при невысоких содержаниях Cu, Pb, Zn, Sb в жиле Рябоконь, расположенной также недалеко от этого гребня. Последние, судя по нашим данным, можно рассматривать как индикаторы удаленности рудной минерализации от магматического ядра рудного поля.

Геологическая ассоциация рудных тел с поздними монцонитоидными производными акатуйского комплекса среднепозднеюрского возраста и выявление элементов вертикальной и горизонтальной зональности в пределах месторождения и рудного поля по свойствам рудного кварца, по нашим данным, а ранее и сульфидов [15] и по распределению редких минералов группы сульфосолей Pb и Bi предполагают как минимум парагенетическую связь рудной минерализации с магматическими телами этого комплекса как продуктов единой рудно-магматической системы. Результаты минералогического исследования технологических проб руд тем не менее показывают, что оруденение сформировалось в условиях малых глубин, переходных к близповерхностным, что подтверждает относительно ранние предположения [86]. Они свидетельствуют о нестабильности $P-T-X$ условий во время рудоотложения и быстрой эволюции состава рудообразующих флюидов при формировании рудных жил, что при всем общем минералого-geoхимическом сходстве с другими месторождениями золота рудного района отличает Верхне-Алиинское месторождение от них, а также обусловило отчасти технологическую упорность его руд.

РАЗДЕЛ 2 МЕСТОРОЖДЕНИЯ БОДАЙБИНСКОГО РАЙОНА

2.1 Роль органического углерода при формировании месторождений золота орогенного типа (Бодайбинский регион, Россия). Будяк А.Е., Тарасова Ю.И. (2025) // Геология и геофизика, т. 66, № 7, с. 860–882, DOI: [10.15372/GIG2025122](https://doi.org/10.15372/GIG2025122)

Обобщены результаты многолетних геохимических исследований, посвященных региональной геологии Бодайбинского синклиниория в целом и локальной (рудной) геологии отдельных золоторудных месторождений орогенного типа, локализованных в пределах крупнейшей в мире Ленской металлогенической провинции. Основное внимание уделено роли органического вещества в процессе рудогенеза. В работе представлены результаты исследования преобразования органического вещества углеродистых сланцев (растворимого (битумоида) и нерастворимого углеродистого вещества) в процессе катагенетических и метаморфических преобразований.

Результаты изучения органического вещества (ОВ) на месторождениях Угахан, Сухой Лог, Голец Высочайший и Красный сопоставлялись как между собой, так и с данными по отложениям бужуихтинской, хомолхинской и аунакитской свит вмещающими перечисленные месторождения, а также прочими углеродистыми отложениями осадочного палеобассейна Бодайбинского синклиниория [16, 58, 59].

Содержание валового органического углерода в пределах бужуихтинской, хомолхинской и аунакитской свит независимо от степени метасоматических изменений и близости к рудной зоне изученных месторождений, варьирует в пределах ~ 0.6-4 % (max 7% рудная зона месторождения Сухой Лог), что значительно превышает его содержание в прочих отложениях, расположенных в пределах разреза Байкальской горной области. Исключением являются отложения вачской свиты содержания C_{org} которой достигает 10% (среднее ~ 6.8%). При пересчете баланса органического вещества необходимо учитывать то, что основная часть ОВ (до 70%) мигрирует из толщи нефтематеринских пород в виде образовавшегося катагенного флюида (палеонефти) и вслывает по субвертикальным трещинно-поровым каналам вверх. Таким образом, количество C_{org} в породе на раннем докатагенном этапе развития палеобассейна (седиментация и диагенез) необходимо увеличивать в 2-3 раза относительно его современного количества, до 5-8%.

Согласно проведенным исследованиям, органический углерод осадочных отложений более чем на 99,5% представлен его нерастворимой частью (нерастворимое углеродистое вещество – НУВ) и всего на 0,5% его растворимой частью (битумоид).

Соответственно отсутствие значимой корреляционной связи золота и органического вещества, в соответствии с рисунком 2.1, может свидетельствовать о том,

что НУВ, представляющее подавляющую часть $C_{\text{орг}}$ во вмещающих черных сланцах, не является важным фактором, способствующим сорбции золота. Это подтверждает выводы, сделанные ранее Э.А. Развозжаевой [59], о неспособности упорядоченного графитизированного углеродистого вещества сорбировать металлы из внешнего флюида. В своей работе В.К. Немеров с соавторами [43] также утверждают, что «в процессах постседиментационных преобразований (метаморфизм различных фаций) углеродсодержащих пород, металлоносное УВ в результате метаморфизма и окисления, теряет связь с металлами. Используя показатель металлоемкости углеродистого вещества (ПМУВ), авторы наглядно продемонстрировали тренд снижения металлоемкости ОВ от протокатагенетических к апокатагенетическим и метаморфическим (зеленосланцевая фация) группам пород более, чем в 5 раз, что, вероятно, связано с потерей H_2O , H_2 , O_2 , N. Таким образом, к началу метаморфических преобразований (стадия апокатагенеза) происходит максимальное истощение металлогенического и флюидного ресурса углеродистой металлоносной толщи. Принимая данное утверждение, мы приходим к выводу, что количество графитизированного ОВ в породе не может являться прямым признаком при поисковых работах на рудное золото.

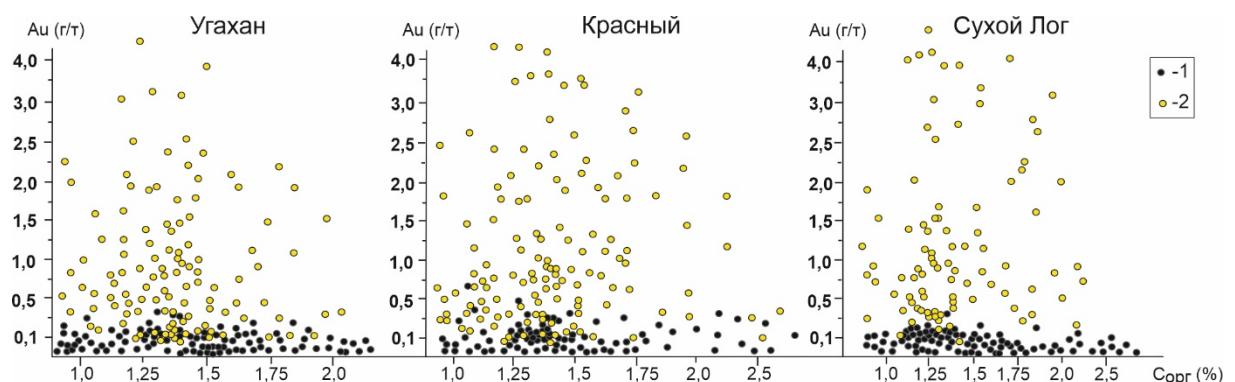


Рисунок 2.1 – Корреляционная диаграмма соотношений содержаний золота с концентрацией органического углерода: 1 – рудная зона; 2 – вмещающая порода

При этом содержание битумоида в рудной зоне изучаемых месторождений увеличивается почти в 3 раза для месторождения Угахан (с 0.008% → до 0.020%), и более чем в 4 раза для месторождений Голец Высочайший и Сухой Лог (с 0.011 → до 0.041% 0.043% соответственно), а также месторождения Красный (с 0.011% → до 0.046. Столь значимое увеличение концентрации битумоида в зоне рудообразования объясняется катагенной миграцией органического флюида в сводовые части антиклинальных структур, которые на более позднем этапе контролировали процесс формирования аномальных

содержаний золота. Незначительные, но сопоставимые между собой содержания битумоида во вмещающих отложениях за пределами месторождений, по всей вероятности, являются реликтом остаточной нефтенасыщенности («мертвая нефть»), которая необходима для смачивания порового пространства при капиллярном вертикальном и латеральном продвижении катагенного флюида. Согласно [44] количество такой остаточной нефти варьирует в пределах 30 – 40% от порово-трещинного пространства. Избыточные концентрации образовавшегося флюида над той частью, которая формирует остаточную нефтенасыщенность, мы и наблюдаем в увеличенном количестве битумоида в апикальных частях антиклиналей. Можно предположить, что, чем выше начальное содержание ОВ в нефтематеринской породе (докатагенный этап), тем выше содержание битумоида в рудной зоне мы наблюдаем в настоящее время. Соответственно углеродсодержащие отложения, резерв ОВ которых не превышает порога остаточной нефтенасыщенности («мертвой нефти»), реализовать модель формирования месторождений СГТ не способны. Исходя из данного утверждения, отложения нижележащих хайвергинской, бугарихтинской, марииинской, а также вышележащей илигирской свит, согласно данного показателя, не имеют перспектив на формирование месторождений СГТ, в соответствии с рисунком 2.2.

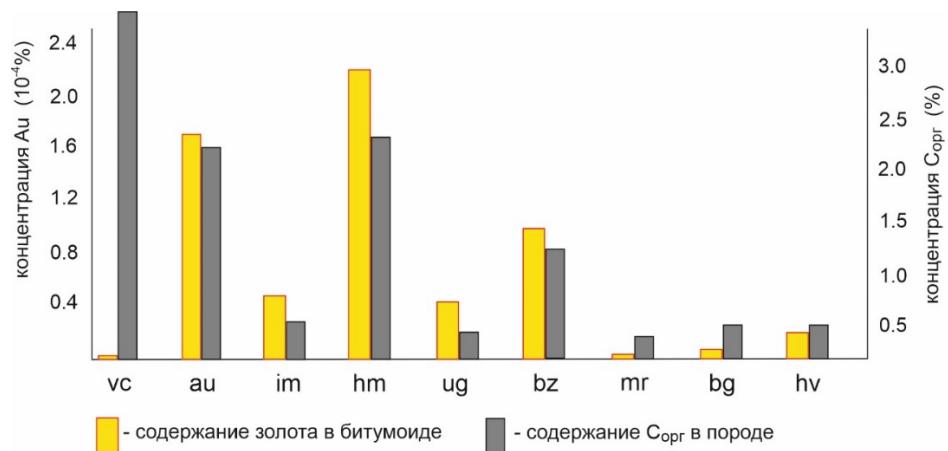


Рисунок 2.2 – Концентрации Au в битумоидах (анализы выполнены в ВостСибНИИГГиМС, Г.А. Валл и в ИГХ СО РАН, Н.Н. Брюхановой) и C_{орг} в породе неопротерозойских отложений Бодайбинского региона

Другим показателем оценки перспективности является содержание золота в первичном катагенном флюиде. Необходимо отметить, что содержание золота, в битумоиде бужуихтинской, хомолхинской и аунакитской свит независимо от близости к

рудной зоне изучаемых месторождений, значительно выше относительно отложений хайвергинской, бугарихтинской, вачской и илигирской свит, в соответствии с рисунком 2.2.

Как известно, количество переносимого золота в составе катагенного флюида зависит от специализации нефтематеринских пород, а также от его генезиса и элементного состава [13, 34, 35, 60, 67, 68]. Ввиду чего при изучении битумоида, который согласно [60], представляет собой реликт первичного катагенного флюида, особое внимание было уделено именно этим аспектам.

Значительное обогащение золотом битумоида бужуихтинской, хомолхинской и аунакитской свит хорошо согласуется с нашими работами [43, 82], в рамках которых была продемонстрирована сидеро-халькофильная с ураном и золотом специализация отложений дальнетайгинского-жуинского стратоуровня. В многочисленных работах доказывается, что приобретение халькофильной геохимической специализации данных отложений Бодайбинского региона происходило на этапе седиментации под влиянием деятельности вулканических аппаратов Байкало-Муйской зоны, а также поступления гидротермальных экскаваций в зоне рассеянного спрединга Олокитского задугового бассейна в эдиакарский период неопротерозойской эры [43, 70, 81]. Соответственно, геохимическая специализация битумоида первоначально связана с седиментационным, а позже с этапом катагенных преобразований данных углеродистых отложений.

Идентификация сложных и простых эфирных связей в образцах битумоидов отложений бужуихтинской, хомолхинской и аунакитской свит, а также месторождений, в них расположенных указывает на бактериально-планктоногенный источник ОВ исследуемых толщ. Таким образом, геохимическая специализация битумоида, являющегося реликтом палеонефти, наследует геохимический потенциал углеродсодержащих (нефтематеринских) толщ докатагенной стадии развития. Полученные спектры исследуемых образцов типичны для битумоидов низких и средних стадий катагенеза (градациях катагенеза МК₁-МК₂), являющихся главной фазой нефтеобразования [18], имеют повышенный показатель металлоемкости (ПМУВ) [43]. Полное сходство спектров битумоидов разных толщ между собой, говорит о едином бассейне осадконакопления с однотипным источником углерода в них.

Присутствие в составе битумоида, выделенного из метапелитов этих месторождений, ассоциации элементов N+S+O (~27%) указывает на значительное количество в составе битумоидов тяжелых неуглеводородных фракций [13, 59]. Анализ распределения металлов по фракциям битумоидов: асфальтогеновые кислоты (АК),

асфальтены (АСФ), спиртобензольные смолы (СБС), бензольные смолы (БС) и углеводороды (УВ), выделенных из черных сланцев всего Бодайбинского разреза и, в частности, из рудных зон изучаемых месторождений, показывает, что концентрации металлов варьируют в очень широких пределах. Весьма устойчива одна и та же закономерность – самые высокие их содержания связаны с фракциями АК и АСФ, заметно более низкие значения приурочены к фракции смол (БС и СБС), а самые низкие содержания отмечаются во фракции УВ, в соответствии с рисунком 2.3. Наблюдаемая закономерность подтверждает избирательную приуроченность металлов к тяжелым (вязким) фракциям растворимой составляющей углеродистого вещества черных сланцев, которая объясняется наличием в их молекулах электродонорных атомов S, N, O. Согласно Л.М. Гиндину [17], соединения металла с серой в органическом флюиде происходит по типу ($R_1 - S - R_2$) и являются крайне эффективными и избирательными реагентами для сидеро-халькофильных элементов (Au, Ag, Cu, Pb, Ni, Co, Sb и др.). Вторым вариантом концентрирования металлов является механизм комплексообразования с кислородосодержащими функциональными группировками [12, 13, 60, 74].

Данное мнение подтверждается исследованиями I.Sugiyama [130], которая на экспериментальных данных продемонстрировала, что вязкая часть сырой нефти способна растворять благородные металлы в концентрациях, превышающих 1 г/т. Значительное количество исследователей [91, 118, 100] также подтверждают, что растворение металлов и их переноса в составе нефтей коррелирует с увеличением в ее составе тяжелых неуглеводородных фракций и присутствия атомов азота (N).

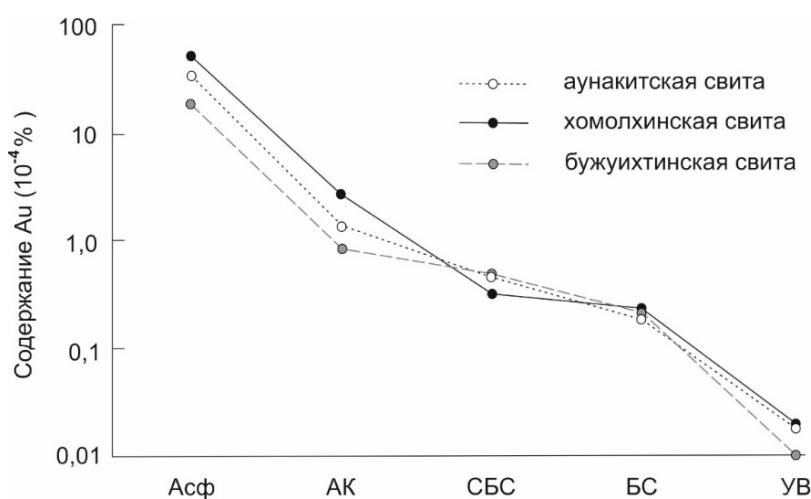
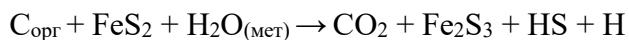


Рисунок 2.3 – Содержание золота во фракциях битумоидов отложений дальневосточного яруса стратоуровней

Необходимо отметить, что одним из основных носителей таких элементов как V, Ni, Cu, U, Ga и др. в нефтях, горючих сланцах, углях и рассеянном ОВ осадочных пород являются порфирины (производные хлорофиллов), связь которых с металлами впервые была установлена А. Трейбсом в начале прошлого века. Однако несмотря на высокие содержания Ni и Cu, в исследованных битумоидах, порфирины обнаружены не были [26], что свидетельствует о значительном преобразовании катагенного флюида при метагенезе с потерей наиболее металлоемкой его составляющей. Такой вывод позволяет предполагать, что начальные дометаморфические содержания золота и сопутствующих элементов в катагенном флюиде могли быть значительно выше.

Кроме отсутствия корреляции золота с графитизированным нерастворимым углеродистым веществом (НУВ) и увеличением золотосодержащего битумоида в зоне рудообразования, отмечается увеличение доли CO₂ во флюидных включениях из кварца с рудным содержанием золота и его значительным снижением в пострудном кварце, в соответствии с рисунком 3.4. Разница состава рудного и пострудного флюидов свидетельствует о значительном расходовании углекислоты на этапе рудоотложения. Данное утверждение подтверждается значительным увеличением содержания CO₂ в валовых пробах из рудной зоны относительно вмещающих отложений на 2% для месторождения Угахан, и до 4% для месторождений Сухой Лог, Голец Высочайший и Красный расположенных в пределах хомолхинской и аунакитской свит [10, 73, 132]. Такая закономерность объясняется протеканием рудного процесса в условиях изоляции системы от внешних источников флюида [25, 116, 131]. Увеличение содержания CO₂ в пробах с повышенным содержанием золота является следствием преобразования C_{орг} в процессе метаморфического окисления в присутствии воды и ранних сульфидов (ру-I и ру-II):



Таким образом, дальнейший процесс рудоотложения проходил с участием мобильного флюида богатого углекислотой и сероводородом в кислой среде [Вилор и др., 2021] и связан с реакцией восстановления золота из раствора на новообразованных сульфидных минералах (ру-III, ару), вплоть до формирования на их поверхности наночастиц самородного золота [14, 47]. Таким образом, можно утверждать, что увеличение содержание CO₂ в пробах из рудных тел месторождений будет тем значительнее, чем сильнее вмещающие породы были обогащены ОВ.

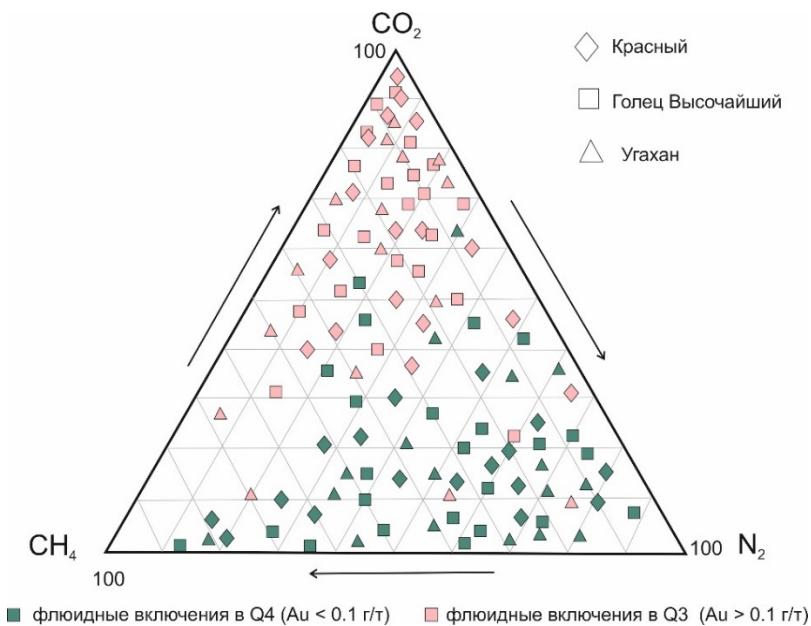


Рисунок 2.4 – Связь между составом газовой составляющей флюидных включений и содержанием золота в образцах месторождений Угахан, Голец Высочайший и Красный

Кроме углекислоты, в составе флюидных включений рудных и пострудных кварц-карбонат-сульфидных прожилков отмечено значительное количество метана и азота. Отношения $\text{CO}_2/\text{CH}_4 \leq 18$, и $\text{CO}_2/\text{N}_2 \leq 21$, указывают на формирование флюида за счет разложения первичного органического вещества сапропелевого типа с высоким содержанием углерода, азота и водорода [69].

Состав флюида, полученный для месторождений Угахан, Голец Высочайший и Красный, аналогичен составу флюида таких месторождений как Чертово Корыто, Сухой Лог и Йкан [9, 10, 37, 57, 69, 134], что не противоречит тезису об аналогичных условиях их формирования. Кроме месторождений Бодайбинского региона, известен ряд золоторудных месторождений, находящихся в черносланцевых толщах по всему миру со схожими характеристиками [109, 114, 135, 129]. Таким образом, модель формирования месторождений СГТ может в той или иной мере быть распространена на прочие месторождения орогенного типа, территориально связанные с углеродистыми осадочными и вулканогенно-осадочными отложениями.

Полученные данные говорят, как минимум о двух основных этапах формировании рудной минерализации: 1) предрудный этап: конседиментационного накопления и катагенного перераспределении вещества вмещающих пород; 2) рудных этап: окисление органического вещества катагенного флюида, деструкция его полимерлипидных

компонентов и формирование золоторудных тел «*in situ*» в результате восстановления углекислотного флюида на сульфидных агрегатах.

Таким образом, подтверждается концепция метаморфогенно-метасоматического формирования месторождений СГТ, предложенная В.А. Буряком [11] и развитая в более поздних работах [43, 47, 116, 132], согласно которой $C_{\text{орг}}$ на предрудном (подготовительном) этапе играло заметную роль, в процессе миграции и мобилизации золота.

Ввиду вышесказанного, можно оценить вероятный масштаб оруденения в конкретных стратиграфических подразделениях.

Ресурсный потенциал углеродсодержащих отложений. Как было сказано выше, концентрация в породе органического вещества, количество выделенного из углеродистого концентрата битумоида, а также содержание золота в битумоиде бужуихтинской, хомолхинской и аунакитской свит, значительно выше относительно стратиграфически нижележащих отложений хайвергинской, бугарихтинской и мариинской свит. Несмотря на высокие значения перечисленных параметров бужуихтинской свиты, вмещающей незначительное по запасам месторождение Угахан (~50 т.), они тем не менее не достигают значений, описанных для отложений хомолхинской и аунакитской свит, вмещающих крупные месторождения Голец Высочайший, Красный (~100 т.) и гигантское месторождение Сухой Лог (~2000 т.). Согласно предложенной модели формирования месторождений СГТ [43], можно оценить ресурсный потенциал трех вышеописанных свит для формирования золоторудных месторождений.

Для этого принимаем, что основная функция органического вещества в формировании месторождений золота заключается в: 1) мобилизации золота из вмещающих отложений, 2) миграции золота с катагенным флюидом в область наименьших температур и давлений (нефтяные ловушки), 3) деструкция ОВ с высвобождением золота на стадии метаморфизма.

Таким образом, дорудный (рудоподготовительный) процесс напрямую связан с диагенетическим и катагенным этапом развития бассейна, в результате которого рассеянное в породе органическое вещество переходит в подвижное состояние. Для численной оценки генерации и эмиграции нефти в данной статье мы воспользуемся моделью перераспределения катагенного флюида, предложенной С.Г. Неручевым и С.В. Смирновым для нефтяного месторождения Варьеганско [44]. Выбор данной модели продиктован тем, что авторы дали количественную оценку формирования нефтяного

месторождения при реализации катагенного процесса в породах сапропелевого типа, с оценкой главной фазы нефтеобразования ($MK_1 - MK_2$), что соответствует изученному нами битумоиду, а также верификацией предложенной модели в виде сопоставления полученных расчетных данных с реальным объектом.

Как известно, главным фактором, определяющим латеральную миграцию, является «Архимедова сила» вслывания первичных скоплений УВ в водонасыщенной поровой среде коллекторов вверх по восстанию слоев от наиболее погруженных участков нефесборной площади до максимально приподнятых в пределах замкнутой ловушки.

Важным фактором катагенного перемещения флюида является нефтенасыщенность в каналах миграции. Авторами [44] вводится понятие остаточная «мертвая» нефть необходимая для смачивания трещинно-капиллярного пространства. Для достижения порога, при котором происходит миграция нефти, необходима нефтенасыщенность не менее 30% порового пространства. Согласно [44], при первичной концентрации ОВ в породах изученных отложений достигающей 3-5%, нефтенасыщенность порового пространства будет превышать 44-75%. Как было показано выше, первичное содержание $C_{\text{орг}}$ в отложениях угаханской, хомолхинской и аунакитской свит могло колебаться от 5 до 8%. Это говорит о катагенной нефтенасыщенности толщи, значительно превышающей 30%, необходимой для смачивания порового пространства («мертвая» нефть), что неминуемо приводит к возникновению свободной нефтяной фазы, способной к ее миграции в катагенных условиях. При показателях нефтенасыщенности превышающих 50%, в складчатых областях скорость миграции флюида будет превышать 10 км/млн. лет (max ~2500 км/млн лет) [44]. Учитывая, что время на реализацию нефтенакопления от начала катагенных преобразований (~555 млн лет) [119, 134] до метаморфических событий (~450 млн. лет) [39, 81, 84, 96, 119] превышает 100 млн лет, а максимальный размах нефесборного бассейна вряд ли будет превышать 500 км, то параметром зависимости от времени можно пренебречь.

Ввиду отсутствия данных о плотности нефтяных скоплений на заключительной стадии катагенного процесса в Бодайбинском районе, за основу расчетов будут приняты значения, представленные в модели формирования Варьеганского нефтяного месторождения [44]. При пересчете баланса месторождений Бодайбинского региона, плотность нефтенасыщенности Варьеганского месторождения будет использована как базовая для месторождения Красный (аунакитская свита), которое выбрано в качестве эталона ввиду его средних размеров относительно прочих месторождений, а также максимальной изученности.

В соответствии с данной моделью плотность нефтея в местах ее катагенного нагнетания достигает 2.7 млн.т/км^2 . Соответственно такая плотность первичной нефти в апикальной части антиформы будет принята при пересчете баланса для месторождения Красный и в данной работе принимаем ее как стандарт ($\rho_{st} = 2.7 \text{ млн тон/км}^2$). Таким образом, и содержание Сорг в породе аунакитской свиты также будет принято в качестве стандарта ($C_{st} = 2.3\%$). Содержание $C_{\text{орг tot}}$ в пределах месторождения Угахан в 2 раза меньше относительно среднего значения рудной зоны месторождений Сухой Лог и Красный (~1.3%; ~2.4%; ~2.3% соответственно). При этом количество выделенного битумоида из углеродистого концентрата ($C_{\text{орг tot}}$) сопоставимо (в среднем ~0,009% Угахан / ~0,012% Сухой Лог / ~0,012% Красный), в соответствии с рисунком 2.5, и, по всей видимости, зависит от наличия остаточной («мертвой») нефти в поровом пространстве и в пересчетах учитываться не будет. Поскольку показатели битумоида всех изучаемых объектов продемонстрировали полную идентичность, предполагается, что нефтеотдача из материнских пород будет одинаковая и учитываться в обсуждении также не будет.

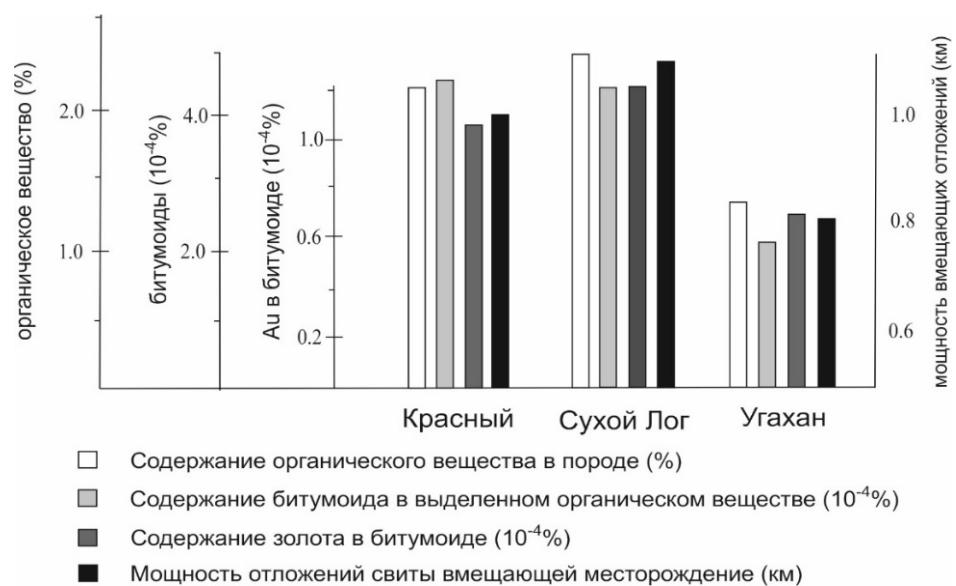


Рисунок 2.5 – Концентрации: 1) валового органического вещества и 2) битумоида в черносланцевых отложениях, вмещающих месторождения Красный, Сухой Лог и Угахан; 3) золота в битумоиде; 4) мощность вмещающих отложений

Таким образом, при пересчете баланса полезного компонента для исследуемых месторождений, плотность катагенного нагнетания палеонефти принималась как отношение количества ОВ отложений бужуихтинской (bz) и хомолхинской (hm) и аунакитской (an) свит к эталонному значению содержания $C_{\text{орг}}$ (C_{st}):

$$k_{\rho(bz)} = C_{(bz)}/C_{st} = 1.3\% / 2.3\% = 0.6; \quad (2.1)$$

$$k_{\rho(hm)} = C_{(hm)}/C_{st} = 2.4\% / 2.3\% = 1.1; \quad (2.2)$$

$$k_{\rho(an)} = C_{(an)}/C_{st} = 2.3\% / 2.3\% = 1.0 \quad (2.3)$$

где k_{ρ} – коэффициент плотности катагенного флюида; C – содержание C_{opr} в отложениях: (bz) – бужуихтинской, (hm) – хомолхинской, (an) – аунакитской свит.

2) Для оценки потенциальных ресурсов нефти на слабо изученный геологический объект, по аналогии с хорошо изученным эталонным, распространяются такие характеристики, как средняя плотность запасов. Мощность нефтегенерирующей толщи в 1 км^2 (или на 1 км^3 осадочных пород) принимается как стандарт. Ввиду чего, первым действием при оценке ресурсного потенциала изучаемых стратиграфических подразделений необходимо ввести такой параметр как коэффициент мощности нефтегенерирующей толщи.

Мощность нефтегенерирующей черносланцевой толщи бужуихтинской свиты варьирует от 700 - до 1000 м (в среднем 800 м). Это меньше, чем мощность хомолхинской (1100 м) и аунакитской (1000 м) свит:

$$k_{h(bz)} = h_{bz} / h_{st} = 800\text{м} / 1000\text{м} \approx 0.8; \quad (2.4)$$

$$k_{h(hm)} = h_{hm} / h_{st} = 1100\text{м} / 1000\text{м} \approx 1.1; \quad (2.5)$$

$$k_{h(an)} = h_{an} / h_{st} = 1000\text{м} / 1000\text{м} \approx 1.0 \quad (2.6)$$

где k_h – коэффициент мощности нефтегенерирующей толщи; h_{bz} – мощность бужуихтинской свиты; h_{hm} – мощность хомолхинской свиты; h_{an} – мощность аунакитской свиты; h_{st} – стандарт.

В итоге можно посчитать приблизительную плотность палеонефти (ρ_{oil}) на 1 км^2 :

$$\rho_{oil(bz)} = (k_{\rho} * \rho_{st}) * k_h = 0.8 * 0.6 * 2.7 \text{ млн.т. / км}^2 = 1.3 \text{ млн.т / км}^2 \quad (2.7)$$

$$\rho_{oil(hm)} = (k_{\rho} * \rho_{st}) * k_h = 1.1 * 1.1 * 2.7 \text{ млн.т. / км}^2 = 3.3 \text{ млн.т / км}^2 \quad (2.8)$$

$$\rho_{oil(an)} = (k_{\rho} * \rho_{st}) * k_h = 1.0 * 1.0 * 2.7 \text{ млн.т. / км}^2 = 2.7 \text{ млн.т / км}^2 \quad (2.9)$$

Таким образом ресурс золота на 1 км^2 будет рассчитываться по формулам:

$$C_{1(bz)} = \rho_{oil(bz)} * C_{2(bz)} = 1.3 \text{ млн.т/км}^2 * 0.98 \text{ г/т} = 1274 \text{ кг/ км}^2 \quad (2.10)$$

$$C_{1(hm)} = \rho_{oil(hm)} * C_{2(hm)} = 3.3 \text{ млн.т/км}^2 * 2.07 \text{ г/т} = 7590 \text{ кг/ км}^2 \quad (2.11)$$

$$C_{1(an)} = \rho_{oil(an)} * C_{2(an)} = 2.7 \text{ млн.т/км}^2 * 1.57 \text{ г/т} = 4482 \text{ кг/ км}^2 \quad (2.12)$$

где C_1 – содержание золота в 1 км² апикальной части антиклинали, вмещающей катагенный флюид; C_2 – среднее содержание золота в палеонефти свиты по результатам аналитических работ, в соответствии с рисунком 2.5.

Концентрация золота в первичной катагенной ловушки для отложений бужуихтинской свиты, по предварительной оценке, $\sim 1,3$ т/км², что в 6 раз меньше относительно предполагаемой концентрации золота для отложений хомолхинской и в 3.5 раза меньше относительно предполагаемой концентрации золота для отложений аунакитской свит.

С учетом того, что антиклинальные структуры 3-его порядка в Бодайбинском районе, как правило, занимают не менее 50 км² (чаще значительно больше), то на основе приведенных значений можно сделать вывод о высокой перспективности отложений бужуихтинской свиты для дальнейших поисковых работ. Тем не менее возможность обнаружения объектов, сопоставимых по запасам с месторождениями хомолхинской и аунакитской свит маловероятна.

Что касается прочих стратиграфических подразделений региона, то, по всей вероятности, начальное (конседиментационное) содержание ОВ отложений не превысило суммарных путевых потерь нефти при вертикальной и затем латеральной миграции и полностью исчерпалось при образовании остаточной нефти в пределах нефтесборной площади. Таким образом, перспективы данных отложений для формирования месторождений СГТ крайне маловероятны.

Предлагаемый алгоритм ресурсной оценки золота для разных стратиграфических подразделений имеет смысл исключительно для месторождений СГТ, так как любое отклонение от рассматриваемой модели полностью меняет механизм формирования месторождения. Необходимо отметить, что предложенный алгоритм в значительной степени упрощен ввиду недостаточности имеющейся информации. В своих расчетах мы:

- не проводим палеореконструкции рудовмещающих антиклинальных структур, вмещающих будущее месторождение для определения масштаба нефтесборного бассейна;
- не учитываем колоссальный раздев мощности отложений в апикальной части антиклинали, как это было показано в работе С.М. Жмодика [28], ввиду чего, несомненно, занижаем реальную перспективность рудовмещающих структур;
- не учитываем коэффициент прогрессивного уплотнения материнских пород при их погружении под нагрузкой вышележащих отложений, а, соответственно значительно занижаем мощность нефтегенерирующей черносланцевой толщи (показатель k_h)

- не учитываем коэффициент остаточной («мертвой») нефти, необходимой для первичного смачивания капиллярной системы, по которой происходит миграция катагенного флюида. Таким образом, чем больше масштаб нефтесбора, тем больше первично обогащенной нефти расходуется на смачивание трещинно-капиллярной системы, которая не участвует в рудном процессе на заключительном этапе;

- не восстанавливаем реально существовавший на момент катагенных трансформаций состав первичной нефти, которая, как было показано выше, могла быть в значительно большей степени обогащена золотом и сопутствующими компонентами;

- не используем при расчете баланса золотоносного флюида водный раствор, который, являясь полноправным участником катагенной миграции, согласно Д.И. Горжевского с соавторами [20], мог быть столь же значительным транспортером металла, как и нафтиды.

Таким образом, предложенный алгоритм оценки ресурсного потенциала, базирующийся на главенствующей роли органического вещества на этапе рудоподготовки, предполагает приближенные показатели, основанные на сопоставлении уже известных и оцененных объектов.

Выше приведенные данные свидетельствуют о максимальной продуктивности палеобассейна в дальнетайгинско-жуинское время. Сопряженность таких фактов, как существование задугового бассейна, увеличение концентрации в нем органического вещества и существование в отложениях этого времени стратиформных месторождений золота, приводит к выводу о их генетической связи.

1. Сорбционная емкость углеродистого вещества отложений определяется степенью их метаморфизма. Максимальное количество золота сорбируется аморфным углеродом пород, преобразования которого не превышают стадии мезокатагенеза. По мере увеличения температурного градиента метаморфических преобразований происходит его графитизация с закономерным снижением сорбционной активности. Таким образом, количество графитизированного ОВ в породе не может являться прямым признаком при поисковых работах на рудное золото.

2. Растворимая компонента (битумоид) рассеянного углеродистого вещества черносланцевых толщ наследует геохимический потенциал нефтематеринских пород и является источником и транспортером металла в процессах нефте- и рудогенеза, что предполагает их генетическую взаимосвязь. Основными концентраторами металла в битумоидах являются тяжелые неуглеводородные фракции

3. На основе начальных содержаний С_{орг} в породе и концентрации золота в растворимой фракции углеродистого вещества (битумоид) можно сделать вывод о высокой перспективности для формирования месторождений золота «Сухоложского» типа в отложениях хомолхинской и аунакитской свиты, в меньшей степени бужуихтинской свиты.

4. Начальное содержание С_{орг} отложений нижележащей балаганахской серии не превысило суммарных путевых потерь нефти при катагенной миграции и полностью исчерпалось при образовании остаточной нефти в пределах нефтесборной площади. Таким образом, поисковые перспективы в пределах данных отложений крайне маловероятны.

Продемонстрировано отсутствие значимой корреляционной связи нерастворимого углерода с золотом. Это объясняется низкой сорбционной емкостью графитизированного органического вещества относительно его первичного (до катагенного) аналога. В битумоидах углеродистых сланцев идентифицированы сложные эфиры карбоновых кислот (липиды), подтверждающие бактериально-планктоногенное происхождение первичного органического вещества осадков. Сопоставимое содержание золота в битумоидах из пород в пределах месторождений и отложений на удалении от таковых, указывает на первичную золотоносность органического флюида. Сделан вывод, что углерод играет одну из ведущих ролей в процессе мобилизации и миграции золота на стадии катагенных преобразований. Однако, мнение о том, что органическое вещество может служить барьером на пути металлоносных гидротерм, не подтверждается для Ленской золотоносной провинции. Опираясь на катагенную модель формирования нефтяных месторождений [44] была показана высокая перспективность формирования золотого оруденения в пределах дальнетайгинского-жуинского стратиграфического уровня неопротерозойского разреза Байкало-Патомского региона.

2.2 Концептуальная модель формирования уникального золоторудного месторождения Сухой Сог по результатам детального геолого-структурного анализа. В.А. Ванин, А.М. Мазукабзов, А.Е. Будяк, А.В. Чугаев // Геология и геофизика. – 2025. – Т. 66, № 7. – С. 844-859.

Сухой Лог является одним из крупных месторождений мира, запасы рудного золота оцениваются в количестве ~ 2 000 т [23]. Открытие месторождения Сухой Лог, как гигантского месторождения прожилково-вкрашенного типа связана с именем выдающегося геолога В.А. Буряка, который, несмотря на подавляющее отрицательное мнение относительно перспективности объекта, в 1961 г. смог обосновать постановку здесь геологических работ с целью выявления и оценки золотосульфидного оруденения. Несмотря на обнаружение в тот же год золотосульфидного оруденения, первые его запасы защищены только П.П. Поповым в 1977 г. В настоящее время опубликовано достаточное количество трудов, посвященных его всестороннему изучению, однако, несмотря на столь значительное внимание исследователей, остается ряд вопросов, один из которых – это структурный контроль месторождения.

Месторождение Сухой Лог классифицировано рядом исследователей как орогенное [65, 101, 102, 116] с выделением конкретного «сухоложского» подтипа [11], что предполагает расшифровку структурных особенностей месторождения и условий локализации золоторудных зон. Изначально геологами, проводившими подсчет запасов [38], структура месторождения понималась как лежачая антиклиналь с зоной смятия (структура нагнетания) в ее ядерной части при складкообразовании. Зона смятия является синекладчатой и вмещает золотое оруденение.

В результате нами полученных данных на территории месторождения Сухой Лог из плоскостных текстурных элементов установлены плоскости слоистости S0, кливажа ОП (S1) и пострудные кварцевые жилы. Геолого-структурными наблюдениями установлено, что прожилково-вкрашенная золото-кварц-сульфидная минерализация приурочена в основном к слоистости. Послойная золотоносная кварц-пиритовая минерализация месторождения Сухой Лог имеет длительный этап формирования и эволюцию состава. Она получила свое начало формирования с этапа седиментогенеза и последующего диагенеза высокоуглеродистых отложений хомолхинской свиты с возрастом 610–600 млн лет [8, 43, 73, 124]. Данный этап развития бассейна связан с аккреционно-коллизионными событиями Байкало-Муйского композитного террейна (БМКТ) и Сибирского кратона [48, 54, 62-64]. В результате этих событий возник форландовый бассейн, в котором происходило накопление отложений, в том числе и

рудовмещающей хомолхинской свиты. Развитие форландового бассейна имело место до самого раннего кембрия. Затем в начале кембрия южная часть Сибирского кратона, включая БПП, а также БМКТ, были совместно перекрыты карбонатными отложениями, которые на платформе рассматриваются, как отложения осадочного чехла, а в пределах прилегающих областей складчатого пояса – как отложения шельфа.

Развитие основной складчатости БПП совпало с метаморфическим событием (450 млн лет). В этот же временной отрезок происходил этап непосредственного рудообразования (450–420 млн лет назад) [39, 84, 96]. Генетическая связь рудного процесса, метаморфизма и, соответственно, складчатости, обсуждалась многократно и на сегодняшний день считается абсолютно доказанной [47, 81, 116, 131]. Согласно [29], данный этап метаморфических преобразований связан с каледонскими событиями, которые были проявлены в самой южной части БМКТ, где были присоединены венд-кембрийские образования Баргузино-Витимского супертеррейна, являющиеся частью раннепалеозойского Прибайкальского коллизионного метаморфического пояса [63].

Коллизионные события, проявленные в южной части БМКТ, привели к тому что БМКТ выступал индентером, деформирующим породы БПП в своеобразную структуру, напоминающую структуру выжимания. На юге, в зоне примыкания к БМКТ, складки имеют южную вергентность осевых поверхностей. Далее на север на территории Кропоткинского антиклиниория ОП складок приобретают вертикальное залегание. В районе Кадаликанской антиклинали ОП складок вновь приобретают южную вергентность. При приближении к Тонодскому выступу Сибирского кратона ОП складок приобретают северную вергентность. Далее на север за пределами Тонодского выступа венд-раннепалеозойские осадочные толщи деформированы в малоамплитудную пологую симметричную складчатость. Важно отметить, что породы БМКТ и Баргузино-Витимского супертеррейна также испытали деформации при каледонских событиях.

В результате складкообразования отложений форландового бассейна произошло формирование основных рудоконтролирующих структур, в том числе и Сухоложской антиклинали. По своим генетическим особенностям Сухоложская антиклиналь сочетает в себе признаки структур продольного изгиба со скольжением и структур ламинарного течения, которые реализовались в слоистых породах с разными реологическими свойствами. Естественно, при динамическом воздействии процессы преобразования поразному протекали в породах различного литологического состава и в разных областях формирующихся структур. На стадии изгиба происходили межслоевые проскальзывания с формированием межслоевых складок волочения на крыльях Сухоложской антиклинали и

осложняющих складок в ее замке. Также формировались межслоевые полости приоткрывания в призамковых частях складок и линейность на крыльях по траектории перемещения слоев, перпендикулярно шарниру антиклинали.

На стадии складкообразования (поздний ордовик–ранний силур) Сухоложская антиклиналь приобрела изоклинальную форму, где висячее и лежачее крылья в ее сильно сжатой части тесно сближены. На этой стадии был сформирован кливаж ОП. На крыльях антиклинали слоистость имеет субпараллельное направление с кливажом ОП S1. Угол между этими плоскостными текстурными элементами составляет в среднем 10°. На крыльях антиклинали также видно послойное распределение рудной минерализации и то, как под острым углом к рудной минерализации подходит кливаж ОП S1. Ввиду того, что крылья антиклинали тесно сближены, то послойная золоторудная минерализация, распределенная в замке, висячем и лежачем крыльях, образует сплошную рудную зону типа штокверка, падающего на север под углом 25° и простираем вдоль оси антиклинали.

Как было указано выше, вмещающие золотое оруденение отложения верхней подсвиты хомолхинской свиты имеют глинистый состав и обогащены углеродистым веществом (Сорг от 1 до 5 %). Такой состав горных пород снижает их устойчивость к деформациям и придает породам большую пластичность. Карбонатная имняхская свита по составу является более компетентной относительно углеродистых алевролитов хомолхинской свиты. В процессе формирования Сухоложской антиклинали при сдавливании карбонатными породами имняхской свиты глинистые породы хомолхинской свиты в ядре антиклинали деформируются, образуя дисгармоничную складчатость.

В работе [116] демонстрируются тонкие прожилки кварц-пиритовой минерализации по плоскостям кливажа ОП, причем плоскости кливажа, заполненные кварц-пиритовыми прожилками, имеют явные признаки смещения. Судя по данным, представленным в литературе и геологическим наблюдениям, распространение рудных прожилков по кливажу ОП не получило масштабного проявления и на месторождении встречается в редких случаях. Послойные и покливажные прожилки имеют схожий состав, но последние имеют гораздо меньшую мощность.

Подобная ситуация характерна для металлоносных углеродисто-кремнистых сланцах дабанжалгинской свиты Окинского района [28], где демонстрируется наличие редких маломощных прожилков по плоскостям кливажа ОП, обогащенных рудным веществом при дислокации слоистых пород в складки продольного изгиба со скольжением вдоль слоев. Время формирования кливажа ОП по [28] отведено к

завершающей стадии складкообразования. При этом покливажные прожилки значительно обогащены рудным веществом относительно концентраций, находящихся в самом слое замковой части складки. По всей вероятности, образование рудных прожилков по плоскостям кливажа ОП происходило после формирования самого кливажа ОП на стадии продолжающихся деформационных процессов в условиях смены пластических деформаций на хрупкие.

Известно, что кливаж ОП формируется ортогонально направлению сжимающих тектонических сил, которые привели к образованию складок продольного изгиба с элементами чистого сдвига [3]. По плоскостям кливажа на момент его формирования смещения отсутствуют [72]. Предполагается, что создание рудных прожилков по плоскостям кливажа ОП должно сопровождаться движением флюидов в процессе подвижек по уже сформированным поверхностям кливажа ОП. Из данных, приведенных в работах [84, 116], видно, что покливажные прожилки сосредоточены там, где произошли подвижки по плоскостям кливажа ОП. Смещения по любым поверхностям текстур обычно происходят в условиях хрупкопластических деформаций при положении плоскостей кливажа ОП к осям сжатия от 45° и до существующих 30° . Вероятно, на заключительной стадии деформационного этапа (поздний ордовик–ранний силур) был запущен процесс трансформации кливажа ОП в сланцеватость S1. В таблице показана эволюция формирования месторождения Сухой Лог.

Золоторудная зона по своим физико-механическим параметрам соответствует зоне дизъюнктивного сжатия или дизъюнктивного шва, которая была описана в работе [19]. Данные дизъюнктивные швы образуются в осевых поверхностях складок. По наличию установленных на месторождении структурных, текстурных и линейных элементов можно говорить, что окончательное формирование Сухоложской антиклинали 3-го порядка происходило на стадии общего сплющивания с возникновением складок ламинарного течения. Послойное распределение золоторудной минерализации обусловило то, что рудные зоны не выходят на поверхность и приурочены к крыльям и замку антиклинали. В случае, если бы оруденение было приурочено к кливажным зонам ОП либо к зоне разлома, то рудные зоны обнажались бы надnevной поверхности, пересекая слоистость в замке антиклинали.

Анализ приведенных выше геолого-структурных признаков, характерных для месторождения Сухой Лог, позволяет выделить в становлении рудоконтролирующей структуры два парагенезиса: 1) продольный изгиб с течением и 2) общее сплющивание с элементами ламинарного течения. Структурные элементы ламинарного течения

свойственны в основном для осевой части складки (хомолхинская свита), а продольного изгиба – для внешнего обрамления (имняхская свита). В результате наложения деформации возникла гибридная складка с признаками сходства структур различного генезиса. Осевая часть складки по структурному парагенезису близка к динамометаморфическому [49]. Однако зафиксированный структурный парагенезис возник при деформации в осевой части складки, поскольку в ней сосредоточены выходы верхов хомолхинской свиты, обогащенной пластичным пелитоидным материалом.

В процессе деформации общего сплющивания проявились деформация удлинения– укорочения, в результате которой возникли сланцеватые текстуры, подобные текстурам в вязких разломах. Данная особенность приводит к противоречивым выводам, связанным со сложностью расшифровки структуры месторождения.

РАЗДЕЛ 3 ПРИКЛАДНОЕ НАПРАВЛЕНИЕ

Геоинформационное обеспечение при проведении полевых геохимических работ с использованием авторских автоматизированных алгоритмов и ПО. Блинов А.В., Просекин С.Н., Баранова С.А. (направлена в журнал «Геоинформатика»)

В современной геологоразведке эффективность полевых работ напрямую зависит от качества и скорости сбора, обработки и анализа данных. Особое значение это приобретает при проведении площадных поисковых геолого-геохимических работ, где объем собираемой информации обширен, а данные формируются не одним исполнителем, а группой специалистов геологов и геохимиков, действующих одновременно. При этом отсутствие единой цифровой среды затрудняет оперативный мониторинг хода работ и усложняет своевременное выявление ошибок в реальном времени. Такая ситуация усугубляется тем, что за весь информационный поток, начиная от планирования маршрутов и заканчивая камеральной обработкой, как правило, отвечает один специалист, который в ежедневном режиме управляет данными, поступающими от множества исполнителей, что превращает процесс в крайне ресурсоемкий и уязвимый к ошибкам при заполнении документации, оцифровке бумажных дневников, дублированию проб, некорректной привязке координат, фотоматериалов и т.п.

Традиционная методология полевых геохимических работ предполагает многоэтапный, в значительной степени, ручной цикл обработки пространственной информации. В данной статье основное внимание удалено описанию разработанной системы геоинформационного сопровождения полевых геохимических работ ввиду значительно большего объема структурируемой информации по сравнению с чисто геологическими маршрутами. Разработанная система призвана преодолеть недостатки традиционной методологии за счет глубокой автоматизации и использования свободного ПО, что превращает набор ручных операций в целостный цифровой рабочий процесс. Представленные решения могут быть адаптированы и для комплекса геолого-геохимических исследований.

Анализ существующей практики проведения площадных геолого-геохимических работ выявил ряд системных проблем, связанных с использованием разрозненных, не связанных между собой инструментов и программ для сбора информации в поле. Например, использование туристических GPS-навигаторов для фиксации координат точек и записи треков сопряжено с рядом ограничений: во-первых, большинство популярных моделей навигаторов имеют жесткое ограничение на количество хранимых маршрутных

точек — от 2000 до 10000, что делает невозможным загрузку всех точек на большой площади работ; во-вторых, при возможном изменении плана маршрута, процедуру экспорта запланированных точек необходимо повторять заново, что отнимает значительное время. Загрузка всех плановых точек, а не только маршрутных, повышает риск ошибочного отбора проб, особенно при участии недостаточно опытных исполнителей (студенты, временные низкоквалифицированные рабочие).

В процессе геохимического опробования исполнитель вынужден одновременно выполнять несколько разнородных операций: отбор пробы, фиксацию координат и высотных отметок в навигаторе, заполнение бумажного дневника и фотографирование. Соответственно ручной ввод номера пробы в навигаторе, в геохимическом дневнике, на фотографии регулярно сопровождается опечатками, дублированием номеров проб, несоответствиями между разными типами данных. В последствии формируется массив разнородных материалов (GPX-файлы, бумажные дневники, фотографии), собранный множеством исполнителей по проекту. Этот массив необходимо вручную импортировать в базу данных и ГИС-проект, оцифровать и сопоставить между разными типами данных. Этот процесс крайне ресурсоемок и чреват ошибками, обнаруживаемыми часто на поздних стадиях, когда их исправление требует значительно больших усилий и времена затрат.

На мировом рынке для ГИС сопровождения и введения полевой геологической документации представлено множество программных продуктов, как коммерческих, так и свободно распространяемых. К наиболее близко подходящим по требованиям к геолого-геохимической съемке можно отнести коммерческий продукт Field Maps от компании ESRI, который может вести полевые записи с помощью смартфона или планшета. Основным ограничением его использования является закрытая архитектура, которая сильно сужает возможности кастомизации ввода данных, автоматизации процессов ввода и их контроля. Также ограничивающим фактором использования является дороговизна лицензий и сложностью закупки в настоящее время.

Среди отечественных разработок самым подходящим примером является программный комплекс «Sherpa», разработанный во Всероссийском научно-исследовательском институте им. А.П. Карпинского. Комплекс предназначен для полевой геологической съемки и опробования и включает инструменты как для камеральной подготовки, так и для сбора данных непосредственно в поле. Однако его архитектура и функциональность в большей степени ориентированы на задачи государственной геологической съемки масштаба 1:200 000 (ГДП-200), где действуют строгие требования

ГОСТ и регламентированные методики ведения работ. В условиях поисковых геолого-геохимических работ на локальных участках такие стандарты являются избыточными: объёмы и плотность опробования существенно ниже, а требования к оформлению данных значительно упрощены. В результате большинство функций «Shergra» в контексте поисковых работ не востребованы, а отсутствие возможности гибкой настройки шаблонов ввода данных, автоматизированного заполнения полей и встроенных механизмов контроля качества информации делает комплекс недостаточно унифицированным для геолого-геохимических работ.

Таким образом, анализ существующих решений показал отсутствие на рынке гибкой, специализированной и экономически доступной системы, способной решать задачи ГИС сопровождения полевых геолого-геохимических работ. Это определило необходимость разработки собственного решения на связке программных средств QGIS/QField, которое сочетало бы бесплатность и открытость с глубокой кастомизацией под нужды геохимических работ.

Для решения указанных проблем была разработана комплексная система геоинформационного обеспечения, основанная на использовании связки настольного QGIS и его мобильного приложения QField. Все строится вокруг единого, заранее настроенного шаблона ГИС-проекта, в соответствии с рисунком 3.1, в который встроены необходимые алгоритмы и автоматизированные операции, позволяющие повысить эффективность полевых работ и уменьшающие возможные ошибки во время сбора данных как в реальном времени, так и на стадии камеральной обработки.

Разработанный шаблон ГИС-проекта может быть применен на любых площадных геолого-геохимических работах и структурирован по группам слоев, в соответствии с рисунком 1, несущих в себе определенные функции и настройки. Группа «Фактический материал» располагает в себе весь фактический материал, поступающий во время проведения геолого-геохимических маршрутов. В группе «Плановые точки исполнителям» расположены необходимые слои для планирования геолого-геохимических маршрутов. В группе «Плановые точки и разрешенные отступы» расположены слои с плановыми точками опробования и их буферной зоной, которая служит для определения разрешенных отступов исполнителей во время отбора от плановой точки в соответствии с техническим заданием. И последняя группа «Вспомогательные векторные и растровые слои» располагает в себе весь вспомогательный картографический материал в растровом и векторном виде, к которым можно отнести топооснову с гидросетью, спутниковые снимки, геологические карты и т.п.

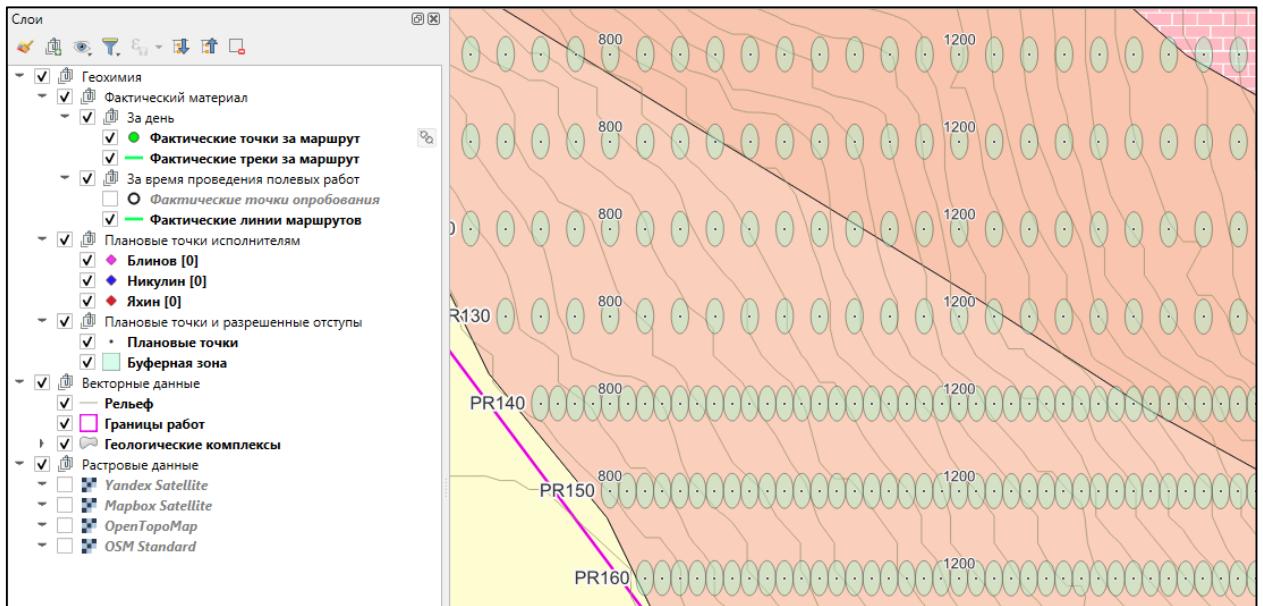


Рисунок 3.1 – Пример структурированного полевого ГИС-проекта для геохимических работ на базе QGIS

Предполагается, что у исполнителя на момент начала подготовки ГИС-проекта должен быть готовый слой плановых точек геохимического опробования и вспомогательные слои, которые необходимы во время проведения работ. Эти слои загружаются в проект и настраиваются в произвольном стиле. Таким образом на основе слоев «Плановые точки» при помощи авторского модуля для QGIS «GIS Project Updater» в автоматизированном режиме создаются и настраиваются все последующие слои.

Функционал модуля включает в себя создание новых слоев с необходимыми настройками и правилами «Фактические точки» и «Буферная зона», основанные на слое с плановыми точками опробования и техническом задании, выполнение планирования маршрутов путем создания индивидуальных слоев для рядовых исполнителей и их наполнения плановыми точками, проведение экспорта ГИС-проекта с запланированными маршрутами в защищенные смартфоны для проведения опробования.

Ключевым элементом представляемой системы является группа слоев «За день», в соответствии с рисунком 3.1. В ней расположены два слоя: 1. «Фактические треки маршрута» – линейный слой, в который записывается трек исполнителя во время маршрута; 2. «Фактические точки маршрута» – точечный слой, выполняющий функцию электронного геохимического дневника и настроенный таким образом, чтобы с самого начала полевых геохимических работ обеспечить правильное заполнение данных

рядовыми исполнителями и производить контроль вносимой информации в реальном времени.

Поле названия пробы связано с буферной зоной, что позволяет автоматически присваивать имя пробы и соответствующей ей фотографии согласно профилю и пикету. Это позволяет исключить дублирование номеров проб непосредственно в маршруте. Поля с координатами, широтой, долготой и высотой настроены на автоматическое заполнение с GPS-сигнала смартфона и недоступны для редактирования исполнителем, что исключает возможность намеренной или случайной подмены координат. Характеристики пробы, ландшафта и геологической обстановки реализованы в виде выпадающих списков с числовыми кодами, что ускоряет заполнение и стандартизирует данные, а также позволяет автоматически строить тематические карты непосредственно в полевых условиях.

Планирование маршрутов на день осуществляется централизованно в QGIS в модуле «GIS Project Updater», в соответствии с рисунком 3.2. Первоначально производится создание индивидуальных слоев и стилей к ним на каждого исполнителя. Эти слои используются только во время полевых работ для структурированного планирования геохимических маршрутов каждого исполнителя. После добавления необходимого количества исполнителей производится непосредственно планирование маршрута, который заключается в выделении необходимого количества точек каждому исполнителю в отдельности. Такой подход к планированию позволяет наглядно контролировать распределение нагрузки и оперативно вносить изменения при необходимости, а также делает этот процесс значительно удобнее за счет работы в одном ПО без необходимости перехода в другие.

Экспорт настольной версии ГИС-проекта с подготовленными слоями для исполнителей производится в модуле «GIS Project Updater» двумя способами: в первый раз создается мобильная версия проекта, а перед последующими маршрутами перекомпилируется созданный проект, обновляя только те слои, которые были изменены.

Исполнитель использует защищённый смартфон с установленным приложением QField и мобильной версией ГИС-проекта, в который предварительно загружен ГИС проект с планом на день. При достижении места отбора пробы, находящегося в пределах разрешённого отступа от плановой точки, исполнитель создаёт новую точку в слое «Фактические точки» и система автоматически присваивает пробе уникальное имя соответствующего профиля и пикета. Ввести номер пробы повторно или с неправильной «маской» программа не позволит, о чём незамедлительно сообщит исполнителю. Таким образом ошибки выявляются и исправляются прямо в маршруте. Атрибутивная

информация (характеристики пробы, ландшафта, геологические признаки) заполняется через интерфейс, в соответствии с рисунком 3.3, где большинство полей представлены в виде выпадающих списков с числовыми кодами. Поля с координатами и высотой заполняются автоматически с GPS-сигнала смартфона и недоступны для редактирования. Дата и время отбора также фиксируется автоматически при создании точки, что позволяет контролировать рабочий процесс и дисциплину исполнителей. Фото пробы и места отбора сохраняется в заранее определённый каталог под именем, соответствующим номеру пробы. Это обеспечивает однозначную привязку фотографии к конкретной пробе.

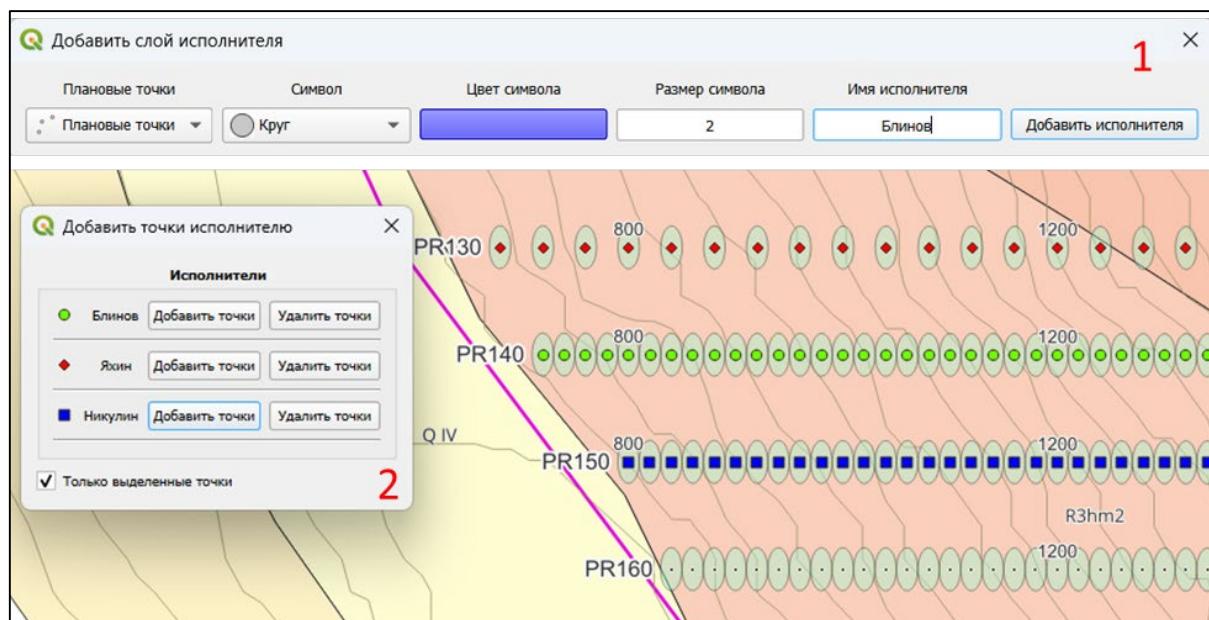


Рисунок 3.2 – Планирование геохимических маршрутов

Функция сохранения последних введённых значений позволяет исполнителю корректировать только изменившиеся параметры, что значительно ускоряет процесс при движении по однотипной местности. Группа слоев «За все время выполнения полевых работ» автоматизировано создается и формируется на основе слоев из группы «За день» после первого маршрутного дня и наполняется объединенными данными всех исполнителей, формируя общую базу данных геохимического опробования.

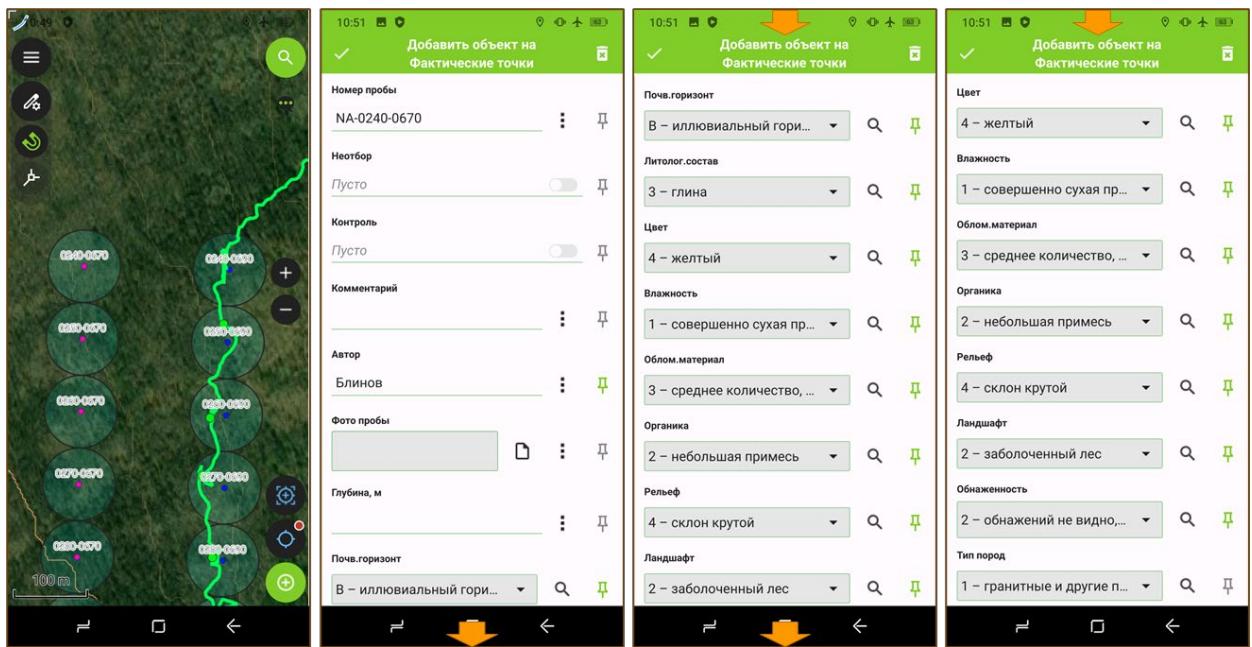


Рисунок 3.3 – Вид мобильного ГИС-проекта и окно заполнения новой фактической точки на экране защищенного смартфона

Таким образом, в ходе маршрута формируется полный комплекс цифровых данных: векторные треки передвижения, пространственно привязанные фактические точки с полным набором атрибутивной информации, фотографии и метаданные. Все эти материалы сохраняются в единой структуре и готовы к импорту в центральный ГИС-проект после возвращения из маршрута, что исключает необходимость ручной оцифровки и минимизирует риски потерь и ошибок.

На основе опыта внедрения в реальных полевых условиях — в процессе выполнения геолого-геохимических исследований на территории Байкальской горной области и Забайкалья — можно констатировать, что использование описанной методики и разработанных программных решений позволило достичь значительного прогресса в цифровизации полевого этапа работ, что сократило время камеральной обработки на 60–70%, повысило качество и достоверность первичных данных. Полное исключение ошибок, связанных с оцифровкой бумажных дневников, стало прямым следствием переноса всего процесса документирования в цифровую среду. Минимизация рисков дублирования проб и искажения координат была обеспечена не простой автоматизацией, а внедрением встроенных алгоритмов валидации данных в реальном времени, такими как автоматическая генерация уникального имени пробы, привязка к буферной зоне и блокировка сохранения записей с некорректными или повторяющимися параметрами.

Важным аспектом, выявленным в ходе апробации, является обеспечение оперативного контроля за рабочей дисциплиной и добросовестностью исполнения обязанностей полевыми исполнителями. Автоматическая фиксация времени отбора проб, треков движения и недоступность для редактирования критических полей (координаты, высота) позволили перейти от субъективной оценки к объективному мониторингу эффективности маршрутов. Накопленные данные всех исполнителей, автоматически аккумулирующиеся в сводном слое «За все время», не только предотвращают повторный отбор проб, но и формируют прозрачную и проверяемую историю полевых работ.

На основании проведенных исследований и успешной полевой апробации можно сформулировать следующие основные выводы:

1. Разработана и внедрена комплексная система геоинформационного обеспечения полевых геолого-геохимических работ, основанная на связке программ QGIS/QField и авторском модуле автоматизации «GIS Project Updater». Система обеспечивает полевую геолого-геохимическую съемку от планирования маршрутов до формирования итоговой базы данных.

2. Апробация системы доказала ее практическую эффективность: время на камеральную обработку данных сокращено на 60–70%, полностью исключены ошибки оцифровки, минимизированы риски дублирования проб и искажения координат за счет встроенных алгоритмов контроля в реальном времени.

3. Ключевым преимуществом системы является ее ориентация на специфические задачи геохимического опробования, что выражается в специализированной структуре проекта, стандартизированном вводе атрибутов и автоматизированном планировании, что выгодно отличает ее от существующих аналогов.

Таким образом, разработанная система призвана превратить работу с пространственным фактическим материалом из набора ручных операций в целостный автоматизированный рабочий процесс, доступный для широкого круга геологических организаций. Сочетание свободного программного обеспечения, глубокой кастомизации и практических наработок позволяет создать эффективную, надежную и экономически целесообразную систему геоинформационного обеспечения, которая решает критическую задачу управления данными в условиях, когда один специалист должен контролировать и обрабатывать информацию, поступающую от множества полевых исполнителей.

3.2 Доизвлечение самородного золота

- Активация металлического сырья в горной промышленности и металлургии / С. В. Галачиева, В. М. Зароченцев, В. В. Кондратьев, Н. А. Штырхунова // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. – 2025. – № 2. – С. 234-240;
- Chanturia V.A., Dmitrak Y.V., Kravtsov A.A., Kondratiev V.V. et al. Digital simulation of rock grinding process in ball mill. Sci Rep (2025). <https://doi.org/10.1038/s41598-025-30289-7>.

Как было выявлено на предыдущих этапах работ, функционирование золотодобывающих предприятий является источником больших объемов техногенных отвалов, в которых содержатся значительные количества ценных компонентов, а именно трудноизвлекаемого тонкодисперсного золота. Постепенное обеднение руд и высокая экологическая нагрузка, вследствие влияния техногенных отвалов на окружающую среду, приводит к востребованности новых технологических решений по дообогащению отвальных руд [32, 46, 80].

Разработка и апробация технологий извлечения золота из накопленных отходов золотоизвлекательных фабрик (ЗИФ) из разряда убыточных переходит в весьма окупаемое мероприятие при использовании междисциплинарного подхода и новых инновационных приемов обогащения. При этом несомненна проблема труднообогащаемых форм золота в хвостах золотодобывающих предприятий. Например, в работах [2, 6, 7, 24, 30, 33, 83, 123] описаны новые оригинальные методы доизвлечения, основанные на ультразвуковых и магнито-импульсных [24], агломерационной флокуляции с последующей флотацией [7], применение новых собирателей и модификаторов при флотации техногенного сырья [6, 7, 33], биогидрометаллургические технологии [30] и др.

При этом работы по изучению форм нахождения и диффундированию золотосодержащих компонентов в отходах ЗИФ немногочисленны [40, 41, 111, 121]. В этих работах изложены факты, что золото содержится неравномерно по объему отходов и концентрируется в локальных ареалах, которые закономерно располагаются в местах слива хвостовых пульп, что подтверждает эффекты сомофлотации. Также выявлено множество фактов, что частицы золотосодержащего материала зачастую покрыты слоем вмещающих пород, что препятствует их эффективному извлечению методами гравитационного и флотационного обогащения, а также выщелачиванием.

В работе [40] приведены исследования механизмов диффундирования частиц золота, через процессы растворения и переосаждения на других несущих минералах или

восстановление тонкодисперсного золота с последующим осаждением в локальных участках отходов. Для подобных частиц золота даже введен отдельный термин - «невидимое» для процессов обогащения. Физико-химические особенности такого золота изложены в работе [111]. Тонкодисперсные частицы и устойчивые взвеси зачастую содержат высокие концентрации золота и образуют локальные участки отходов с аномально высоким содержанием (артефакты) [121]. Также выявлено, что растворенное ионоподобное золото водах хвостохранилищ, может восстанавливаться при естественных воздействиях, например ультрафиолета [97]. Доказано, что в присутствии ионов двухвалентного железа ионы золота склонны восстанавливаться с образованием оксидов железа с вкраплением наночастиц золота [71, 107]. Миграцию частиц золота и других благородных металлов в хранилищах отходов доказали авторы работ [5, 41, 121]. В работе [121] исследованы процессы миграции золота и серебра в Урском хвостохранилище.

«Невидимое» золото обычно находится во взвешенной форме и тонкодисперсном состоянии. В работе [131] обнаружен факт самоконцентрирования золота (до 155 г/т) на торфоподобных органических веществах, которые образуются в процессе самозарастания хвостохранилищ. Авторы [125] открыли и обосновали процессы миграции подвижного золота в природных водных экосистемах. Они доказали, что отдельные частицы золота становятся легкоподвижными и осаждаются на оксидах железа и/или органическом веществе, которые являются компонентами донных отложений [125], в соответствии с рисунками 3.4-3.6 [46].

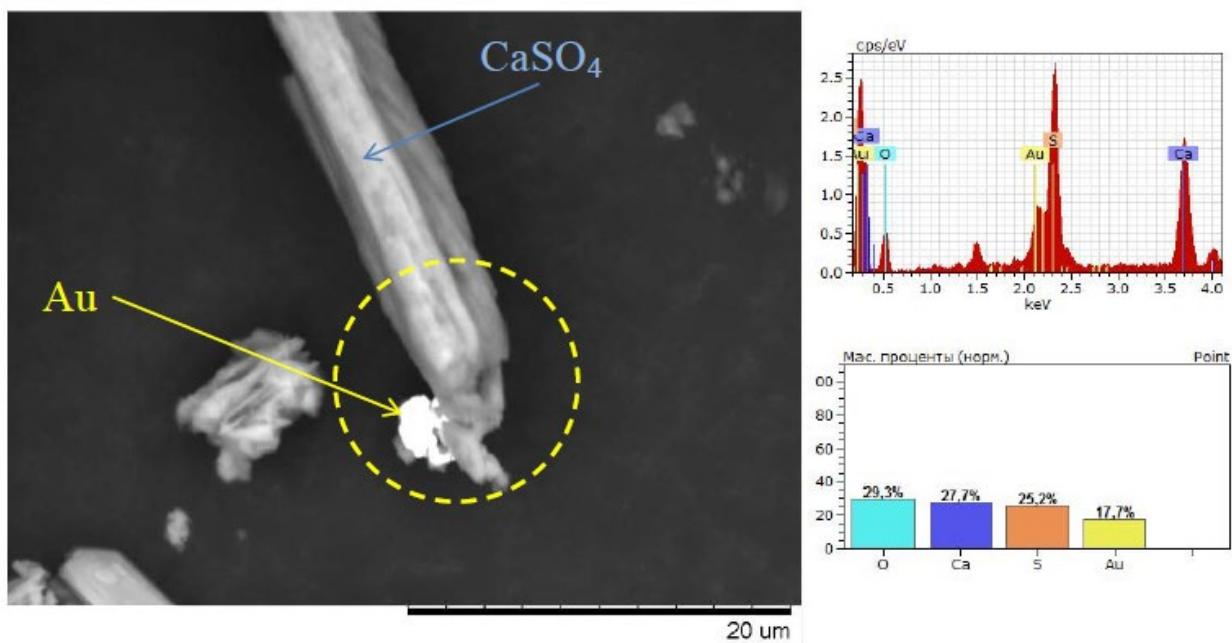


Рисунок 3.4 – Частица золота на гипсе в отходах (СЭМ-изображение)

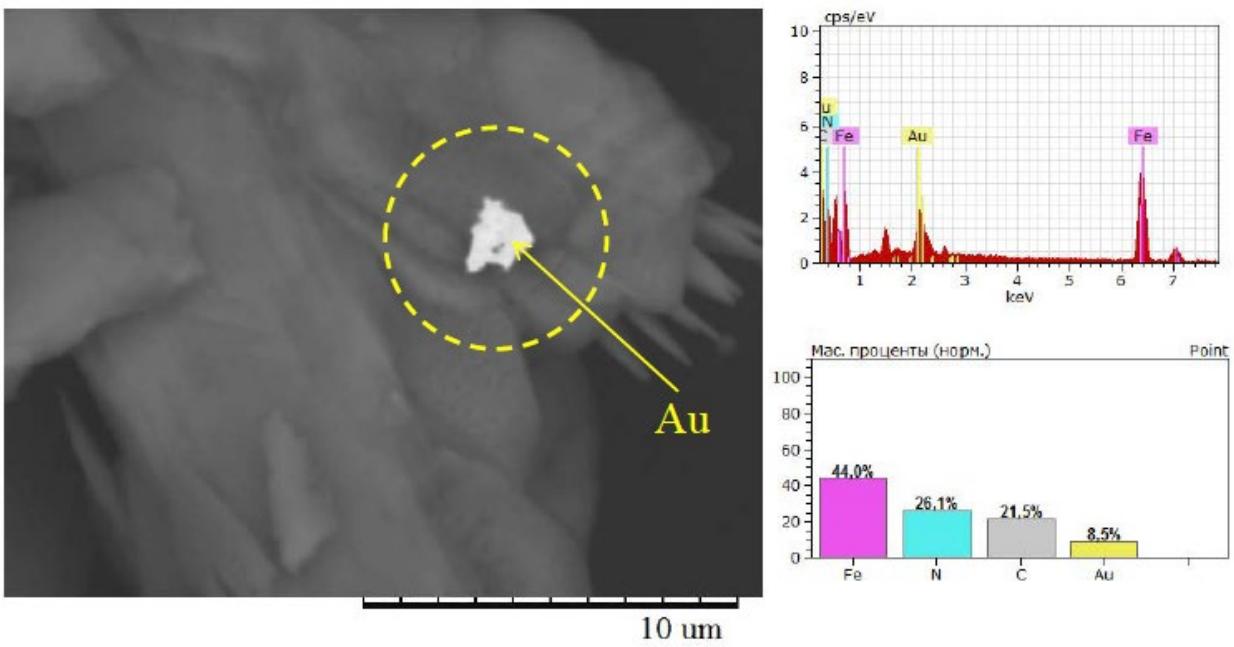


Рисунок 3.5 – Железосодержащая частица с частицей золота (СЭМ-изображение)

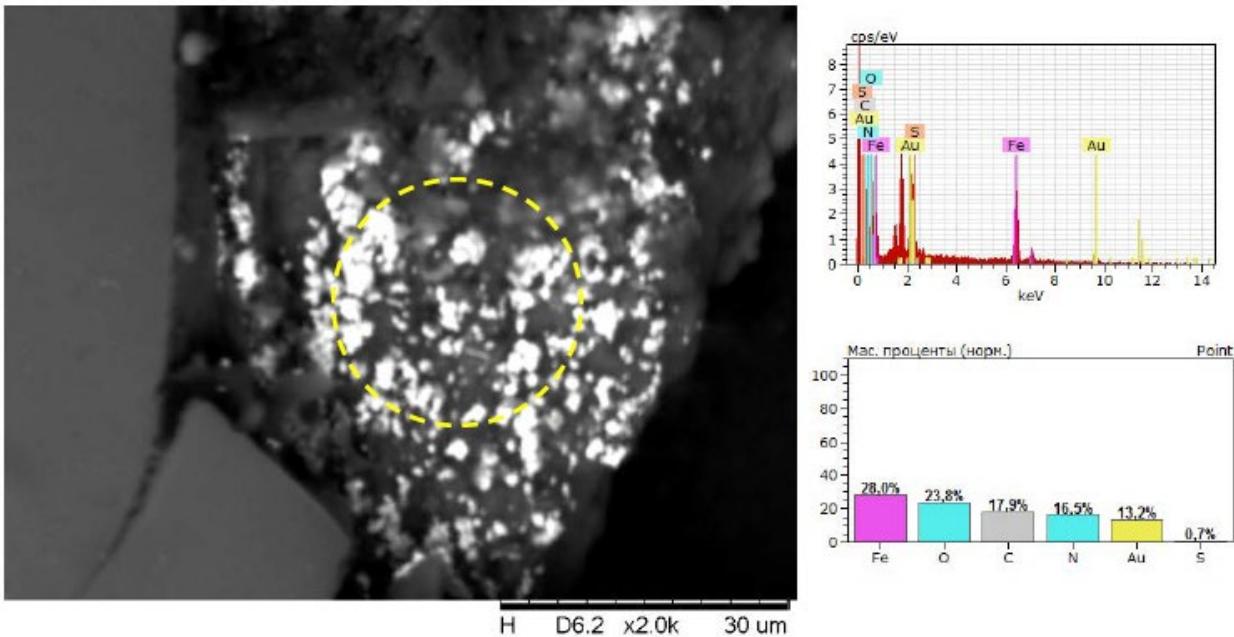


Рисунок 3.6 – Частицы золота на сложнофазной системе железосодержащих оксидов (СЭМ-изображение)

Таким образом, формы нахождения золота в отходах доказывают, что имеется техническая и аппаратурная возможность его доизвлечения из отходов при применении опыта междисциплинарных подходов к обогащению тонкодисперсных сложнофазных систем с применением инновационного оборудования [50-53, 76, 77].

В качестве объектов исследований использованы отходы ЗИФ Олимпиадинского месторождения. Олимпиадинское месторождение характеризуется рудой с максимальным

содержанием золота до 3,4 г/т (среднее – 2,2 г/т). Тип золотой фазы – окисленная или трудноизвлекаемая (тонкодисперсная с включением в матрицу несущей породы). Доказанная эффективность извлечения золота – 88%. Технология извлечения – комплексная с выщелачиванием. Основными технологическими переделами являются:

- измельчение и классификация;
- гравитационное обогащение;
- процесс флотации;
- сгущение флотоконцентрата;
- сгущение хвостов флотации;
- интенсивное цианирование гравиоконцентрата;
- сорбционное цианирование (выщелачивание) флотоконцентрата;
- процесс десорбции, электролиза и реактивации;
- обжиг и плавка катодного осадка;
- обезвреживание циансодержащих хвостов сорбции;
- сгущение и фильтрация хвостов сорбции.

Методы и приборное обеспечение

При дообогащении хвостов использовались следующие методы: физико-математическое моделирование эффективных методов дезинтеграции отвальных хвостов (на базе ИПКОН РАН) [92];

доизмельчение до крупности менее 2 мкм в лабораторных шаровых мельницах (на базе ИПКОН РАН);

- механохимическая активация (здесь и далее – ИГХ СО РАН);
- гравитационное обогащение;
- флотационное обогащение;
- фильтрация;
- сушка.

Анализ исходных и конечных продуктов производился в соответствии с методикой НСАМ «237-С «Определение золота в горных породах, рудах и продуктах их переработки экстракционно-атомно-абсорбционных методом с органическими сульфидами».

Методическое обеспечение:

Трехмерная модель барабана мельницы, шаров и породы была создана в программе Blender v.4.0. Для построения конечно-элементной сетки породы использовалась Altair Hypermesh 2023.1. В данном программном продукте трехмерная

модель куска породы была разбита на конечно-элементную сетку с заданным шагом. Далее вручную устраниены слишком мелкие элементы, так как они уменьшили бы временной шаг моделирования и увеличили бы общее время расчетов. Конечно-элементная сетка барабана и шаров не требовала ручной обработки, поэтому она была создана в программе LS Prepost v.4.10. В этой же программе были заданы физические параметры модели, такие как ускорение свободного падения, коэффициенты трения поверхностей, свойства материалов и т.д. Данная модель была использована для проведения симуляции в программе LS Dyna R14.1. Обработка результатов расчетов проводилась в программе LS Prepost, с ее же помощью были экспортированы графики массы породы и энергии шара. Для пост-обработки и визуализации результатов применялась программа ParaView 5.12.1, соответствия с рисунком 3.7.

Расчет разработанной модели производился на вычислительном комплексе с 20 ядрами центрального процессора. Расчет занял около 100 часов. Расчет разработанной модели может быть запущен на большем количестве узлов для его ускорения. Также стоит отметить использование флага GROUPABLE в определении карт контактов: он позволяет объединять несколько контактов в одно межпроцессорное сообщение, что снижает количество передаваемой информации между МРР-процессами, ускоряя расчеты.

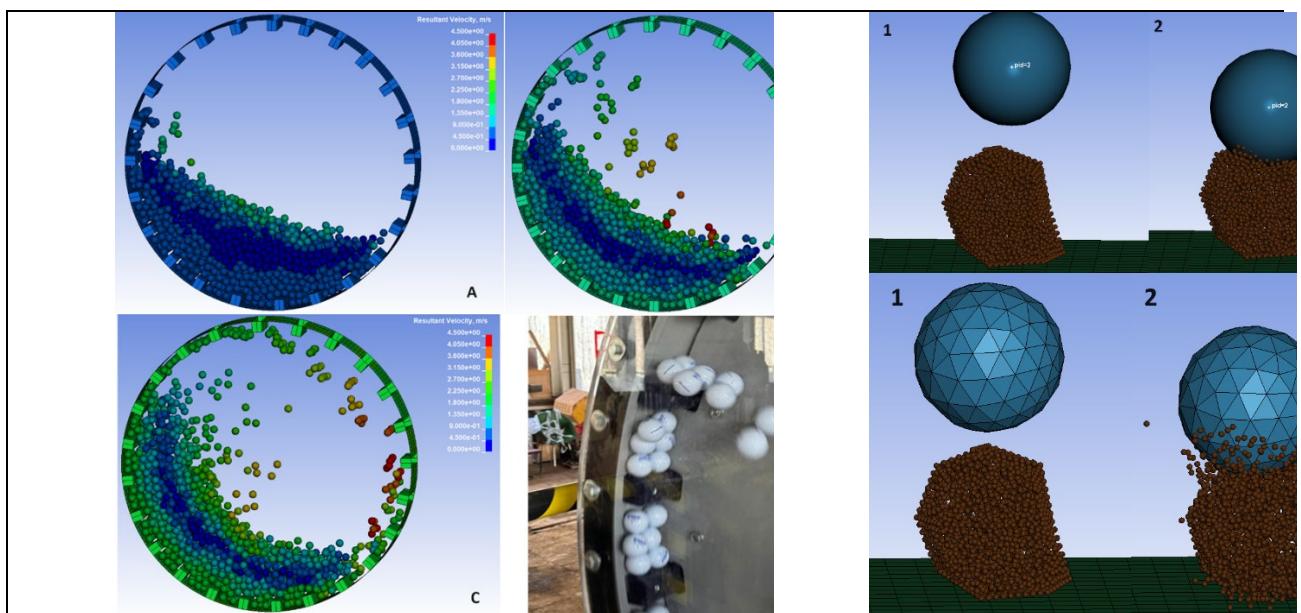


Рисунок 3.7 – Примеры построения расчетных моделей

При этом все расчеты сопровождались известными классическими постулатами. Режим работы мельницы определяется относительной частотой вращения мельницы ψ и коэффициентом заполнения ϕ , рассчитываемым по формулам (3.1) и (34.2):

$$\psi = \frac{n}{n_{kp}} \quad (3.1)$$

$$\phi = \frac{V_H}{V}, \quad (3.2)$$

где n – частота вращения мельницы, об/мин; n_{kp} – критическая частота вращения мельницы, об/мин; V – объем барабана мельницы, м^3 ; V_H – объем мелющих тел, м^3 . Критической частотой вращения является такая частота, при которой центробежная сила равна или превосходит силу тяжести, и загрузка вращается вместе с барабаном, не отрываясь от него. Критическая частота вычисляется формуле (3.3):

$$n_{kp} = \frac{30}{\pi} \sqrt{\frac{2g}{D}}, \quad (3.3)$$

где g – ускорение свободного падения, $\text{м}/\text{с}^2$, D – внутренний диаметр барабана мельницы, м. Объем барабана мельницы V вычисляется по формуле (3.4), а объем мелющих тел по формуле (3.5) [34, 35]:

$$V = \frac{\pi D^2}{4} L \quad (3.4)$$

$$V_H = \frac{G_H}{\gamma_u}, \quad (3.5)$$

где L – длина барабана, м; G_H – масса мелющих тел, кг; γ_u – насыпная плотность шаров, $\text{кг}/\text{м}^3$. Таким образом, коэффициент заполнения может быть вычислен по формуле (3.6):

$$\phi = \frac{V_H}{V} = \frac{4G}{\gamma_u \pi D^2 L} \quad (3.6)$$

Приборное обеспечение:

- участок измельчения проб (эскизная модель, в режиме патентной защиты - соответствии с рисунком 3.8);
 - механохимический активатор;
 - концентрационный стол;
 - флотомашина с пневмогидравлическим аэратором (разработана с использованием результатов ранее выполненных исследований [24-26], соответствие с рисунком 3.9);
 - устройство фильтрации под вакуумом с электрокоагуляцией;
 - сушильные шкафы;

- микроскопия (оптическая, СЭМ и микрофокус).

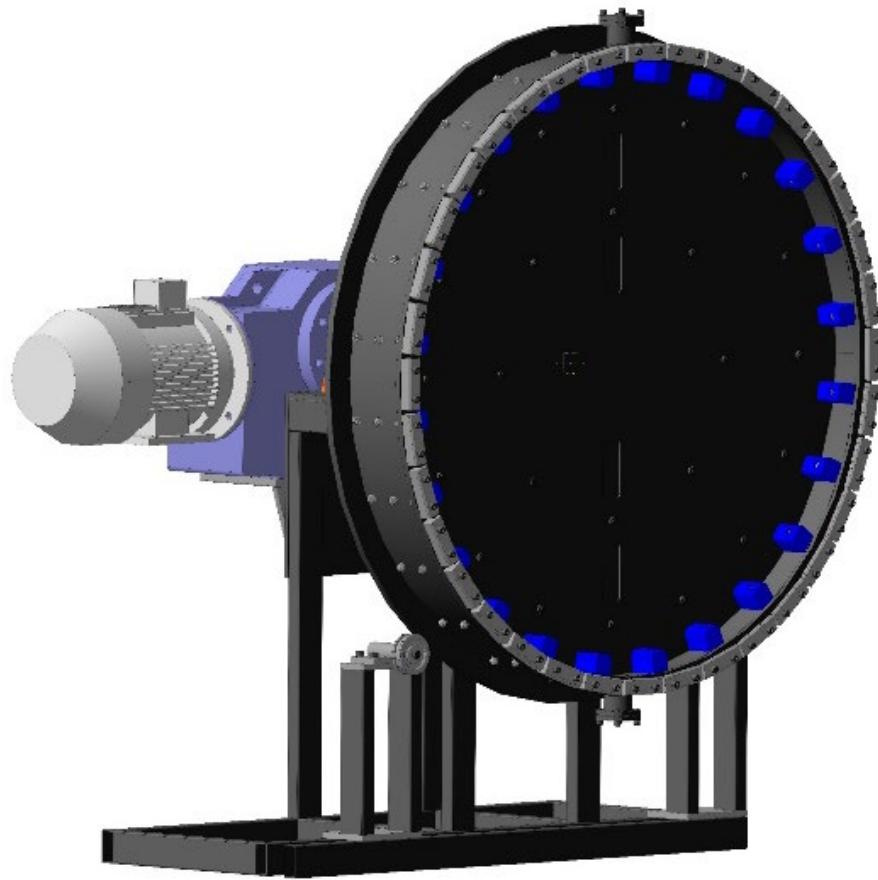


Рисунок 3.8 – Участок дезинтеграции проб в составе истирателя и планетарной мельницы



Рисунок 3.9 – Флотомашина с пневмогидравлическим аэратором

Описание приемов дообогащения хвостов и результаты

Лабораторные эксперименты проводились в соответствии со следующим алгоритмом:

- пробы массой 3 кг измельчались в шаровом истирателе до крупности менее 10 мкм;
- пробы дотирались в планетарной мельнице до крупности менее 2 мкм;
- производилась репульпация в емкости с импеллерной мешалкой при соотношении Ж:Т = 15:1;
- пульпа обрабатывалась в механохимическом активаторе (кавитаторе) в течение 10 минут для разбивки сростков;
- активированная пульпа обрабатывалась на концентрационном столе для удаления пустой породы;
- сконцентрированная пульпа в течение 10 минут подвергалась операции флотации с применением вспенивателя (МИВС), активатора (медный купорос), депрессора (Flotent FN-4), собирателя (ксантогенат) и собираителя (НБА);
- полученный слив камерного продукта фильтровался с активацией электроагуляцией;
- отфильтрованный осадок сушился и отправлялся на анализ.

Результаты лабораторных экспериментов (среднее по 3 параллелям) приведены в табл. 3.1

Таблица 3.1 – Результаты лабораторных экспериментов (в пересчете на сухое)

Проба	Исходная		После концентрационного стола		После флотации	
	Масса, г	Содержание, г/т	Масса, г	Содержание, г/т	Масса, г	Содержание, г/т
Олимпиада 1	3003	0,08	99,76	0,63	7,33	0,91
Олимпиада 2	3010	0,08	87,77	0,72	7,27	0,91
Олимпиада 3	3007	0,09	69,23	0,65	7,63	0,91

Анализ результатов показывает следующие степени обогащения хвостов (отходов) и потери целевого продукта во вторичные хвосты (отходы):

- выход концентрата = 0,24%;
- выход вторичных хвостов = 99,76%;
- выход золота в концентрат = 83,55%;
- потери золота во вторичные хвосты = 16,45%;
- масса вторичных хвостов = 2995,7 г;

- содержание золота во вторичных хвостах = 0,003 г/т.

Данные результаты свидетельствуют о возможности получения вторичных концентратов с содержанием промышленно осваиваемых концентраций золота, например, процессами выщелачивания цианированием. Результаты удалось достигнуть совокупностью методов довскрытия вмещающих минералов, механохимической активации – отрывом золотонесущих фаз от пустой породы и совокупностью гравитационного и флотационного дообогащения с применением эффективных флотореагнетов и пневмогидравлической аэрации, позволяющей выделять субмикро- и нанодисперсные фракции.

3.3 Современные возможности бортовой беспилотной техники на примере изучения геологического строения урановой палеодолины

Bashkeev A. Parshin A. Trofimov I. Bukhalov S. Prokhorov D. Grebenkin N. Modern Capabilities of Semi-Airborne UAV-TEM Technology on the Example of Studying the Geological Structure of the Uranium Paleovalley// Minerals. – 2025. – Vol. 15. – P. 630

В последнее время остро всталла проблема необходимости экстенсификации поисков новых месторождений радиоактивных полезных ископаемых, причем желательным целевым объектом теперь становятся небольшие месторождения палеодолинного типа – это связано с развитием экспрессных методов подземного выщелачивания. Подобные объекты могут быть обнаружены для целого ряда регионов Российской Федерации – от Забайкалья до Урала. Оруденение может быть приурочено к различным геологическим структурам в палеодолинах, но в любом случае требуется быстрое и экспрессное изучение их геологического строения на глубины до 400-500 метров, в таком случае становится возможным понять есть ли там перспективные участки и точно определить места заложения поисковых, а возможно затем и добычных скважин. Геологические структуры такого типа являются удобным объектом для методов электrorазведки становлением поля. Поскольку каждая долина представляет собой отдельную небольшую площадь слишком малую для рентабельной аэрогеофизической съемки, а кроме того, может быть заболочена и труднопроходима для наземных работ, встает вопрос оптимизации проведения детальных площадных электромагнитных зондирований как по срокам, так и по стоимости работ.

Наилучшим способом такой оптимизации является применение полу воздушной электrorазведки с помощью БПЛА, оптимальной для детального геофизического изучения отдельных относительно небольших участков (до 10-20 кв.км.). Легкие и недорогие БПЛА с взлетной массой в несколько десятков килограммов не способны нести мощный источник тока; поэтому все более распространенными становятся полу воздушные системы с наземным передатчиком (незаземленная петля или заземленные на концах линии) и измерительной системой, буксируемой на БПЛА. В данной статье представлены результаты для нового поколения полу воздушной технологии SibGIS UAV-TEM, относящейся к типу «линия-петля» и способной реализовать метод электромагнитных зондирований во временной области. Эффективность технологии демонстрируется на примере уранового объекта палеодолинного типа в Республике Бурятия, то есть объекта с низким сопротивлением рудной зоны, расположенной в

относительно высокомных вмещающих породах. Аэромобильная часть созданной геофизической системы была реализована на основе гексакоптера, несущего измерительную систему с индуктивным датчиком - аналогом петли 50×50 м, 18-битным АЦП со спутниковой синхронизацией и регистратором. Наземная часть состояла из гальванически заземленной линии питающей линии и источника тока, создающего многополярные импульсы квазипостоянного тока в линии. Полеты проводились с обтеканием рельефа на высоте порядка 40 метров под датчиком и скоростью около 34 км/ч. Показаны результаты сопоставления электромагнитных зондирований с эталонным (буровым) профилем, показано что получаемые геофизические разрезы имеют хорошую сходимость с ним и таким образом метод обеспечивает необходимый геологический результат, причем при очень низкой относительно наземной съёмки цене и высокой производительности. Также в статье детально рассмотрены проблемы и описан эффективный подход к предварительной обработке данных полувоздушной электроразведки с индуктивным датчиком типа «петля», направленный на повышение качества данных за счет учета движения и колебаний датчика измерительной системы. На основе полученных реальных данных была смоделирована чувствительность созданной полувоздушной системы путем решения прямой задачи в классе 3D-моделей, что позволило оценить эффективность метода в отношении других геологических случаев.

РАЗДЕЛ 4 ОРОГЕННЫЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ ЗОЛОТА: ГЕОДИНАМИКА И ТИПИЗАЦИЯ.

Данный раздел появился в нашем отчете вследствие неоднозначного понимания термина «орогенные месторождения золота» в нашей геологической среде (Горячев Н.А. «Орогенные месторождения золота: геодинамика и типизация (25 лет – некоторые итоги» Геология рудных месторождений, 2025, том 67, № 6, с.754-765).

Термин орогенные месторождения золота появился в конце 1990-х годов в «западном» геологическом сообществе [102] и уверенно завоевал “западный” рудно-геологический мир, поскольку включил в себя большинство известных крупных месторождений золота. Сейчас, согласно современным взглядам, все золоторудные месторождения подразделяются на: (1) орогенные (гипо- и мезотермальные по систематике Линдгрена), (2) связанные с интрузивами (или золото-редкометальные по российским систематикам), (3) эпимермальные, (4) IOCG – золотые железооксидно-медные, (5) золото-колчеданные, (6) золотоносные медно-порфировые, (7) палеороссыпи [101, 102].

Согласно основателям [102], орогенные месторождения золота формируются вдоль конвергентных окраин плит в течение аккреции террейнов, их перемещения и коллизии, которая связана с субдукцией плит и/или литосферным расслоением. Они возникают обычно в позднюю стадию деформационно-метаморфо-магматической истории формирующегося орогена, и руды имеют четкий структурный контроль разломами или зонами смятия, складками и/или зонами контраста компетентных пород. Большинство изучаемых нами месторождений относится к данному типу.

В настоящее время, орогенные месторождения золота правильнее рассматривать как результат орогенных событий во время формирования складчатых поясов, в тесной связи с процессами зонального метаморфизма и орогенного магматизма (преимущественно гранитоидного, корового) – под воздействием региональных флюидных потоков, структурированных зонами региональных разломов, либо участками внедрения крупных орогенных интрузивов или их серий [21, 22]. А поскольку орогенные пояса формировались в разных геодинамических обстановках, то для них возможны разные ситуации возникновения орогенного типа золоторудных месторождений, которые рассмотрены нами в специальной статье [105], материалы которой представлены в данном разделе. В целом же, эту геолого-генетическую классификацию орогенных месторождений золота следует дополнить более дробной систематикой [21, 22],

фиксирующей минералого-geoхимическое разнообразие орогенного типа золотого оруденения фанерозоя, с выделением его минералого-geoхимических разновидностей, отражающих его специфику: (1) орогенного золото-мышьяк-сульфидного ($Au-As-S-Fe-Cu-Ni-Co$) с выделением собственно золото-мышьяк-сульфидного и золото-сульфидного подтипов вкрапленных руд; (2) орогенного золото-кварцевого, с колымским ($Au-As-Sb-S-Pb-W-Fe$) и кордильерским или калифорнийским ($Au-As-S-Te-Ni-W-Cu-Fe$) подтипами жильных руд; (3) орогенного золото-висмутового ($Au-As-Bi-S-Te-Se-Sb-Ni-Co-W-Mo-Cu-Fe$) – жильный, грейзеновый, скарновый (аналог *intrusion related* типа, связанного с интрузивами гранитоидов) и (4) золото-серебро-кварцевого ($Au-Ag-Sb-S-Pb$) позднеорогенного (посторогенного) подтипа жильных руд.

Геодинамическое многообразие проявлений орогенных процессов позволяет среди золоторудных месторождений орогенного типа выделить пять геодинамических подтипов: (1) орогенные месторождения аккреционных поясов активных континентальных окраин; (2) орогенные месторождения задуговых (или тыловодужных) обстановок; (3) орогенные коллизионные месторождения; (4) орогенные месторождения трансформно-сдвиговой обстановки; (5) орогенные плюмовые месторождения. Рассмотрим на ряде примеров, какова же получается картина хронологии геологических событий и места орогенного золота в них? В основу анализа, помимо геодинамических обстановок формирования орогенных месторождений (Горячев, 2021), положены следующие категории: (1) место рассматриваемых месторождений в хронологии процессов орогенеза; (2) ассоциации разных типов золоторудных месторождений (орогенных, связанных с интрузивами, эптермальных, колчеданных) и (3) их металлогенические ассоциации с другими типами минерализации [105].

Аккреционные пояса. Примерами являются: Лакландский орогенный пояс – золоторудные поля Бендиго-Мальдона в Австралии, а также Кордильерские золоторудные районы Северной Америки, в том числе Юкон-Танана гранитно-метаморфический свод – время формирования метаморфических комплексов свода 120–110 млн лет, возраст перемещенных гранитов 105–98 млн лет с месторождениями орогенного и связанного с гранитоидами типов оруденения, которое на 1–2 млн лет моложе перемещенных гранитов. Широко известен золоторудный пояс Калифорнии с жильной системой Материнской жилы с уникальными кристаллами золотых самородков, возникших во время и под влиянием пика гранитного магматизма хребта Сьерра Невада. Для него характерно тесное сочетание орогенного золотого оруденения с процессами метаморфизма и магматизма. В целом для аккреционного геодинамического подтипа орогенных месторождений золота по

месту в хронологии орогенеза выделяется следующая последовательность процессов: осадконакопление – складчатость – метаморфизм – оруденение – граниты (Вост. Австралия, Калифорния, Клондайк, Карибу, Аляска-Джуно). Отмечается также ассоциация орогенного золотого оруденения с золотым, связанным с гранитными интрузивами (Аляска, Британская Колумбия) или с колчеданными рудами, например в пределах Калифорнии.

Примером месторождений золота **задуговых (или тыловодужных)** орогенов являются месторождения Охотско-Корякского орогенного пояса Северо-Востока Азии [22], где главное орогенное событие произошло в раннем мелу (дислокации, зональный метаморфизм, гранитоидные плутоны). Последовательность проявления эндогенных процессов можно представлять таким образом. Здесь выделен ранний позднеюрский этап проявления регионального метаморфизма, с которым связано золото-кварцевое жильное оруденение с оценкой возраста 150–135 млн лет по современным данным (продукты позднеюрско-раннемелового яно-колымского орогенеза). Следующий этап – это внедрение (122–125 млн лет назад, Ar-Ar) орогенных гранитоидов Охотско-Корякского орогена, практически синрудные относительно орогенных месторождений золота (128–117 млн лет) и они сопровождаются также Au-Bi оруденением. Этому же интервалу времени соответствует датировка дислокационного метаморфизма зон крупных разломов (Прокопьев и др., 2018) и орогенные золото-мышьяк-кварцевые (Ветренское, Школьное, Надежда, Экспедиционное – 128–117 млн лет), золото-сурьмяные (Крохалинное – около 125 млн лет). После этого произошло внедрение гранитоидов этапа становления Охотско-Чукотского вулкано-плутонического пояса и формирование сопутствующей минерализации. Соответственно, общая последовательность эндогенных процессов при формировании месторождений аккреционно-тыловодужного подтипа такова: осадконакопление → складчатость + метаморфизм → дайки-малые плутоны → сдвиги + метаморфизм → оруденение → поздний магматизм и позднее оруденение (Аллах-Юнь, Приохотье). А металлогенические ассоциации представлены типично субдукционными производными (эпiterмальное золотое, медно-молибден-порфировое, кобальт-полиметальное) и разнообразием типов собственно золотой минерализации (орогенное золотое и золото-сурьмяное оруденение, золото-висмутовое связанное с гранитоидами и даже эптермальное золото-серебряное).

Коллизионные орогены рассмотрим на примере хорошо изученных месторождений Мама-Бодайбинского плутонометаморфического пояса и ареалов орогенных золоторудных месторождений [22]. Для *Мама-Бодайбинского пояса*

установлено двухэтапное проявление метаморфизма и магматизма: 460 Ma – мамские метаморфиты и граниты [29] и 320 Ma гранитоиды Ангаро-Витимского батолита. Руды крупнейшего орогенного месторождения золота Сухой Лог сформированы [39] в два этапа (447 Ma – главный этап) и (321 Ma – жильный этап).

Трансформно-сдвиговые орогены представлены Монголо-Охотским и Сихотэ-Алиньским поясами. Спецификой проявления орогенного типа золотого оруденения здесь является его омоложение вдоль главной тектонической сутуры в направлении против направления движения противостоящего блока (левосторонняя кинематика движений по сдвигу с омоложением оруденения в противоположную сторону). Тем не менее место орогенных золотых месторождений в эволюции Монголо-Охотского пояса таково: осадконакопление → метаморфизм → коллизионный магматизм (190–220 млн лет) → трансформно-сдвиговые движения + латитовый магматизм (160) → золотое оруденение (орогенное и зачастую во многом близкое золото-висмутовое (159–150 млн лет), позднее рифтогенное эпiterмальное (150–142 млн лет)). Обычной является ассоциация – в одних и тех же или близких структурах – золотых месторождений, орогенных и связанных с гранитоидными интрузивами зачастую неразделимых, ибо минеральный состав одинаков, а также поздних эптермальных и золото-сурьмяных. Широко проявлена орогенная металлогеническая ассоциация золото (медь, молибден и полиметаллы, сурьма).

В целом с учетом Сихотэ-Алиньского пояса, выстраивается следующая общая последовательность для трансформно-сдвиговых орогенов: осадконакопление → метаморфизм → ранний аккреционно-коллизионный плутонический магматизм → сдвиги + синсдвиговый плутонический магматизм → оруденение.

Сопоставление хронологии и характеристики процессов магматизма и метаморфизма основных золоторудных поясов орогенного типа Северного обрамления Пацифики, показывает их практически полное совпадение, что свидетельствует об их генетическом единстве, связанном с процессами формирования крупных орогенных структур [21, 22].

Плюмовый подтип. Особо следует рассмотреть плюмовые обстановки, примерами которых являются Бушвельдский раннепротерозойский и Гаулерский среднепротерозойский внутрикратонные плюмовые ареалы [21, 22]. *Бушвельдский ареал* объединяет разнотипные и нестандартные для орогенных поясов месторождения, с которыми ассоциируют типичные орогенные месторождения золота района Пилгрим-Рест: Бушвельд Ni-Cu-PGE – 2060–2055 млн лет, Хаутенбек Mo-TR – 2059–2046 млн лет, Заайплаат Sn – 2055–2040 млн лет, Вергеноег IOCG – 2040 млн лет, Перинг Pb-Zn – 2057–

2039 млн лет, Пилгрим-Рест орогенное Au – 2024 млн лет с геохимической ассоциацией в рудах Au-Pb-Sb-Bi-Cu. Кратон Гаулер представлен не только месторождениями IOCG типа, но и орогенными месторождениями золота пояса Таркула с близкими датировками: Олимпик Дам IOCG – 1600–1575 млн лет, Таркула орогенное Au – 1580 млн лет с Au-Cu-Pb-Bi-Co геохимической ассоциацией. Таким образом, для плюмовой обстановки наблюдается очень сложная металлогеническая близкоодновременная ассоциация медно-никелевых руд с полиметаллическими, оловянными, редкоземельными и орогенными золотыми, но все же с преобладающей для обоих случаев медно-золото-висмутовой специализацией орогенных руд золота, сближающей их с орогенными золоторудными месторождениями трансформно-сдвиговых обстановок.

Таким образом, исходя из общей систематики орогенных поясов, можно говорить о пяти группах, различающихся по месту оруденения в хронологии орогенеза, по ассоциации месторождений золота разных типов и по их металлогеническим связям с другими рудными месторождениями.

Приведенные примеры в значительной степени касаются фанерозойских месторождений, за исключением плюмового подтипа. Если мы обратимся к древним архейским и раннепротерозойским орогенным месторождениям, то там картина получается более четкая из-за того, что отсутствует минеральная дифференциация вещества золотых руд [21, 22] и в орогенном типе объединены практически все золоторудные месторождения. Там связи орогенного золота с процессами метаморфизма и магматизма более тесные, как это показано на примере рудных объектов района Пилбара и Калгурли в Западной Австралии, провинции Абитиби в Канаде и других регионов [21].

Заключение. Таким образом, в настоящее время орогенные месторождения золота объединяют пять геодинамических подтипов, по-разному связанных с процессами орогенного метаморфизма и магматизма: (1) аккреционный; (2) аккреционно-тыловодужный; (3) коллизионный; (4) трансформно-сдвиговый и (5) плюмовый.

Они характеризуются различной минералого-геохимической и металлогенической нагрузкой, обусловленной разнообразием геодинамических обстановок формирования руд данного типа. Учет специфики этих типов необходим при геолого-генетической и прогнозно-поисковой характеристике орогенных золоторудных систем.

Принятие геологических факторов в характеристике типов золотого оруденения весьма важно для целей региональной металлогении. Но безоговорочное признание метаморфогенной гипотезы орогенного рудообразования, исключающее созидательную

роль магматизма в формировании этих руд, является отрицательным фактором, требующим пересмотра данной концепции в этой части.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В целом, нами получены новые данные по минералогии и геохимии руд месторождений Пильненское, Ключевское, Верхне-Алиинское. Показано, что процесс формирования рудной зоны месторождения Ключевское является результатом последовательно сменяющихся условий и представлен развитием наложенных друг на друга минеральных ассоциаций. По набору ассоциаций здесь фиксируется полный ряд типичный для эволюционирующей РМС. Присутствуют минеральные ассоциации относимые к пневматолитовому этапу, ассоциации характеризующие высоко-, средне- и низкотемпературный гидротермальный процесс. Особый интерес вызывает два этапа турмалинизации наложенных один на другой, предваряемый интенсивным дроблением. Теоретически, они должны быть пространственно разобщены и фиксировать разные зоны по удалению от магматического очага. Однако в этом случае этого не происходит, что дает возможность связать второй этап турмалинизации со самостоятельным магматическим очагом.

Важным является выделение двух разновидностей самородного золота. Золото из этих образований отличается различиями пробности, приуроченностью к ассоциациям, и морфологическими особенностями. Подобное распределение золота свойственно всем золото-турмалиновым объектам региона. Полученные результаты Ключевского месторождения довольно хорошо согласуются с результатами полученными для Кариевского рудного узла. Здесь также выделяется молибденовая минерализация в ассоциации с магнетитом и сидеритом, наложенная на них турмалиновая минерализация в ассоциации с пиритом, молибденитом и шеелитом, пирит-халькопирит-сульфоарсенидная минерализация, возможно золото-висмутовая минерализация.

Все эти данные могут быть использованы при выделении критериев при построении поисковой модели рудных объектов золото-турмалинового генетического типа. Схожесть в развитии рудно-магматических систем для рудных объектов расположенных на значительном удалении друг от друга говорит об унифицированности процесса рудообразования и об постоянстве источника химических элементов. Это позволяет довольно уверенно идентифицировать эти объекты и, используя особенности эволюции РМС, оценивать их важные параметры такие как объем оруденения и уровень эрозионного среза.

Для месторождения Верхне-Алиинское предложена модель рудно-магматической системы основанная на геологической ассоциации рудных тел с поздними монцонитоидными производными акатуйского комплекса среднепозднеюрского возраста

и выявлении элементов вертикальной и горизонтальной зональности в пределах месторождения и рудного поля по свойствам рудного кварца и по распределению редких минералов группы сульфосолей Рb и Вi. Результаты минералогического исследования технологических проб руд показали, что оруденение сформировалось в условиях малых глубин, переходных к близповерхностным, что свидетельствует о нестабильности P - T - X условий во время рудоотложения и быстрой эволюции состава рудообразующих флюидов при формировании рудных жил. Это, при всем общем минералого-геохимическом сходстве с другими месторождениями золота рудного района, отличает Верхне-Алиинское месторождение и обусловило отчасти технологическую упорность его руд.

Продемонстрировано отсутствие значимой корреляционной связи нерастворимого углерода с золотом. Это объясняется низкой сорбционной емкостью графитизированного органического вещества относительно его первичного (до катагенного) аналога. В битумоидах углеродистых сланцев идентифицированы сложные эфиры карбоновых кислот (липиды), подтверждающие бактериально-планктоногенное происхождение первичного органического вещества осадков. Сопоставимое содержание золота в битумоидах из пород в пределах месторождений и отложений на удалении от таковых, указывает на первичную золотоносность органического флюида. Сделан вывод, что углерод играет одну из ведущих ролей в процессе мобилизации и миграции золота на стадии катагенных преобразований. Однако, мнение о том, что органическое вещество может служить барьером на пути металлоносных гидротерм, не подтверждается для Ленской золотоносной провинции. Показана высокая перспективность формирования золотого оруденения в пределах дальнетайгинского-жуинского стратиграфического уровня неопротерозойского разреза Байкало-Патомского региона.

Разработана концептуальная модель структуры месторождения Сухой Лог. Показаны два парагенезиса структур. Сделан вывод о сложности интерпретации детальных структурных особенностей.

ГИС-технологии. Разработана и внедрена комплексная система геоинформационного обеспечения полевых геолого-геохимических работ, основанная на связке программ QGIS/QField и авторском модуле автоматизации «GIS Project Updater». Система обеспечивает полевую геолого-геохимическую съемку от планирования маршрутов до формирования итоговой базы данных.

Апробация системы доказала ее практическую эффективность: время на камеральную обработку данных сокращено на 60–70%, полностью исключены ошибки оцифровки, минимизированы риски дублирования проб и искажения координат за счет встроенных

алгоритмов контроля в реальном времени. Ключевым преимуществом системы является ее ориентация на специфические задачи геохимического опробования, что выражается в специализированной структуре проекта, стандартизированном вводе атрибутов и автоматизированном планировании, что выгодно отличает ее от существующих аналогов. Разработанная система призвана превратить работу с пространственным фактическим материалом из набора ручных операций в целостный автоматизированный рабочий процесс, доступный для широкого круга геологических организаций. Сочетание свободного программного обеспечения, глубокой кастомизации и практических наработок позволяет создать эффективную, надежную и экономически целесообразную систему геоинформационного обеспечения, которая решает критическую задачу управления данными в условиях, когда один специалист должен контролировать и обрабатывать информацию, поступающую от множества полевых исполнителей.

Обогащение. Полученные результаты свидетельствуют о возможности получения вторичных концентратов с содержанием промышленно осваиваемых концентраций золота, например, процессами выщелачивания цианированием. Результаты удалось достичнуть совокупностью методов довскрытия вмещающих минералов, механохимической активации – отрывом золотонесущих фаз от пустой породы и совокупностью гравитационного и флотационного дообогащения с применением эффективных флотореагнетов и пневмогидравлической аэрации, позволяющей выделять субмикро- и нанодисперсные фракции.

Предложено выделение 5 геодинамических подтипов орогенные месторождения золота, по-разному связанных с процессами орогенного метаморфизма и магматизма: (1) аккреционный; (2) аккреционно-тыловодужный; (3) коллизионный; (4) трансформно-сдвиговый и (5) плюмовый. Они характеризуются различной минералого-геохимической и металлогенической нагрузкой, обусловленной разнообразием геодинамических обстановок формирования руд данного типа. Учет специфики этих типов необходим при геолого-генетической и прогнозно-поисковой характеристике орогенных золоторудных систем. Принятие геологических факторов и учет специфики минерального состава руд в характеристике геодинамических подтипов орогенного золотого оруденения весьма важно для целей региональной металлогении и локального прогноза.

В целом можно отметить, что запланированные работы в значительной степени соответствуют плану исследований на отчетный год и задание можно считать выполненным. Получены дополнительные материалы для генетических моделей рудно-магматических систем Монголо-Охотского орогенного пояса и рудообразующих систем

Мамско-Бодайбинского. Новые данные по типоморфизму минералов позволяют усилить прогнозно-поисковые модели на золотое оруденение в разных орогенных поясах.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТ ЗА 2021-2025 ГГ

Цель программы 0284-2021-0001 «Благороднометалльные рудообразующие системы складчатого обрамления Сибирского кратона» заключается в выявлении условий, причин и путей накопления и реализации благороднометалльного потенциала складчатых структур и выявлении роли Сибирского кратона в рудном процессе. Изучение геологических и минералого-геохимических процессов рудообразования благороднометалльных месторождений различных генетических и формационных типов, сформированных в различных геодинамических обстановках Забайкалья, Прибайкалья и Северо-Востока России. Определении источника рудного вещества и связь становления рудных систем с геодинамическими событиями в истории развития Сибирского континента

Для достижения поставленной цели в ходе реализации проекты были проведены исследования по следующим направлениям:

- (1) Провести анализ геологических ассоциаций и структурных обстановок локализации благороднометалльного и полиметаллического оруденения
- (2) Определить возможные источники благородных и цветных металлов и выявить этапы их концентрирования
- (3) Сравнить структурно-геологические и минералого-геохимические параметры минерализации разных поясов, провести ее типизацию
- (4) Оценить сходство и различие условий формирования благороднометалльного оруденения
- (5) Выделить факторы концентрирования благороднометалльного и полиметаллического оруденения и образования крупных месторождений в период формирования складчатого обрамления кратона.
- (6) Дополнительным направлением ИГХ СО РАН, в рамках действующего Базового проекта является развитие компетенций института в области импортозамещения технологий и аппаратной базы глубокого извлечения благородных металлов месторождений Сибири и Дальнего Востока.

По каждому блоку результаты приведены ниже.

7.1 Олокитско-Бодайбинский сектор Саяно-Байкальского орогенного пояса

Одними из основных задач проекта, являлись обоснование металлогенической специализации отложений золоторудной Ленской провинции и типизация объектов, приуроченных к разновозрастным отложениям данного региона.

С целью обоснования приобретения металлогенической специализации отложений дальнетайгинского стратиграфического уровня, были опробованы региональные геологические разрезы неопротерозойских толщ в пределах Олокитской-Бодайбинской-Патомской структурно-формационных зон Палеоазиастского бассейна, в соответствии с рисунком 7.1.

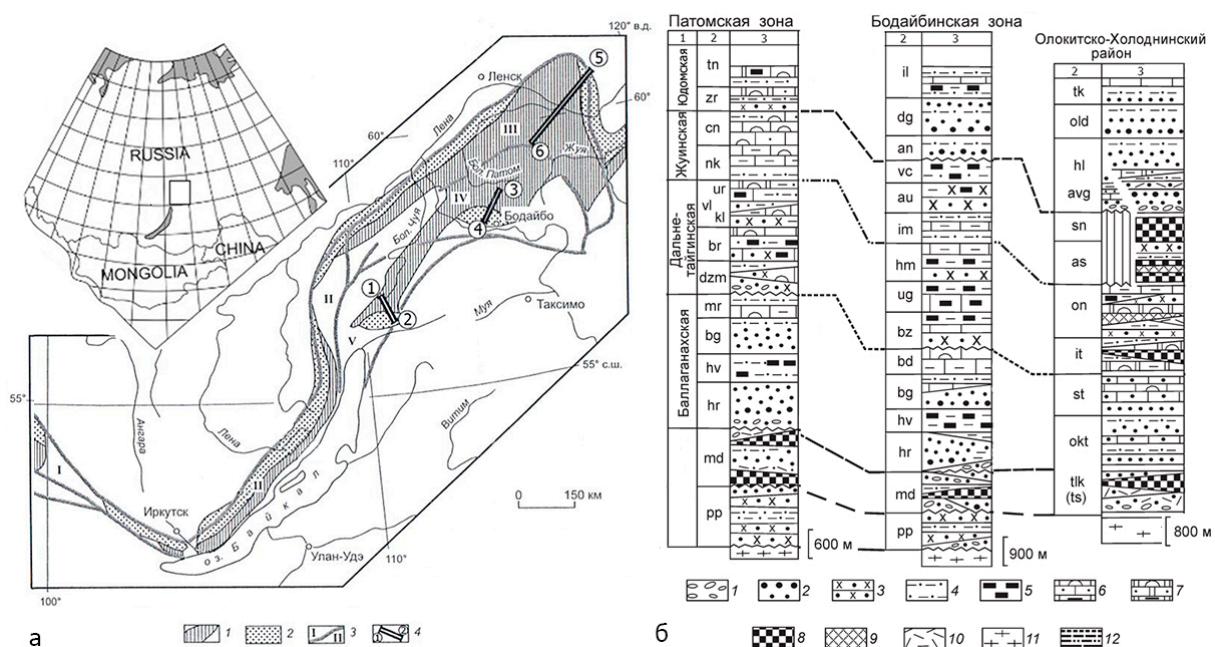


Рисунок 7.1 – Распространение пород неопротерозоя в южном сегменте Саяно-Байкальской области (СБО): 1 – Нерасчлененные отложения балаганахского – дальнетайгинского – жуинского стратоуровней (рифей-венд); 2 – отложения юдомского стратоуровня (венд-кембрий); 3 – контуры СБО, границы и номера структурно-формационных зон и поясов: зоны: I – Присаянская, II – Прибайкальская, III - Патомская, IV – Бодайбинская, V – Олокитская; 4 – линии стратиграфических профилей, показанных на рис. 1б; (б) Корреляция отложений позднего протерозоя Байкало-Патомского региона. I – региональные горизонты по [1]]; II – свиты, толщи; III – породные комплексы; 1 – конгломераты; 2 – гравелиты, песчаники полимиктовые, аркозовые; 3 – песчаники кварцевые, полевошпатово-кварцевые; 4 – алевропелитовые отложения; 5 – углеродсодержащие отложения; 6 – известняки фитолитовые, известняки песчаные, алевропелитовые; 7 – доломиты фитолитовые, доломиты песчаные, алевропелитовые; 8

— вулканические породы основного состава; 9 — вулканические породы кислого и среднего составов; 10 — туфы, туффиты; 11 — граниты, гнейсы, кристаллические сланцы нижнего докембрия; 12 — границы региональных горизонтов. Обозначения свит и толщ: an — анангурская; as — асектамурская; au — аунакитская; avg — авгольская; bd — бодайбоканская; bg — бугарихтинская; br — баракунская; bz — бужуихтинская; cn — ченчинская; dg — дагалдынская; dzm — джемкуканная; hl — холоднинская; hm — хомолхинская; hr — харлухтахская; hv — хайвергинская; il — илигирская; im — имняхская; it — итыкитская; md — медвежевская; mr — маринская; nk — никольская; okt — октолахтинская; old — олдакитская; on — ондокская; pp — пурпольская; st — стойбищная; tlk — тулукитская; tn — тинновская; ts — тыйская; ug — угаханская; vc — вачская; vl — валюхтинская; zr — жербинская

Было продемонстрировано, что наиболее рудопродуктивные горизонты в разрезе неопротерозойских углеродсодержащих толщ юга Сибирского кратона приурочены к узкому возрастному интервалу неопротерозоя (610–570 млн лет) – дальнетайгинский и жуйинский региональные горизонты (бужуихтинская, хомолхинская, аунакитская свиты – Бодайбинский синклиниорий, итыкитская, ондокская свиты – Олокитская структурно-формационная зона, улунтуйская свита – Прибайкальская зона, валюхтинская свита – Патомская и Нечерская зоны) [63, 70, 43, 73, 9, 10]. Было установлено, что в разных зонах Байкальской горной области (БГО) отложения этого интервала, в отличие от стратиграфически выше и ниже залегающих толщ, обладают повышенной меланократостью и надкларковыми содержаниями Au, Ag, Pb, Zn, P, Mn [73, 9, 10].

Опираясь на факт, что подавляющее большинство известных в пределах БГО месторождений и рудопроявлений золота, полиметаллов, марганца и фосфора, среди которых находятся уникальные месторождения Холоднинское [73] и Сухой Лог [73], приурочено к отложениям дальнетайгинского стратиграфического интервала, в соответствии с рисунком 7.2, было проведено дополнительное его изучение. Согласно полученным результатам, мощность образований дальнетайгинского-жуинского (продуктивного) горизонта не превышает 3 км, а возрастной интервал осадконакопления порядка 40 млн лет, в то время как суммарная мощность рифей-вендских толщ в регионе достигает 15 км. Это время в истории развития южной окраины Сибирского континента характеризовалось специфическим сочетанием геодинамических и палеогеографических обстановок седimentогенеза (активная континентальная окраина), определивших металлогенический потенциал отложений. При литолого-geoхимическом анализе

фациальных рядов (с юга на север) Олокитской – Бодайбинской – Патомской зон палеобассейна реконструируется последовательный ряд обстановок осадконакопления, соответствующих задуговому бассейну, а южнее (Муйская зона) – островодужной системе [81, 82, 70, 28, 8]. Соответственно, эксплозивная деятельность вулканических аппаратов южной Байкало-Муйской зоны, а также подводные эксгалации зоны спрединга задугового бассейна (Олокитская СФЗ) оказывали влияние на геохимические особенности амагматичных отложений расположенных севернее (Бодайбинская, Патомская и Прибайкальская зоны, в соответствии с рисунком 7.3. Полученные результаты позволили обосновать перспективность дополнительного опоискования отложений данного стратоуровня, что в результате привело к увеличению МСБ таких организаций как ПАО «GV Gold» и ООО «Красный».

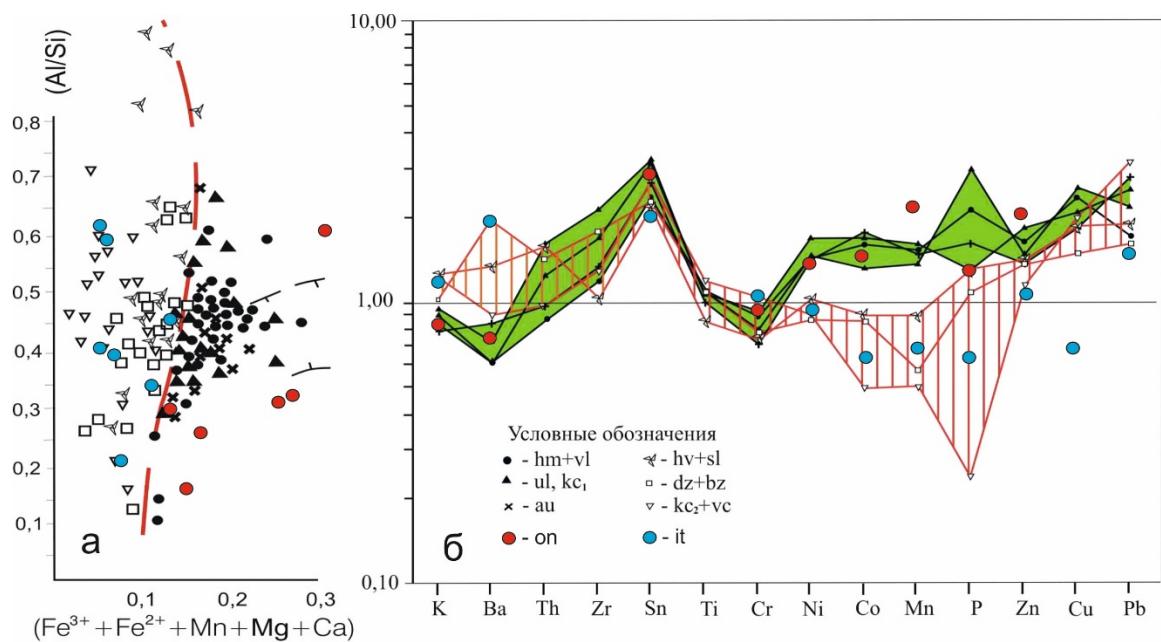


Рисунок 7.2 – Петрохимическая характеристика углеродистых отложений Байкало-Патомского бассейна на классификационной сетке А.Н. Неелова. б) Распределение петрогенных и редких элементов в углеродистых алевропелитах Байкало-Патомского бассейна. Фигуративные точки черного цвета - характеризуют металлоносные отложения; белого цвета - типичны для толщ, не несущих оруденения. Содержания элементов нормированы по стандартному образцу SCHS-1

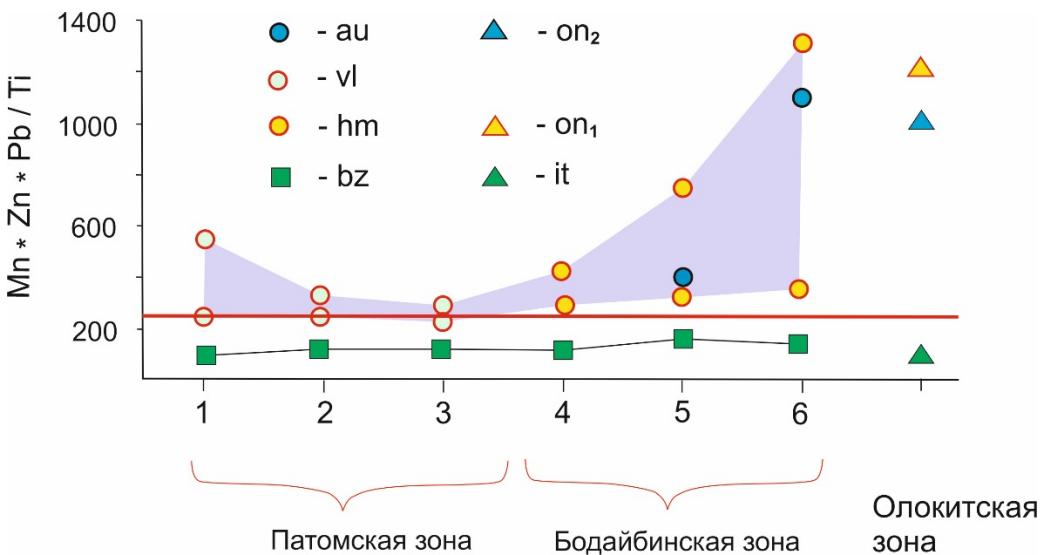


Рисунок 7.3 – Пределы значений экскальационного модуля ($Mn \times Zn \times Pb / Ti$) по разрезам

хомолхинской свиты (закрашено поле интенсивной гидротермальной деятельности).

Положение разрезов: 1 – Бл. Патом, 2 – р. Тонода, 3 – р. Челончен, 4 – р. Жуя Среднее течение), 5 – р. Жуя (устье р. Нечера), 6 – р. Ныгри Название свит: vl – валюхтинская, hm – хомолхинская, au – аунакитская, on – ондокская

В рамках блока проекта посвященному изучению Олокитско-Бодайбинскому региону, одной из важнейших задач было подтверждение формирования золоторудных месторождений Бодайбинского синклиниория в результате орогенных событий, а соответственно отнесения их к «орогенному» типу. Изучены типоморфные особенности главных минералов руд, геохимия руд и рудовмещающих пород, характеристика изотопного состава серы и свинца сульфидов различных генераций.

Выделены два основных подтипа прожилково-вкрапленный «Сухоложский» [73, 96, 9, 10] и золото-кварцевый «Юдомский» [9]. Сухоложский подтип включает крупнообъемные объекты (>50 т), приуроченные к дальнетайгинскому-жуинскому горизонту, и включает такие месторождения как Сухой Лог, Верхне-Угаханско, Голец Высочайший, Красный, Ыканское и др. Юдомский тип, представлен месторождениями меньшими по запасам (<10 т), стратиграфически расположенными в отложениях юдомского горизонта, в соответствии с рисунком 7.4. Основное отличие первых, состоит в наличии катагенной предрудной стадии перераспределение вещества [10].

Для всех объектов была рассмотрена эволюция сульфидного минералообразования. На объектах «Сухоложского» генетического типа выделены 4 морфологических типа соответствующих: 1) диагенетической (руд-1), 2) катагенной (рудоподготовительной) стадии (руд-2), 3) метаморфогенной (синрудной) стадии (руд-3) и наложенной (пострудной)

стадии (ру-4) формирования месторождений, в соответствии с рисунком 7.5 [73, 1326 9]. На объектах кварцевожильного «Юдомского» генетического подтипа, из эволюционного развития выпадает катагенная стадия (ру-2), что объясняет формирование незначительных по объему и запасам (<10 тонн золота) месторождений (табл. 7.1) [10]. Полученные выводы были верифицированы в рамках совместных работ с ПАО «GV Gold», что позволило избежать значительных необоснованных затрат при работах на таких объектах как «Батый» и «Кавказ» приуроченных к отложениям додалдынской свиты юдомского горизонта.

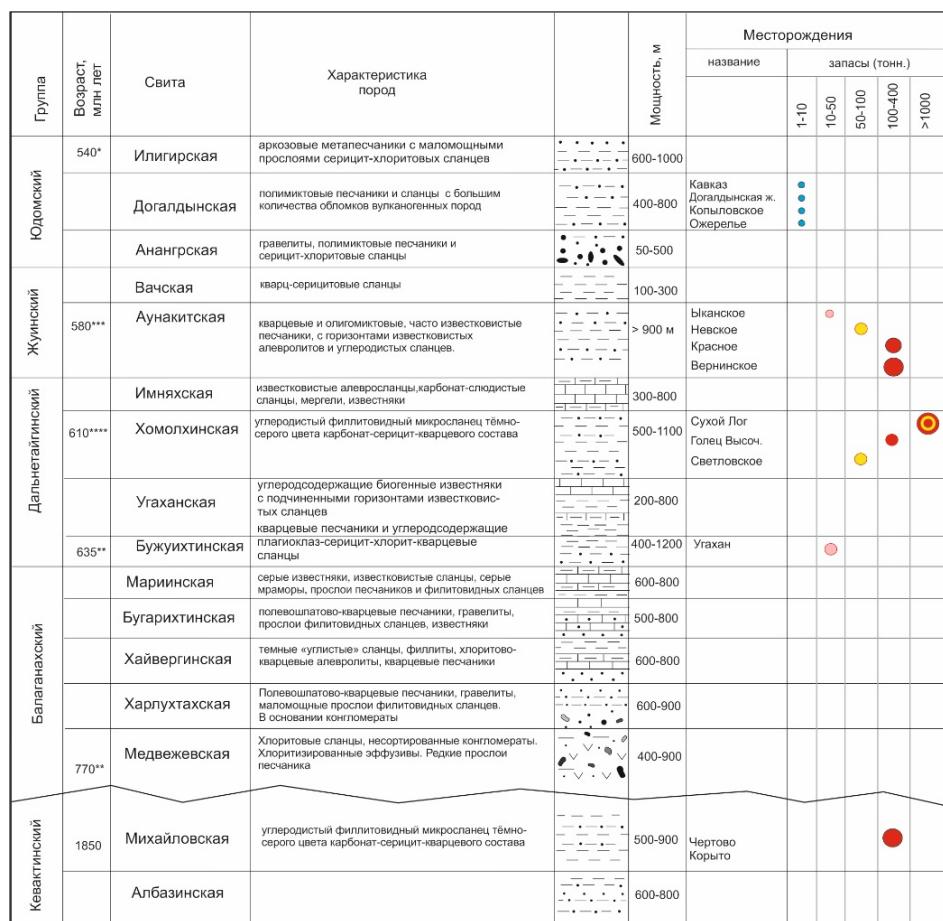


Рисунок 7.4 – Стратиграфическая схема размещения месторождений Бодайбинского синклиниория по материалам: [Melezlik et al., 2009; Юдовская и др., 2011; Kuznetsov et al., 2013; Чумаков и др., 2013; Покровский, Буйкайте, 2015; Powerman et al., 2015]. 1 – песчаники; 2 – пелиты; 3 – алевролиты; 4 – гравелиты; 5 – карбонаты; 6 – конгломераты; 7 – туфы; 8 – месторождения прожилково-вкрапленного золотокварцевого типа; 9 – месторождения штокверкового «Сухоложского» типа.

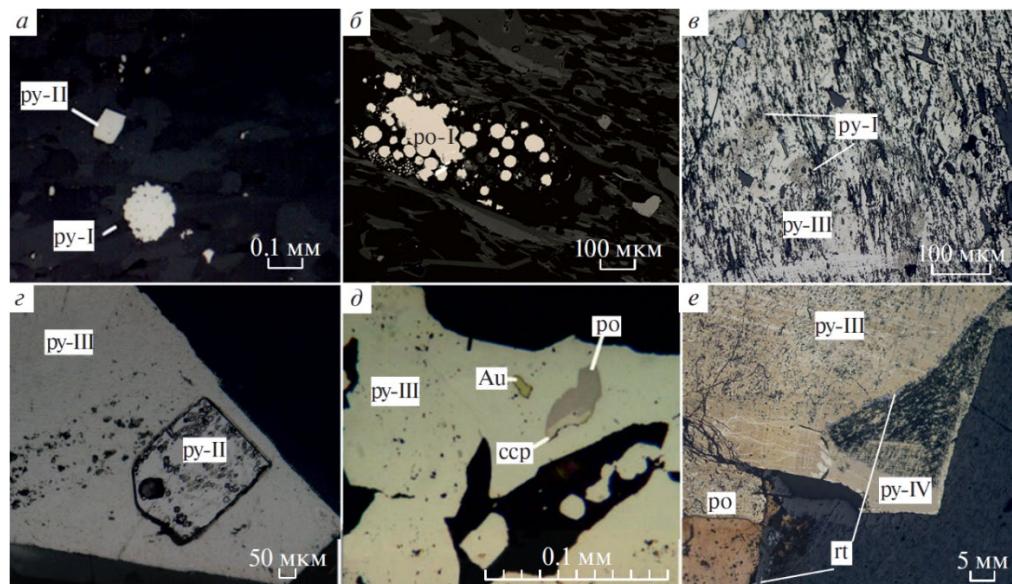


Рисунок 7.5 – Генерации пирита. а – зерна пирита-І и пирита-ІІ; б – скопление фрамбоидального пирротина-ІІ во вмещающих породах; в – реликты пирита-І в метаагрегате пирита-ІІІ (фото после диагностического травления); г – реликты кристаллов кубического пирита-ІІ в агрегате пирита-ІІІ (фото после диагностического травления); д – метаагрегат пирита-ІІІ с включениями халькопирита, пирротина и самородного золота; е – агрегат прожилковидного выделения пирротина и кристалла пирита-ІV и кайма рутила вдоль пирротина и пирита-ІІІ. ру – пирит, по – пирротин, сср – халькопирит, rt – рутил, Au – самородное золото.

Ассоциация золота с пиритом-3, повсеместно сопровождается постоянным присутствием мышьяковистого пирита и арсенопирита. Данный тезис подтвержден многочисленными геохимическими данными, в которых коэффициент корреляции Au с S и As является наиболее устойчивой и достигает 0,8 (при выборке, превышающей 1000 проб (ЛГХ + керновое опробование)). В рамках проекта было обосновано сульфоарсенидное оруденение с золотом в зоне смятия, характерное для отложений в присутствии органического углерода для месторождений Восточного Забайкалья и Бодайбинского района [9]. Было показано, что среди рудных минералов преобладают арсенопирит и пирит при второстепенных сфалерите, халькопирите, пирротине. В зональных кристаллах золотоносных арсенопирита и пирита рассчитан коэффициент диффузии As в структуру пирита, в соответствии с рисунком 7.6.

Таблица 7.1 – Сопоставление минералогических характеристик месторождений Сухоложского типа и Ожерелье

Стадии формирования месторождения	Событие	«сухоложский» генетический тип	Ожерелье
Гранитоидный магматизм	Конкудеро-мамаканский гранитоидный батолит	Qz-жилы, Пирит-4 320-270 млн.лет [96]	Qz-жилы, Пирит-2 320-270 млн.лет [84]
Метаморфизм (регрессивный)	Мамский плутоно-метаморфический комплекс ~ 450 - 420 млн.лет [96, 84]	ЗОЛОТО Пирит-3 Галенит Арсенопирит-2 Халькопирит Герсдорфит Сфалерит Блеклые руды Марказит (220–320°C) 440-420 млн.лет [96]	Марказит (280–350°C)
Метаморфизм (прогрессивный)		Пирротин-2 Арсенопирит-1 Пирротин-1 (~390–420°C) 450-440 млн.лет [96]	ЗОЛОТО Арсенопирит Пирротин Глаукодот Сфалерит Халькопирит (580–640°C)
седиментация	догалдынская свита ~550 млн.лет	–	Пирит-1 (м-е Ожерелье)
	анангурская свита ~555 млн.лет [82]	Пирит-2 (катагенный) (м-я СГТ)	–
	аунакитская свита ~ 590 млн.лет	Пирит-1 (м-е Красный)	
	хомолхинская свита 610-600 млн.лет [82]	Пирит-1 (м-я Сухой Лог; Г. Высочайший)	

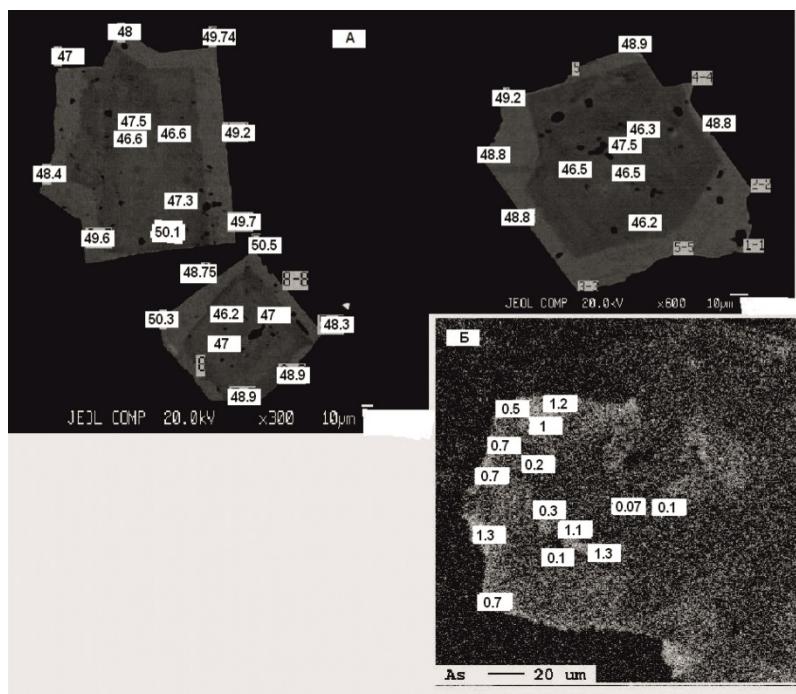


Рисунок 7.6 – Распределения As в асп-І и ру-І, рудная залежь № 1, определения на электронно-зондовом рентгеноспектральном микроанализаторе JXA8200 (JEOL Ltd, Япония), лаборатория рентгеновских методов анализа ИГХ СО РАН, г. Иркутск. А.

Распределения As в асп-І, съемка в сканирующем режиме в обратно рассеянных электронах. Б. Распределения As в ру-І, интенсивность рентгеновского излучения мышьяка. В белых прямоугольниках указаны содержания As, вес. %.

Физико-химическими данными по минеральным равновесиям и флюидным включениям и термодинамическими расчетами по программному комплексу СЕЛЕКТОР обосновывается интервал температуры отложения золота от 350 до 150°C при формировании рудоносного метасоматита, в соответствии с рисунком 7.7. Доказано, что в процессе рудообразования золото переносится в форме тиоарсенитов – AuAsS_2^0 и $\text{H}_2\text{AuAsS}_3^0$, сосуществующих с гидросульфидом AuHS^0 , в сульфоарсенидном гидротермальном растворе с концентрацией серы и мышьяка более 0.01÷0.001 и 0.005÷0.0005 м, соответственно.

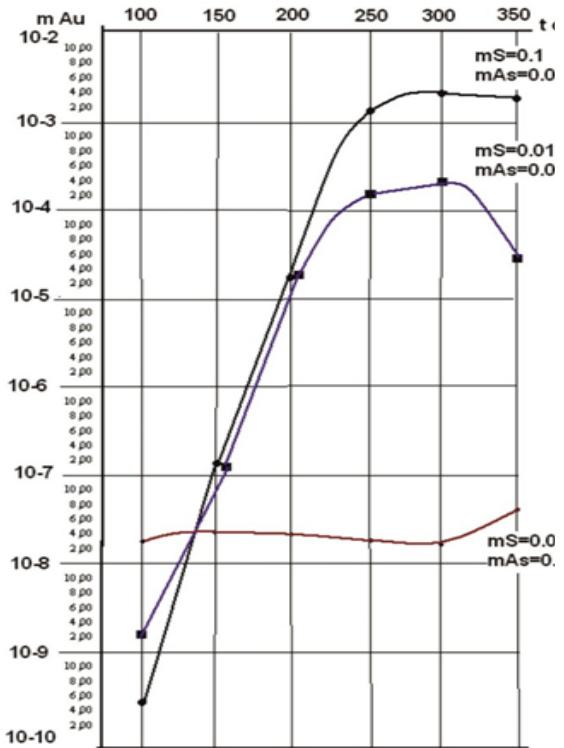


Рисунок 7.7 – Рассчитанная растворимость золота в сульфоарсенидном гидротермальном растворе в зависимости от температуры, концентрации серы и мышьяка при давлении 1 кбар.

Для определения возможного источника золота, параметров его миграции и отложения были изучены изотопные характеристики $\delta^{34}\text{S}$ в сульфидах. Изотопный состав серы был проанализирован во всех разновидностях пирита (ру-1, ру-2, ру-3, ру-4), марказите и пирротине, всех исследуемых в рамках проекта месторождений, приуроченных к отложениям дальнетайгинского (Верхне-Угаханское, Голец Высочайший, Сухой Лог), жуинского (Красный, Ыканское), юдомского (Ожерелье) горизонтов, а также вмещающих отложений в пределах которых непосредственно находятся перечисленные рудные объекты (бужуихтинская, хомолхинская, аунакитская, дагалдынская свиты), в соответствии с рисунком 7.8.

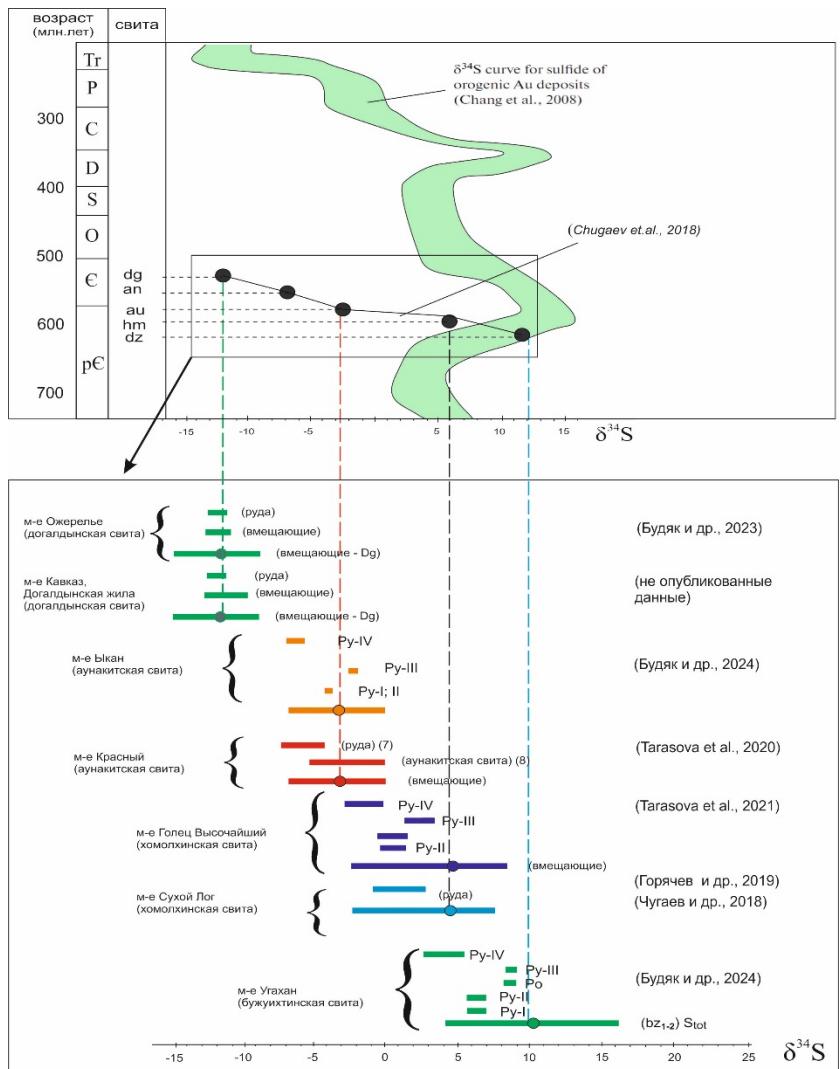


Рисунок 7.8 – Сопоставление вариаций $\delta^{34}\text{S}$ в пирите из прожилково-вкрашенной минерализации месторождений орогенного типа Байкало-Патомского нагорья (Северное Забайкалье)

По изотопному составу серы сульфидные минералы оказались весьма однородны. Независимо от близости к рудной зоне месторождения все сульфидные минералы демонстрировали схожий изотопный состав характерный для конкретной его генерации в пределах конкретного стратиграфического подразделения. Наиболее ранние морфотипы пирита (ру-1; ру-2) демонстрируют значения характерные для этапа осадконакопления (месторождения бужуихтинской свиты $\sim 6,5\%$, хомолхинской свиты $\sim 2,5\%$, месторождения аунакитской $\sim -1,5\%$), с утяжелением изотопного состава на 2 – 3 (в единичных случаях до 5 %) в метаморфогенно-гидротермальной разновидности (ру-3). Посрудный пирит демонстрируют существенно более «легкие» значения $\delta^{34}\text{S}$ (+ 3.8; +1.2; -3.1 %). Валовой состав серы отложений, вмещающих рудные месторождения свит,

отобранных на удалении от месторождения, оказался весьма неоднородным. Разброс значений в некоторых случаях достигает 10 - 12 %. Тем не менее, полученные средние значения по выборкам, превышающим 30 определений, сопоставимы с данными для этих же свит на значительном удалении от месторождений [81].

Изучение текстурно-структурных особенностей месторождений «Сухоложского» подтипа, была предложена концептуальная геолого-структурная модель формирования месторождения Сухой Лог. В рамках предложенной можели продемонстрировано, что формирование промышленных руд месторождения Сухой Лог и рудоконтролирующей складчатости приходится на поздний ордовик–ранний силур (~ 450–420 млн лет) (формирование синрудного пирита-3). Второй этап формирования слабозолотоносных руд (кварцевожильный тип) приходится на ранний карбон (340–300 млн лет) (формирование пострудного пирита-4). Установлено отсутствие рудоконтролирующей зоны разлома синскладчатого этапа (450–420 млн лет). Показано, что внутренняя структура золоторудной зоны представляет собой интенсивно деформированные породы в ядре антиклинали, где золото-кварц-пиритовые прожилки залегают послойно, в соответствии с рисунком 7.9.

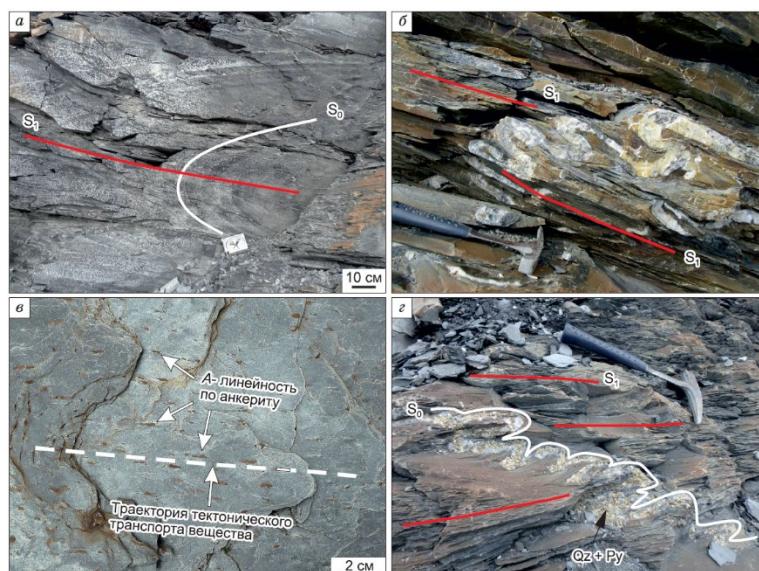


Рисунок 7.9 – Фотографии малых структурных форм месторождения Сухой Лог. *а* – замок мелкомасштабной асимметричной антиклинали; *б* – межслоевая складка волочения; *в* – метаморфическая линейность *A*-типа на плоскости слоистости; *г* – смятая в складки кварц-пиритовая минерализация. Здесь и на рис. 6, 7: Qz – кварц, Py – пирит.

В результате предложенной модели сделан вывод, что месторождение Сухой Лог, как и его аналоги с меньшими запасами руды, является классическим примером дисгармоничного смятия пластичных горных пород в ядре антиклинали, где совмещены признаки двух стадий структурообразования: продольный изгиб с течением и ламинарное течение, в соответствии с рисунком 7.10. Данный тезис позволяет переосмыслить применение ряда геофизических и геохимических методов поисков, ввиду того что поиск разрывной рудоконтролирующей зоны требует иных поисковых подходов, а также значительно увеличивает перспективы поисков объемных по запасам золота месторождений.

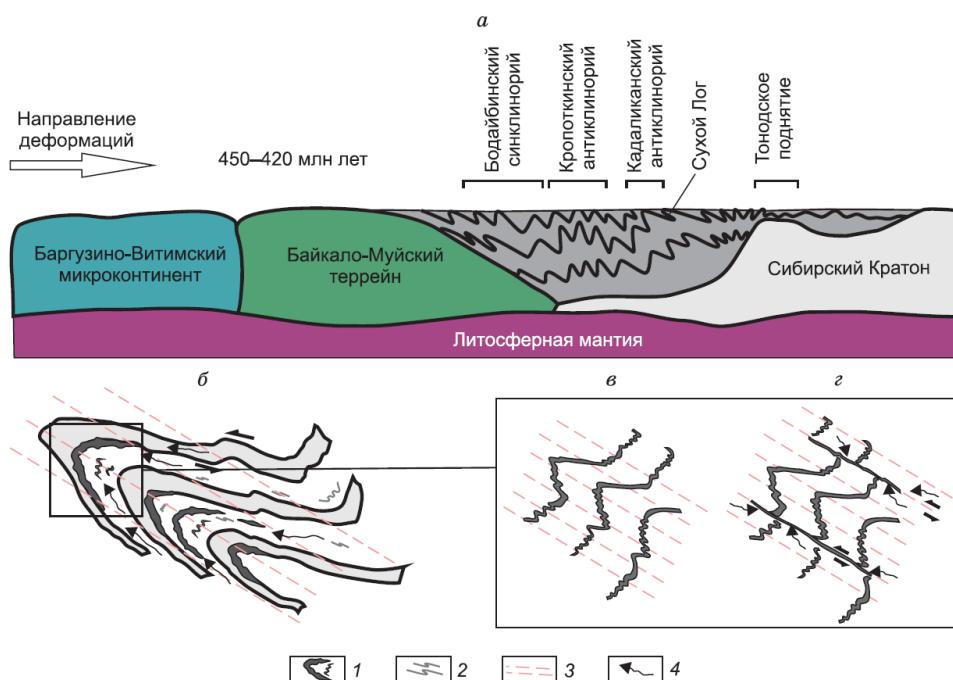


Рисунок 7.10 – Схема формирования складчатой структуры Байкало-Патомского складчатого пояса. *а* – модель формирования складчатости БПП ([Аносов и др., 1988]); *б* – модель формирования структурной ловушки для месторождений «сухоложского» типа [Писаревский и др., 2023]; *в* – схема дисгармоничной складчатости рудных прожилков; *г* – формирование покливажных рудных прожилков в результате микросмещений по кливажу ОП. 1 – послойные золоторудные зоны; 2 – межслоевые складки и волочения; 3 – кливаж осевой поверхности; 4 – движение флюидов.

Геолого-структурные исследования месторождения подтвердили выводы сделанные по результатам изучения вещественных характеристик о правомерности

отнесения месторождения Сухой Лог к орогенному типу с метаморфогенно-метасоматическим характером перераспределения рудного вещества.

Методами Rb-Sr- ^{40}Ar - ^{39}Ar проведено датирование золоторудной минерализации на четырех месторождениях «Сухоложского» типа: Вернинское, Голец Высочайший, Ожерелье и Йкан [96]. Полученные данные Rb-Sr и ^{40}Ar - ^{39}Ar указывают на существование двух рудообразующих событий в этом районе. Ранние сульфидные прожилково-вкрапленные руды сформировались в силурийское время (450-430 млн лет назад) и относятся к периоду регressive регионального метаморфизма в регионе, в соответствии с рисунком 7. 11. В среднем каменноугольном периоде (около 330 млн лет) активизация рудообразующих процессов привела к образованию самородные золотоносные кварцевые жилы. Определение возрастных рамок всех стадий рудообразующих процессов, позволило выстроить модель рудообразования в связи геодинамической эволюцией региона. Сделан вывод о эксклюзивности модели сухоложского подтипа орогенного типа месторождений для Бодайбинского региона.

При изучении органического вещества месторождений «Сухоложского» типа, была подтверждена максимальная продуктивность палеобассейна в дальнетайгинско-жуинское время, ввиду заражения акватории элементами сидерохалькофильной группы, а также увеличения в нем концентрации органического углерода.

Продемонстрировано, что растворимая компонента (битумоид) рассеянного углеродистого вещества черносланцевых толщ наследует геохимический потенциал нефтематеринских пород и является источником и транспортером металла в процессах нефте- и рудогенеза.

Было высказано мнение что, максимальное количество золота сорбируется аморфным углеродом пород на ранних этапах (дометаморфических). Далее, по мере усиления метаморфических преобразований происходит его графитизация с снижением сорбционной активности. Такой характер взаимодействия графитизированного углеродистого вещества с элементами сидерохалькофильной группы позволил утверждать, что количество графитизированного ОВ в породе не является прямым признаком при поисковых работах на рудное золото. Вместе с тем, была продемонстрирована прямая зависимость запасов золота на месторождениях «Сухоложского» типа от первичного содержания в породе органического углерода (докатагенного) и повышенного фонового содержания золота во вмещающих породах.

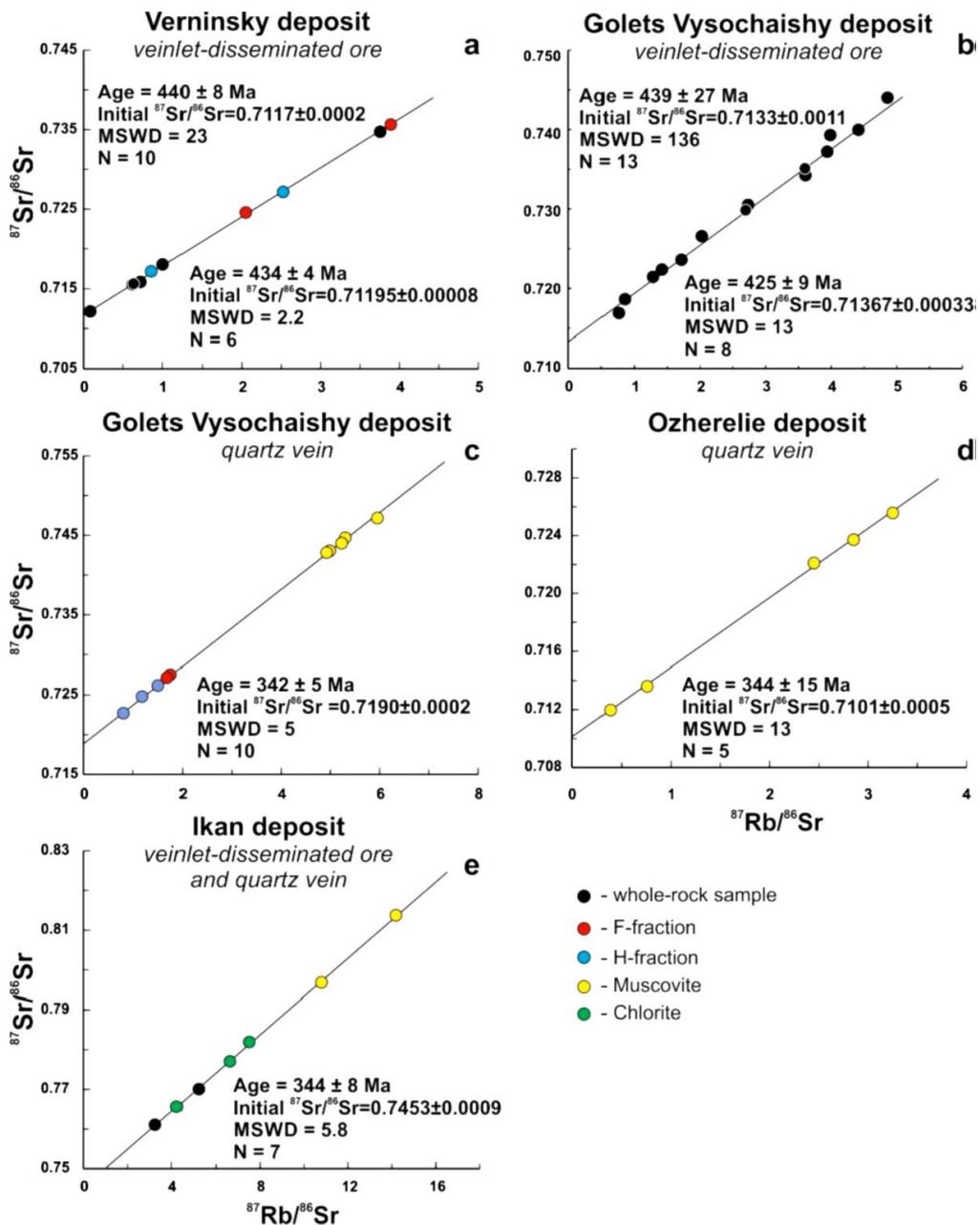


Рисунок 7.11 – Изохронные диаграммы Rb–Sr для прожилково-вкрапленных сульфидных руд и кварцевых жил месторождений «Сухоложского» типа.

Доказано что органическое вещество имеет бактериально-планктоногенное происхождение и его повышенные содержания связаны с созданными условиями осадконакопления в закрытом бассейне (foreland basin), а заражение осадков элементами сидеро-халькофильной группы с действующей на этот момент гидротермальной экскаллятивной деятельностью, связанной с рассеянным спредингом задугового бассейна. Комплекс предложенных тезисов подтверждает, метаморфогенно-метасоматическую модель формирования месторождений «Сухоложского» типа, в результате

перераспределения рудоносного флюида из вмещающих черносланцевых отложений дальнетайгинско-жуинского горизонта.

Результаты полученные в рамках реализации проекта были полностью опубликованы в ведущих Российских и англоязычных журналах из перечня WOS, представлены на многочисленных Российских конференциях и опробированы в рамках совместных работ по заказу горнорудных предприятий. В рамках раздела изучения месторождений орогенного типа дополнительно исследовались некоторые характеристики рудной минерализации орогенных объектов Байкало-Муйской зоны.

Проведено датирование Au-руд месторождений Юбилейное, Ирокинда и Урях, расположенных в Байкало-Муйском складчатом поясе, и Pb-Zn-руд месторождения Озерное в Баргузинско-Витимском супертеррейне (Забайкалье, Россия). Возраст серицита ($^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ метод) инкапсулированного в пирит золотоносного кварца, месторождений Юбилейное, Ирокинда и Урях, составил 265 ± 33 млн лет, 276 ± 13 млн лет и 287 ± 7 млн лет соответственно. Возраст рассеянного оруденения на месторождении Озерное составляет 329 ± 19 млн лет. Полученные данные свидетельствуют о двух стадиях минерализации руд Южного обрамления Субирского кратона: 330-320 млн лет для рассеянного минерализования и 290-270 млн лет для жильного. Независимо от местоположения и природы вмещающих пород, обе стадии связаны с формирования Ангаро-Витимских гранитных батолитов.

При изучении сульфидной минерализации в орогенных эклогитах Северо-Муйского блока основной упор был сделан на роли надсубдукционного переноса металлов и сопутствующих окислительно-восстановительных процессах в их формировании. Проводились исследования сульфидных минералов в высокобарических комплексах, стадийности их формирования и сохранности в процессе прогрессивного и пикового метаморфизма. Сульфидная минерализация пирит-халькопирит-пирротинового состава имеет метасоматическое происхождение, связанное с процессами ретроградного флюидного преобразования исходно «сухих» эклогитовых парагенезисов на стадии эксгумации на нижне-среднекоровые уровни синхронно с декомпрессией и формированием плагиоклаз-диопсид \pm амфиболовых симплектитов (ниже 10-12 Кбар). Крайне неоднородный изотопный состав серы ($\delta^{34}\text{SVCDT}$) пирита обусловлен разными источниками флюидов, которые могли иметь метаосадочное происхождение (от -8,2 до -6 %) в парагнейсовых сегментах Северо-Муйского блока, но могли преимущественно буферироваться гидротермально измененными метабазитами (от +0,7 до +7,1 %).

7.2 Вторым разделом реализации проекта НИР 0284-2021-0001, является изучение благороднометалльной минерализации Забайкальского сектора Монголо-Охотского орогенного пояса.

Исследования по данному разделу проводились на ряде объектов Забайкальского края. 1) Месторождении Погромное Апрелковско-Пешковского рудного узла расположено на Восточно-Забайкальской ветви Монголо-Охотской сутуры, в краевой части Ононского островодужного террейна. Рудные тела месторождения сформированы на периферии рифтогенного ареала верхнеюрского вулканизма шадаронской серии. При изучении месторождения было показано, что рудовмещающие метасоматиты месторождения были сформированы в два этапа: возраст раннего этапа около 139 млн лет, с последующей наложенной фазой прожилкового оруденения на уровне 131 млн. лет. Метасоматические изменения связаны со становлением гранитоидов амуджикано-сретенского комплекса. Согласно полученным данным, оруденение залегает в зоне смятия с замещением субстрата метасоматическими изменениями кварц-альбит-слюдистой формации профиля кислотного выщелачивания. По данным изучения метасоматитов и флюидных включений в кварце золотоносные руды формировались в интервале температур 570-350°C (метасоматиты) и 360-235°C (прожилковая кварцевая минерализация). Интервал давлений составил от 1 до 2.65 кбар. Присутствие углекислого газа, метана и водорода в хлоридно-натровых растворах и флюидах, участвующих в рудообразовании, обусловлено декарбонизацией углеродистых пород рудовмещающей вулканогенно-осадочной толщи. На примерах объектов Забайкальского края была показана роль металлогенических исследований в прогнозе перспективных территорий [22].

В рамках изучения эволюция Карицкой рудно-магматической системы (Восточное Забайкалье): был продемонстрирован опыт применения мелкомасштабной геохимической съемки. Апробация данного методического подхода к расшифровке эволюции рудно-магматических систем (PMC), показала высокую сходимость теоретических результатов с реальными природными объектами. Подход основан на изучении геохимических полей, связанных с различными этапами эволюции магматического очага, сопровождающегося рудной минерализацией. В качестве материала для исследований использовались результаты геохимических съемок по потокам рассеяния в пределах Карицкого рудного узла (Восточное Забайкалье). Выполненный анализ особенностей состава и последовательности выделения геохимических полей позволил более уверенно установить, значительную эрозию редкометалльной PMC, сформированную в два этапа основных рудообразования. Первый этап рудообразования связан с эволюцией верхней

магматической камеры (апикальной части Кара-Чачинского массива). Главным полезным компонентом этой РМС был Au, Mo, в соответствии с рисунком 7.12. Второй этап развития РМС связан с эволюцией нижней магматической камеры. Эта минерализация также была редкометалльной, ее профилирующими элементами были Au, Cu и Mo. Было установлено, что Au мобильно на двух этапах эволюции поздней РМС и накапливается при наложении одной стадии минерализации на другую, в соответствии с рисунком 7.12. Все рудные объекты приурочены к зоне кольцевых разломов, фиксирующих границы невскрытого магматического очага.

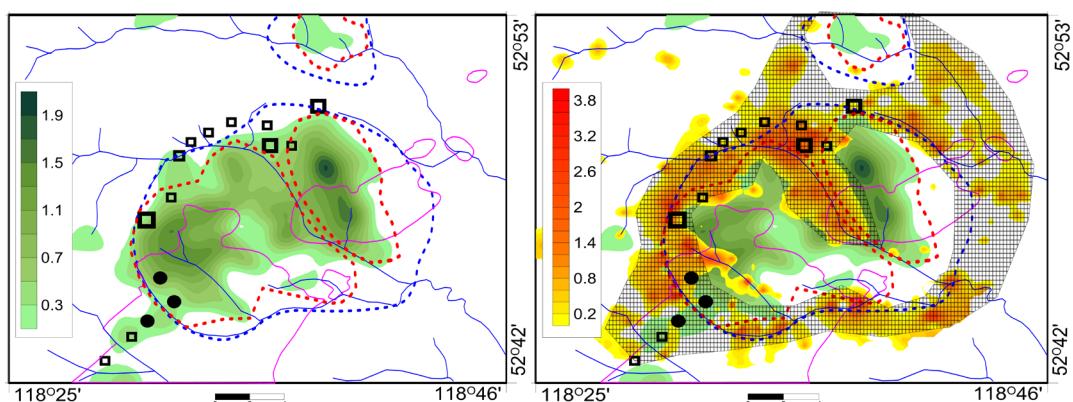


Рисунок 7.12 – Карийский рудный узел. а - Купольная система Си-Мо минерализация. б - Си-Мо-Au минерализация. Синей пунктирной линией обозначена зона кольцевых разломов, ограничивающих контур невскрытого магматического очага. Красные пунктирные линии - купольные выступы в пределах ундулирующей кровли магматического очага. Розовые линии - границы массивов амуджикано-сретинского комплекса. Квадраты - рудные объекты Au. Заливенный круг - рудные объекты Mo. Штриховкой обозначена проницаемая зона ремобилизованная при тектоническом событии разделяющим этапы рудообразования

Данный тезис послужил важнейшим условием при реализации совместного с компанией Норникель проекта посвященному поискам золото-медного-молибденового оруденения в пределах Мостовского золоторудного района характеризующегося аналогичной геологической ситуацией. Также выделяется две стадии рудообразования, в соответствии с рисунком 7.13. Первая стадия представлена пирротин-пирит-халькопирит-молибденит-сфалеритовой с шеелитом; и полиметаллической с карбонатом ассоциацией. Второй этап рудообразования представлен биотит-магнетит-рутгиловой; хлорит-мусковит-турмалиновой; пирит-молибденит-халькопиритовой с шеелитом; галенит-сфалерит-

серебро-теллуридная с золотом; карбонатной минерализацией. Приурочен к «Х-образной» проницаемой зоне, расположенной на границе двух купольных выступов гранитоидов олекминского комплекса, над не вскрытым гребнем интрузии амуджикано-сретинского комплекса [27]. Главными полезными компонентами этой стадии рудообразования являются молибден, медь, вольфрам и золото.

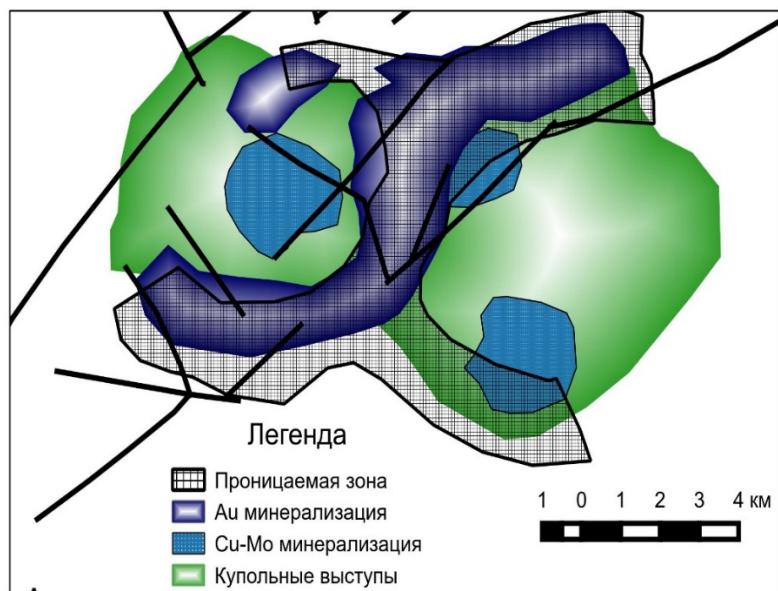


Рисунок 7.13 – Мостовская площадь. Купольная система Cu-Mo и Cu-Mo-Au минерализация (Ефремов и др., 2024)

Не смотря на разный набор рудных минералов в выделенных ассоциациях рассматриваемых районов, набор главных полезных компонентов (молибден, медь и вольфрам, с добавлением золота) и последовательность их выделения остаются постоянными.

В рамках исследования объектов Забайкальского края было определение принадлежности оруденения Балейского района. Исследуемым объектом, было выбраны месторождения золота Верхне-Алиинское и Рябоконь, которое входит в состав Мунгинского рудного узла Балейского рудного района. Оно ассоциирует с месторождениями Сосновским, Майским и Средне-Голготайским, образуя субширотную полосу орогенного золотого оруденения на южном фланге Балейского рудного района. Золотое оруденение Верхне-Алиинского месторождения пространственно и хронологически связано со средне-позднеюрским гранитоидным магматизмом.

Месторождение локализовано в штокообразном теле монцонит-гранодиоритового состава и представлено сульфидно-кварцевыми жилами, и минерализованными зонами. Рудная минерализация месторождения отличается минералогически от Средне-Голготайского, Сосновского и Майского месторождений высокой сульфидностью продуктивных руд, редкостью находок минералов висмута и заметно меньшей ролью кварца в составе продуктивных ассоциаций. Рудные жилы двух типов: пирит-арсенопиритовые с кварцем и пирит-халькопирит-полиметаллические. Было выделено два этапа формирования гидротермальной минерализации: ранний турмалин-мусковит-кварцевый, связанный с ундинскими гранитами, и поздний, собственно рудный, в составе которого помимо кварца и сульфидов, отмечается вторая генерация турмалина. В пределах второго этапа, предполагается две фазы формирования жильной минерализации, ранняя – жилы халцедоновидного кварца с обильной арсенопирит-полиметаллической минерализацией, имеющие субширотную ориентировку и поздние жилы незолотоносного халцедона. По результатам работ предложена общая последовательность минерализации в пределах рудного поля: I - дорудные турмалин и жилы гидротермального постмагматического кварца (без сульфидов), связанные с ундинскими гранитоидами; II - жилы и минерализованные зоны кварца с пиритом, арсенопиритом, иногда с турмалином, они секут дайки гранит-порфиров жильной фации рудовмещающего интрузива, и III – халцедоновые жилы с сульфидами поздние непродуктивные. Сочетание продуктивных жил разнотипного кварца может свидетельствовать о меньшей глубине формирования Верхне-Алиинского месторождения по сравнению с другими месторождениями южного фланга Балейского рудного района [21].

В технологическом плане важным результатом исследования является то, что индикатором окисленности руд выступает форма нахождения мышьяка, а не серы. Было отмечено, что равные количества окисленных и первичных сульфидных руд необходимо учитывать при разработке технологической цепочки их переработки. Полученные данные прошли опробацию и были учтены в процессе извлечения золота.

7.3 На протяжении всего проекта проводились исследования, направленные на реализацию работ прикладного характера. Одним из направлений взаимодействия с горнорудными компаниями данного проекта являлся локальный прогноз перспективности территорий, представляющий прогнозно-минерагенические исследования на примере ряда районов Забайкальского края и Иркутской области.

Локальный прогноз осуществлялся с целью подтверждения вероятности порфирового оруденения в районе Амуджиканского гранитного массива (Восточное Забайкалье). Исходя из наиболее известной локальной модели медно-порфировой рудно-магматической системы, с присущей ей металлогенической и геохимической вертикальной зональностью [126, 115], нами были проведены поисково-оценочные работы в районе Лево-Амуджиканского массива Могочинского района Забайкальского края. Результаты геохимической съемки, в соответствии с рисунком 7.14.

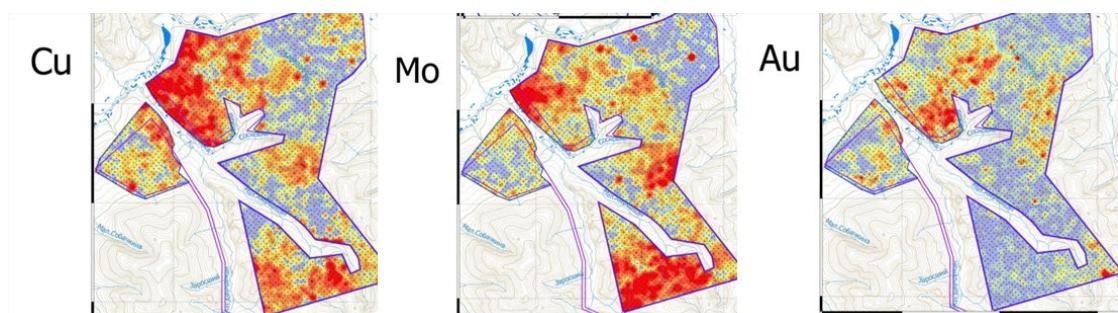


Рисунок 7.14 – Monoэлементные геохимические аномалии в приконтактовой зоне Лево-Амуджиканского массива. Красное – максимальные значения содержаний элементов.

Металлогенические реконструкции по результатам геохимической съемки на основе порфировой модели позволили выделить два интрузивных купола с Cu-Mo-порфировой минерализацией в ядрах и золотой на флангах. В зоне, контролирующей золотую минерализацию установлена вертикальная геохимическая зональность, связанная с разным уровнем эрозионного среза геологических блоков в ее пределах. Проделанная работа позволила оценить перспективы медной и золотой минерализации и дать прогноз на дальнейшие геологоразведочные работы [22].

Дополнительным перспективным направлением в формате прикладных исследований было использование цифровых моделей геологического строения для выделения палеовулканических структур, контролирующих порфировые рудные объекты.

Реализация методики анализа строения палеовулканических структур с использованием 3D визуализации модели геологического строения территории, основанной на цифровой модели рельефа, описанной в [27], позволил выделить два палеовулканических аппарата и слагающие их структурные элементы: фрагменты конуса, эксплозивные купола, штоки порфиритов, зоны кольцевых разломов с локализацией в них дайковых поясов, в соответствии с рисунком 7.15.

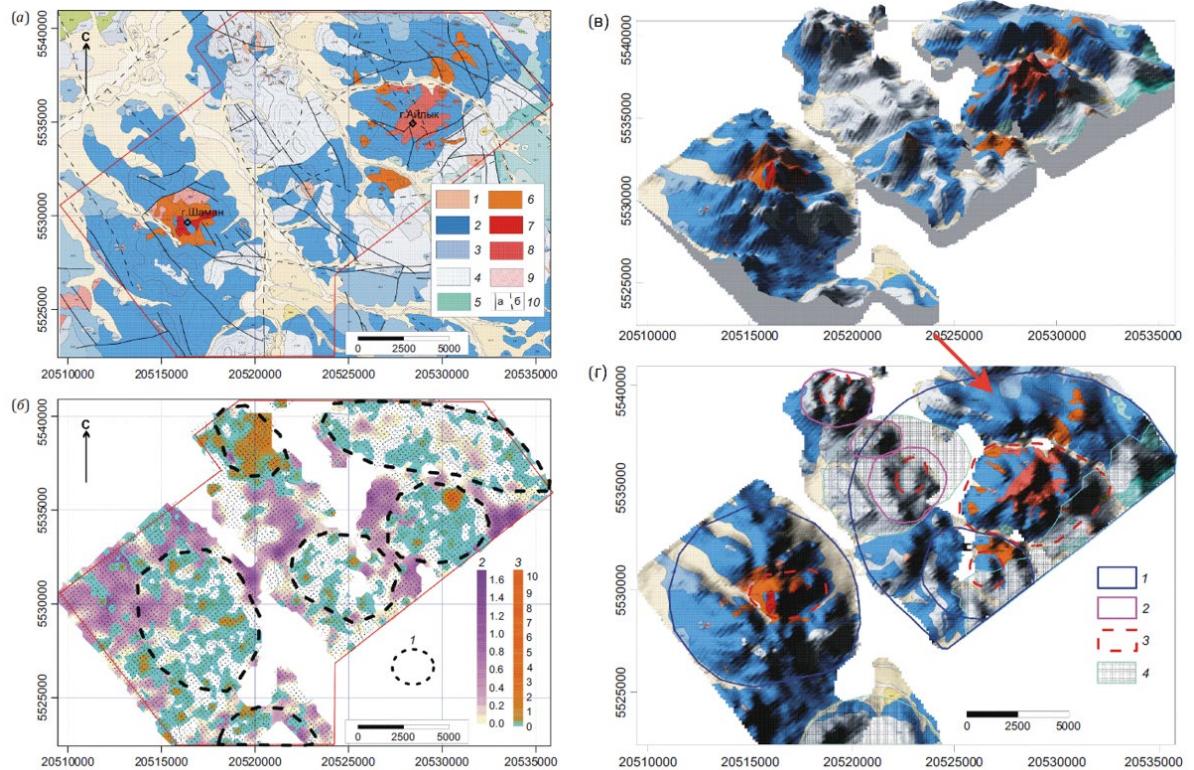


Рисунок 7.15 – Геологическая и геохимическая карты района работ. (а) – схематическая геологическая карта; (б) – карта геохимических ассоциаций. 1 – предполагаемые контуры невскрытых магматических очагов; 2 – зона пропилитизации; 3 – зона щелочного метасоматоза. (в-г) – визуализация трехмерной модели рельефа с наложенной геологической картой. (в) – ортографическая проекция (в данной проекции ось Z отсутствует ввиду ее наложения на ось ординат); (б) – проекция на горизонтальную плоскость: 1 – контуры андезитовых вулканов и паразитических куполов в их пределах; 2 – контуры дацитовых паразитических куполов; 3 – контуры эксплозивных куполов в центральных частях вулканических построек; 4 – депрессии.

В рамках модели эволюции порфировых рудных систем, подобный подход к построению 3-D модели, дает возможность выделить перспективные площади для

постановки поисковых работ на рудные объекты заданного типа. Проверка методики выполнена на основании результатов геохимической съемки. Был показан закономерный контроль выделенными структурными элементами геохимических полей. Анализ пространственного положения выделенных структурных блоков с определенной геохимической характеристикой довольно хорошо укладывается в рамки модели эволюции порфировых рудных систем. Во всех случаях отмечается контроль порфировыми штоками геохимических ореолов. Кроме того, отмечается ярко выделяющиеся вещественные комплексы пород, являющиеся фрагментами зональной «LitoCap» порфирового рудного объекта. В пределах площади работ было выделено три рудно-магматические системы на малом уровне эрозионного среза, потенциально сопровождающиеся рудной минерализацией порфирового типа.

В результате проведенных геофизических и литогеохимических работ выделены перспективные участки, которые позже были заверены буровыми работами.

Таким образом, академическая наука, разрабатывая фундаментальные основы металлогении, может вносить и более конкретный вклад в решение прогнозно-металлогенических задач.

Технологическое направление. Рассмотрены методы доизвлечения золота из хвостов золотодобывающих предприятий.

Проведены эксперименты по разработке технологий доизвлечения «невидимого» золота. В качестве объектов исследований использованы отходы ЗИФ Вернинского и Нежданинского месторождений.

Полученные результаты подтвердили возможность получения вторичных концентратов с содержанием промышленно осваиваемых концентраций золота, например, процессами выщелачивания цианированием. Результаты удалось достигнуть совокупностью методов довскрытия вмещающих минералов, механохимической активации – отрывом золотонесущих фаз от пустой породы и совокупностью гравитационного и флотационного дообогащения с применением эффективных флотореагнетов и пневмогидравлической аэрации, позволяющей выделять субмикро- и нанодисперсные фракции [33].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абрамов Б.Н. Верхне-Алиинское золоторудное месторождение: условия формирования, петрогохимические особенности пород и руд (Мунгинский рудный узел, Восточное Забайкалье) // Литосфера. – 2016. – № 4. – С. 92–101.
2. Алгебраистова Н.К., Макшанин А.В., Бурдакова Е.А., Маркова А.С. Извлечение золота из хвостов золотоизвлекательной фабрики с использованием процесса агломерационной флокуляции // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2013. – №12. – С. 56-61.
3. Алексеев В.Б. Структурный парагенезис зон стресс-метаморфизма // Геотектоника. – 1990. – № 5. – С. 21–32.
4. Боровиков А.А., Калинин Ю.А., Абрамов Б.Н., Сухоруков В.П. Рудообразующие флюиды месторождений Александровское и Давенда (Восточное Забайкалье) // Геология рудных месторождений. – 2020. – Т. 62. – № 4. – С. 321–348.
5. Борисов Р.В., Брагин В.И., Усманова Н.Ф., Плотникова А.А. Особенности нахождения и подвижность золота в лежальных хвостах золотоизвлекательной фабрики // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2020. – № 1. – С. 138–147. – DOI 10.15372/FTPPI20200115.
6. Брагин В.И., Бурдакова Е.А., Кондратьева А.А., Плотникова А.А., Бакшеева И.И. Исследование на обогатимость флотационным методом лежальных золотосодержащих хвостов // ФТПРПИ. – 2018.– №4.– С.152-160.
7. Брагина В.И., Коннова Н.И. Извлечение ценных минералов из хвостов обогащения // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2011. – №. 12.– С. 165-167.
8. Будяк А.Е., Скузоватов С.Ю., Таракова Ю.И., Ванг К.Л., Горячев Н.А. Единая неопротерозойская-раннепалеозойская эволюция рудоносных осадочных комплексов юга Сибирского кратона // ДАН. – 2019. – Т. 484. – № 3. – С. 335–339.
9. Будяк А.Е., Таракова Ю.И., Чугаев А.В., Горячев Н.А., Веливецкая Т.А., Игнатьев А.В. Особенности формирования золоторудной минерализации в условиях амфиболитовой фации метаморфизма: месторождение Ыкан (Байкало-Патомский пояс) // Тихоокеанская геология. – 2024. – Т. 43. – № 3. – С. 64-87.
10. Будяк А.Е., Чугаев А.В., Таракова Ю.И., Горячев Н.А., Блинов А.В., Абрамова В.Д., Рассохина И.В., Реутский В.Н., Игнатьев А.В., Веливецкая Т.А., Ванин В.А. Геолого-минералогические и геохимические особенности золоторудного

месторождения Угахан «Сухоложского» типа (Байкало-Патомское нагорье) // Геология и геофизика. – 2024. – doi: 10.15372/GiG2023132

11. Метаморфизм и рудообразование / Буряк В.А. – М.: Недра, 1982. – 256 с.
12. Варшал Г.М., Велюханова Т.К., Кощеева И.Я., Баранова Н.Н., Козеренко С.В., Галузинская А.Х., Сафонов Н.С., Банных Л.Н. О концентрировании благородных металлов углеродистым веществом пород // Геохимия. – 1994. – № 6. – С.814-824.
13. Варшал Г.М., Кощеева И.Я., Хашватова Б.Д., Холин Ю.В., Данилова В.Н., Таций Ю.Г., Велюханова Т.К., Быков И.В., Тютюнник О.А., Галузинская А.Х. Взаимодействие ртути с гуминовыми кислотами как определяющий фактор механизма и концентрирования в объектах окружающей среды // Разведка и охрана недр. – 1998. – № 3. – С. 29.
14. Вилор Н.В., Волкова М.Г., Будяк А.Е., Горячев Н.А., Павлова Л.А., Спиридов А.М., Брянский Н.В., Данилов Б.С. Сульфоарсенидное оруденение с золотом в зоне смятия на Восточно-Забайкальской ветви Монголо-Охотской сутуры (месторождение Погромное, Восточное Забайкалье, Россия) // Тихоокеанская геология. – 2021. – Т. 40. – № 4. – С. 33-50.
15. Воротынцев А.А., Красников В.И., Ланда В.Е. Суматохин В.А., Рогов А.В., Ванин Н.И. Типоморфные свойства рудных минералов и зональность одного золото-сульфидного месторождения // Типоморфизм минералов и его прикладное значение. Чита, ОНТИ ЗабНИИ. – 1983. – С.42–44.
16. Ганжа Г.Б., Развозжаева Э.А. Органическое вещество в осадочных породах Вернинского золоторудного месторождения, Патомское нагорье // Руды и металлы. – 2014. – № 3. – С. 65-73.
17. Экстракционные процессы и их применение / Гиндин Л.М. – М.: Наука, 1984. – 144 с.
18. Глязнецова Ю.С., Зуева И.Н., Чалая О.Н., Лифшиц С.Х. Применение ИК-спектроскопии для контроля качества отбора проб для битуминологических и экологических исследований // Наука и образование. – 2005. – № 4. – С. 68-71.
19. Гончаров М.А., Талицкий В.Г., Фролова Н.С. Введение в тектонофизику: учеб. пособ. / Ред. Н.В. Короновский. – М.: КДУ, 2005. – 496 с.
20. Горжевский Л.И., Карцев А.А., Павлов Л.И., Голева Г.А., Калинко М.К., Блох А.М., Богашова Л.Г., Лобровольская М.Г., Лонец А.И., Лобзова Р.В., Лэк А.А., Шадлун Т.Н. Парагенезис металлов и нефти в осадочных толщах нефтегазоносных бассейнов – М.: Недра, 1990. – 262с.

21. Горячев Н.А., Никанюк Т.С., Будяк А.Е. О рудной минерализации Верхне-Алиинского месторождения (Забайкальский край, Россия) // Современные направления развития геохимии: материалы Всероссийской конференции с участием зарубежных ученых, посвященной 65-летию Института геохимии им. А.П. Виноградова и 105-летию со дня рождения академика Л.И. Таусона (21–25 ноября 2022 г.). – Иркутск, Изд-во Института географии им. В.Б. Сочавы СО РАН. – 2022. – Т. 1. – С. 147–148
22. Горячев Н.А., Фридовский В.Ю., Будяк А.Е., Горячев И.Н., Ефремов С.В., Кудрин М.В., Тарасова Ю.И. Роль металлогенических исследований в прогнозе перспективных терриотрий. От моделей к объектам // Вестник РАН. – 2023. – Т.93. – №7. – С. 614-622
23. Государственный доклад. О состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2016 и2017 гг. Ред. Е.А. Киселев. М.: ФГБУ ВИМС, 2018. – 372 с.
24. Гурин К.К., Башлыкова Т.В., Ананьев П.П., Бобоев И.Р., Горбунов Е.П. Извлечение золота из хвостов золотоизвлекательной фабрики от переработки упорных руд смешанного типа // Цветные металлы. – 2013. – № 5. – С. 41-45.
25. Дубинина Е.О., Чугаев А.В., Иконникова Т.А., Авдеенко А.С., Якушев А.И. Источники вещества и флюидный режим формирования кварц-карбонатных жил на месторождении золота Сухой Лог, Байкало-Патомское нагорье // Петрология. – 2014. – Т. 22. – № 4. – С. 347–379.
26. Евсеев В.В., Немеров В.К., Серебренникова О.В. Особенности состава органического вещества и распределения редких металлов в древних черносланцевых формациях Сибири // Электронный научный журнал Нефтегазовое дело. – 2008. – № 1. – С. 25-31.
27. Ефремов С.В., Горячев Н.А., Будяк А.Е. Эволюция Карицкой рудно-магматической системы (Восточное Забайкалье, Россия): опыт применения мелкомасштабной геохимической съемки // Геология рудных месторождений. – 2021. – Т. 63. – № 3. – С. 283–294
28. Жмодик С.М., Бондаренко П.М., Немировская Н.А. Авторадиографическое изучение перераспределения урана при метаморфизме и деформации углеродисто-кремнистых сланцев // Доклады Академии наук СССР. – 1991. – Т. 318. – № 1. – С. 207-212.

29. Зорин А.Ю., Мазукабзов А.М., Гладкочуб Д.П., Донская Т.В., Пресняков С.Л., Сергеев С.А. Силурийский возраст главных складчатых деформаций рифейских отложений Байкало-Патомской зоны // ДАН. – 2008. – Т. 423. – № 2. – С.228–233.
30. Койжанова А.К., Арыстанова Г.А., Седельникова Г.В., Есимова Д.М. Исследование биогидрометаллургической технологии извлечения золота из хвостов сорбции золотоизвлекательной фабрики // Цветные металлы. – 2016. – №9.– С. 52-57.
31. Колпаков В.В., Неволько П.А., Фоминых П.А. Минералогия и коренные источники золота Давенда-Ключевского рудно-rossыпного узла (Восточное Забайкалье) // Геология рудных месторождений. – 2024. – Т. 66. – № 5. – С. 483–504.
32. Комогорцев Б.В., Вареничев А.А., Потапов И.И. Технологии и методы ресурсосбережения минерально-сырьевой базы золота России // Экономика природопользования. – 2015. – №3. – С. 89-112
33. Кондратьев С.А., Бурдакова Е.А. Роль физической формы сорбции во флотационном процессе // ФТПРПИ. – 2017. – №. 4. – С. 135-144.
34. Конторович А.Э., Борисова Л.С., Меленевский В.Н. Некоторые важнейшие черты геохимии асфальтенов нефтей // Геохимия. – 1987. – № 10. – С. 1423–1432.
35. Конторович А.Э. Геология нефти и газа: Избранные труды. Т.1. Геология нефти и газа Сибири. // Новосибирск: СНИИГГиМИС. – 2008. – 540 с.
36. Корчагина Д.А., Агибалов О.А. Опыт прогнозирования перспективных на золотое оруденение площадей на основе проведения комплексного анализа рудной и россыпной золотоносности (Забайкальский край) // Отечественная геология. – 2020. – № 1. – С. 29–51. DOI: 10.24411/0869–7175–2020–10003
37. Кряжев С.Г., Устинов В.И., Гриненко В.А. Особенности флюидного режима формирования золоторудного месторождения Сухой Лог по изотопно-геохимическим данным // Геохимия. – 2009. – № 10. – С. 1108–1118
38. Кузнецов В.Г. Золоторудное месторождение Сухой Лог (геологическое строение и подсчет запасов по состоянию на 1 февраля 1977 года). Иркутск. – 1977
39. Лаверов Н.П., Чернышев И.В., Чугаев А.В., Баирова Э.Д., Гольцман Ю.В., Дистлер В.В., Юдовская М.А. Этапы формирования крупномасштабной благороднометальной минерализации месторождения Сухой Лог (Восточная Сибирь): результаты изотопно-геохронологического изучения // Доклады Академии наук. – 2007. – Т. 415. – № 2. – С. 236-241.
40. Меретуков М.А., Гурин К.К. Поведение золота в хвостовых отвалах // Цветные металлы. – 2011. – №. 7. – С. 27-31.

41. Михайлов А.Г., Харитонова М.Ю., Вашлаев И.И., Свиридова М.Л. Исследование подвижности водорастворимых форм цветных и благородных металлов в массиве лежальных хвостов обогащения // ФТПРПИ. – 2013. – №3. – С. 188-196
42. Немеров В.К., Станевич А.М. Эволюция рифей-венденских обстановок биолитогенеза Байкальской горной области // Геология и геофизика. – 2001. – Т. 42. – № 3. – С. 456-470.
43. Немеров В.К., Станевич А.М., Развозжаева Э.А., Будяк А.Е., Корнилова Т.А. Биогенно-седиментационные факторы рудообразования в неопротерозойских толщах Байкало-Патомского региона. Геология и геофизика. – 2010. – Т. 51. – 5. – С. 729-747.
44. Неручев С.Г., Смирнов С.В. Оценка потенциальных ресурсов углеводородов на основе моделирования процессов их генерации и формирования месторождений нефти и газа // Нефтегазовая геология. Теория и практика – 2007. – Т. 2. – С. 3-15.
45. Никанюк Т.С., Мальцева Г.Д. Вещественный состав руд Верхне-Алиинского месторождения // Изв. Сибирского отделения Секции наук о Земле РАН. Геология, поиски и разведка рудных месторождений. Иркутск, Изд-во ИрГТУ. – 2008. – № 6 (32). – С. 50–59.
46. Р. В. Борисов, В. И. Брагин, Н. Ф. Усманова, А. А. Плотникова. Особенности нахождения и подвижность золота в лежальных хвостах золотоизвлекательной фабрики // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2020. – № 1. – С. 138-147. – DOI 10.15372/FTPRPI20200115.
47. Паленова Е.Е., Белогуб Е.В., Плотинская О.Ю., Новоселов К.А., Масленников В.В., Котляров В.А., Блинов И.А., Кузьменко А.А., Грибоедова И.Г. Эволюция состава пирита на золоторудных месторождениях Копыловское и Кавказ в черносланцевых толщах (Бодайбинский район, Россия) по данным РСМА и ЛА-ИСП-МС // Геология рудных месторождений. – 2015. – Т. 57. – № 1. – С. 71-79.
48. Парфенов Л.М., Берзин Н.А., Ханчук А.И., Бадарч Г., Беличенко В.Г., Булгатов А.Н., Дриль С.И., Кириллова Г.Л., Кузьмин М.И., Ноклеберг У., Прокопьев А.В., Тимофеев В.Ф., Томууртогоо О., Янь Х. Модель формирования орогенных поясов Центральной и Северо-Восточной Азии // Тихоокеанская геология. – 2003. – Т. 22. – № 6. – С. 1–41.
49. Паталаха Е.И. Механизм возникновения структур течения в зонах смятия // Алма-Ата, Наука. – 1970. – 216 с.
50. Патент RU 2638600 C1 2017-12-14. Устройство флотационного разделения смеси нано- и микроструктур / Немаров А.А., Кондратьев и др.

51. Патент RU 2692386 C1 2006-01-01. Способ извлечения наноразмерных частиц из техногенных отходов производства флотацией / Кондратьев В.В. и др.
52. Патент RU 2578319 C1 2019-07-11. Способ выделения углеродных наночастиц из техногенного углеродистого материала / Кондратьев В.В., Ржечицкий Э.П.
53. Патент № 2636727 C1 Российская Федерация, МПК B01D 1/24, B01F 3/04, B01F 3/20. Устройство для аэрации жидкости / Немаров А.А., Кондратьев В.В. и др.
54. Писаревский С.А., Иванов А.В., Донская Т.В., Гладкочуб Д.П., Ванин В.А., Дымшиц А.М., Шарыгин И.С., Четвертаков И.В., Гладкочуб Е.А., Мисюркеева Н.В., Буддо И.В., Шелохов И.А., Смирнов А.С., Вахромеев А.Г. Сибирский кратон и его складчатые обрамления в истории Земли: палеогеография, палеогеодинамика и полезные ископаемые. Иркутск, Восточно-Сибирская типография. – 2023. – 232 с.
55. Плотинская О.Ю., Грабежев А.И., Зелтманн Р. Состав блёклых руд как элемент зональности порфироэпимеральной системы (на примере рудопроявления Биксизак, Ю. Урал) // Геология рудных месторождений. – 2015. – Т. 57. – № 1. С. 48–70.
56. Прокофьев В.Ю., Зорина Л.Д. Флюидный режим Дарасунской рудно-магматической системы (Восточное Забайкалье) по данным исследования флюидных включений // Геология и геофизика. – 1996. – Т. 37. – № 5. – С. 50–61.
57. Развозжаева Э.А., Прокофьев В.Ю., Спиридовон А.М., Мартихаев Д.Х., Прокопчук С.И. Благородные металлы и углеродистое вещество в рудах месторождения Сухой Лог (Восточная Сибирь, Россия) // Геология рудных месторождений. – 2002. – Т. 44. – № 2. – С. 116-229.
58. Развозжаева Э.А., Спиридовон А.М., Таусон В.Л., Будяк А.Е. Формы золота в геополимерах углистых сланцев (Патомское нагорье, Восточная Сибирь) // Геохимия. – 2011. – № 9. – С. 998-1004.
59. Развозжаева Э.А., Будяк А.Е., Прокопчук С.И. Сорбционная активность нерастворимого углеродистого вещества черносланцевых образований в процессе регионального метаморфизма (Байкало-Патомское нагорье) // Геохимия. – 2013. – № 1. – С. 92-96.
60. Развозжаева Э.А. Геохимия углерода и благородных металлов в осадочно-метаморфических комплексах складчатого обрамления Сибирской платформы // Новосибирск: Академическое издательство «Гео». – 2015. – 135 с.
61. Рутштейн И.Г., Богач Г.И., Виниченко Е.Л., Карасев В.В., Негода В.М., Шивохин Е.А., Абдукаримова Т.Ф., Надеждина Т.Н., Пинаева Т.А. Государственная геологическая карта Российской Федерации. М-б 1:200 000. Серия Приаргунская. Лист М-

50-IV – Шелопугино. Объяснительная записка. СПб., Картографическая фабрика ВСЕГЕИ. – 2002. – 120 с.

62. Рыцк Е.Ю., Ковач В.П., Коваленко В.И., Ярмолюк В.В. Структура и эволюция континентальной коры Байкальской складчатой области // Геотектоника. – 2007. – № 6. – С. 23–51.

63. Рыцк Е.Ю., Ковач В.П., Макеев А.Ф., Богомолов Е.С., Ризванова Н.Г. Восточная граница Прибайкальского коллизионного пояса: геологические, геохронологические и Nd-изотопные данные // Геотектоника. – 2009. – № 4. – С.16–26.

64. Руженцев, С.В., Минина О.Р., Некрасов Г.Е., Аристов В.А., Голионко Б.Г., Доронина Н.А., Лыхин Д.А. Байкало- Витимская складчатая система: строение и геодинамическая эволюция // Геотектоника. – 2012. – № 2. – С.3–28.

65. Савчук Ю.С., Волков А.В. Крупные и суперкрупные орогенные золотые месторождения: геодинамика, структура, генетические следствия // Литосфера. – 2019. – Т. 19. – № 6. – С.813–833. – DOI: 10.24930/1681-9004-2019-19-6-813-833.

66. Сахарова М.С., Калиткина Н.А., Колонин Г.Р., Исследование температурных условий рекристаллизации золота в сульфидных рудах // III Всес. совещ. по минерал. термобарометрии и геохимии глубин. минералообраз. растворов. М.: 1968

67. Скибицкая Н.А., Навроцкий О.К., Бурханова И.О., Зекель Л.А., Большаков М.Н. Распределение микроэлементов в высокомолекулярных компонентах нефти ранних стадий нефтегенерации в газонасыщенной части продуктивных отложений западной и восточной частей Оренбургского НГМК // Актуальные проблемы нефти и газа. – 2018. – Вып. 3 (22). – С. 1 – 12.

68. Скибицкая Н.А., Навроцкий О.К., Бурханова И.О., Большаков М.Н., Зекель Л.А. Содержание металлов в высокомолекулярных компонентах нефти ранней стадии нефтегенерации (на примере Оренбургского НГМК) // Труды Российского государственного университета нефти и газа им. И.М. Губкина. – 2016. – № 2(283). – С. 23–34.

69. Сокерина Н.В., Онищенко С.А., Исаенко С.И. Флюидный режим формирования золоторудного месторождения Голец Высочайший (Ленский золотоносный район) // Вестник института геологии Коми научного центра УрО РАН. – 2016. – № 7 (259). – С. 3-9. DOI: 10.19110/2221-1381-2016-7-3-9.

70. Станевич А.М., Мащук И.М., Мазукабзов А.М., Постников А.А., Корнилова Т.А. Южный фрагмент Сибирского кратона: ландшафтная история за два миллиарда лет // Геодинамика и тектонофизика. – 2010. – Т. 1. – № 1. – С. 103-118.

71. Справочник химика Т. 1/ Ред. кол.: Никольский Б.П. и др.. – М.-Л.: Химия, 1966. –1072 с.
72. Талицкий В.Г. Кливаж плойчатости в метаморфических породах Макбальского брахиантеклиниория (Северный Тянь-Шань) // Вестник моск. ун-та. Серия 4. Геология. – 1983. – № 5. – С.34–38.
73. Тарасова Ю.И., Будяк А.Е., Иванов А.В., Горячев Н.А., Игнатьев А.В., Веливецкая Т.А., Радомская Т.А., Блинов А.В., Бабяк В.Н. Типоморфизм, типохимизм и изотопно-геохимические характеристики сульфидов железа месторождения Голец Высочайший (Восточная Сибирь) // Геология рудных месторождений. – 2021. – Т. 150. – № 1. – С. 63-75. – DOI.[10.31857/S0869605521010123](https://doi.org/10.31857/S0869605521010123).
74. Таусон В.Л., Кравцова Р.Г., Акимов В.В., Липко С.В., Спиридовон А.М., Будяк А.Е., Воронова И.Ю., Белозерова О.Ю., Арсентьев К.Ю. Формы нахождения углерода, серы и благородных металлов на месторождениях черносланцевой формации (пример золоторудного месторождения Дегдекан, северо-восток РФ) // Доклады академии наук. – 2018 – Т. 478. – № 2. – С. 221-228.
75. Тимофеевский Д.А. Геология и минералогия Дарасунского золоторудного района // Труды ЦНИГРИ. М.: 1972, вып. 98. – 156 с.
76. Теория и практика прикладной гидроаэромеханики в обогащении полезных ископаемых и металлургии / К. Л. Ястребов, В. В. Кондратьев, Н. А. Иванов [и др.]. – Иркутск: Изд-во ИРНИТУ. – 2015. – 350 с.
77. Теория и практика процессов флотационного обогащения наноразмерных сред / В. В. Кондратьев, А. А. Немаров, Н. А. Иванов [и др.]; Иркутск : Изд-во ИРНИТУ, 2015. – 160 с. – ISBN 978-5-8038-1026-1.
78. Филимонов С.В. Минералы группы блёклых руд – индикаторы рудогенеза (на примере гидротермальных месторождений золота): автореф. дис. ... канд. геол.минерал. наук. – М., 2009. – 45 с.
79. Флеров Б.Л. Оловорудные месторождения Яно-Колымской складчатой области. Новосибирск: Наука. – 1976. – 247с.
80. Чантuria V. A., Kozlov A. P., Matveeva T. N., Lavrinenco A. A. Инновационные технологии и процессы извлечения ценных компонентов из нетрадиционного, труднообогатимого и техногенного минерального сырья // ФТПРПИ.– 2012.– №5.– С. 144-156. (Chanturia V.A., Kozlov A.P., Matveeva T.N., Lavrinenco A.A. Innovative technologies and extraction of commercial components from unconventional and

difficult-to-process minerals and mining-and-processing waste, Journal of Mining Science, 2012, Vol. 48. – Issue 5.– P. 904-913.)

81. Чугаев А.В., Плотинская О.Ю., Чернышев И.В., Котов А.А. Неоднородность изотопного состава Pb в сульфидах различных парагенетических ассоциаций на золоторудном месторождении Вернинское (Байкало-Патомское нагорье, Россия) // Доклады Академии наук. – 2014. – Т. 457. – № 3. – С. 337-345.

82. Чугаев А.В., Будяк А.Е., Чернышев И.В., Дубинина Е.О., Гареев Б.И., Шатагин К.Н., Таракова Ю.И., Горячев Н.А., Скузоватов С.Ю. Изотопные (Sm-Nd, Pb-Pb и $\delta^{34}\text{S}$) и геохимические характеристики метаосадочных пород Байкало-Патомского пояса (Северное Забайкалье) и эволюция осадочного бассейна в неопротерозойское время // Петрология. – 2018. – Т. 26. – № 3. – С. 213-244.

83. Шадрунова И. В., Горлова О. Е., Провалов С. А. Адаптивные методы доизвлечения золота из хвостохранилищ золотоизвлекательных фабрик // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2011. – №. 9.– С. 21-27.

84. Юдовская М.А., Дистлер В.В., Родионов Н.В., Мохов А.В., Антонов А.В., Сергеев С.А. Соотношение процессов метаморфизма и рудообразования на золотом черносланцевом месторождении Сухой Лог по данным U-Th-Pb-изотопного SHRIMP-датирования акцессорных минералов // Геология рудных месторождений. – 2011. – Т. 53. – № 1 . – С. 32–64.

85. Юргенсон Г.А. Типоморфизм и рудные формации. Новосибирск, Наука. – 2003. – 369 с.

86. Юргенсон Г.А. О геохимической зональности Верхне Алиинского месторождения золота в Забайкалье (Россия) // Вестник Забайкальского государственного университета. – 2024. – Т. 30. – № 1. – С. 50–61, DOI: 10.2109/2227-9245-2024-30-1-50-61.

87. Яблокова С.В., Самосоров Г.Г., Позднякова Н.Н. Типоморфные особенности золота как критерии связи россыпей с коренными источниками золото-серебряного типа (на примере рудно-россыпного узла Многовершинное) // Отечественная геология. – 2020. – № 4–5. – С. 24–38. DOI: 10.47765/0869–7175–2020–10021

88. Antweiler J.C., Campbell W. Application of gold compositional analyses to mineral exploration in the United States // J Geochem Explor. – 1977. – Vol. 8. – P. 17–29

89. Baksheev I.A., Plotinskaya O.Yu.[Tourmaline of the deposits of the Birgilda-Tominsky ore cluster]. Mineralogiya Urala-2011. Materialy VI Vserossiyskogo soveshchaniya [Mineralogy of the Urals-2011. Materials of the VI All-Russian Meeting]. Miass, IMin UrO RAN. – 2011. – P.129–133. (in Russian)

90. Berrodier I., Farges F., Benedetti M., Winterer M., Brown Jr, G. E., Deveughele M. Adsorption mechanisms of trivalent gold on iron-and aluminum-(oxy) hydroxides. Part 1: X-ray absorption and Raman scattering spectroscopic studies of Au (III) adsorbed on ferrihydrite, goethite, and boehmite, *Geochimica et cosmochimica acta*. – 2004. – Vol. 68. – P. 3019–3042.
91. Buchler, J.W. Syntheses and properties of metalloporphyrins, in *The Porphyrins* // Academic Press, Inc. – 1978. – P. 389–483.
92. Chanturia V.A., Dmitrak Y.V., Kravtsov A.A., Kondratiev V.V. et al. Digital simulation of rock grinding process in ball mill. *Sci Rep.* – 2025. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-30289-7>.
93. Chapman R.J., Banks D.A. Styles T.M., Walshaw R.D., Piazolo S., Morgan D.J., Grimshaw M.R., Spence-Jones C.P., Matthews T.J., Borovinskaya O. Chemical and physical heterogeneity within native gold: implications for the design of gold particle studies // *Mineralium Deposita*. – 2021. – Vol. 56. – P.1563–1588 <https://doi.org/10.1007/s00126-020-01036-x>
94. Chapman R.J., Mileham T.J., Allan M.M., Mortensen J.K. A distinctive Pd-Hg signature in detrital gold derived from alkalic Cu-Au porphyry systems // *Ore Geology Review*. – 2017. – Vol. 83. – P.84–102
95. Chapman R.J., Allan M.M., Mortensen J.K., Wrighton T.M., Grimshaw M.R. A new indicator mineral methodology based on a generic Bi- Pb-Te-S mineral inclusion signature in detrital gold from porphyry and low/intermediate sulfidation epithermal environments in Yukon territory, Canada // *Mineral Deposita*. – 2018. – Vol. 53. – P. 815–834.
96. Chugaev A.V., Larionova Y.O., Chernyshev I.V., Rassokhina I.V., Oleinikova T.I., Budyak A.E., Tarasova Y.I., Travin A.V., Gareev B.I., Batalin G.A. 40Ar-39Ar and Rb-Sr age constraints on the formation of Sukhoi-Log-style orogenic gold deposits of the Bodaibo district (northern Transbaikalia, Russia) // *Ore Geology Reviews*. – 2022. – Vol. 144. – P. 104855.
97. Daniel M. C., Astruc, D. Gold nanoparticles: assembly, supramolecular chemistry, quantum-size-related properties, and applications toward biology, catalysis, and nanotechnology, *Chemical reviews*. – 2004. – Vol. 104. – I. 1. – P. 293-346.
98. Deditius, A.P.; Reich, M.; Kesler, S.E.; Utsunomiya, S.; Chryssoulis, S.L.; Walshe, J.; Ewing, R.C. The coupled geochemistry of Au and As in pyrite from hydrothermal ore deposits. *Geochim. Et Cosmochim. Acta*. – 2014. – Vol. 140. P. – 644–670. [CrossRef]
99. Feiss P.G. Reconnaissance of the tetrahedritetennantite enargi tefamatinitite phase relations as a possible geothermometer // *Economic Geology*. – 1974. – Vol. 69. – № 3. – P. 383–390.

100. Fuchs, S., Schumann, D., Williams-Jones, A.E., Vali, H. The growth and concentration of uranium and titanium minerals in hydrocarbons of the Carbon Leader Reef, Witwatersrand Supergroup, South Africa. *Chem. Geol.* – 2015. – Vol. 393–394. – P. 55–66.
101. Goldfarb R.J., Groves D.I., Gardoll S. Orogenic gold and geologic time: a global synthesis // *Ore Geol. Rev.* – 2001. – Vol. 18. – P. 1–75.
102. Goldfarb R.J., Taylor R., Collins G., Goryachev N.A., Orlandini O.F. Phanerozoic continental growth and gold metallogeny of Asia // *Gondwana Research*. – 2014. – Vol. 25 (1). – P. 49–102.
103. Gammons C.H., Williams-Jones A.E. Hydrothermal geochemistry of electrum; thermodynamic constraints // *Econ. Geol.* – 1995. – Vol. 90. – P. 420–432.
<https://doi.org/10.2113/gsecongeo.90.2.420>
104. Genna D., Gaboury D. Deciphering the hydrothermal evolution of a VMS system by LA-ICP-MS using trace elements in pyrite: An example from the Bracemac-Mcleod deposits, Abitibi, Canada, and implications for exploration // *Econ. Geol.* – 2015. – 110. – P. 2087–2108. [CrossRef]
105. Goryachev N.A., Yurgenson G.A., Nikanyuk T.N. Ore mineralization of the Aliin ore field (Transbaikal sector of the Mongolo-Okhotsk orogenic belt): structural relationships, mineralogy, geochemistry and zoning // *Russian geology and geophysics*. – 2025. Vol. – 7. – DOI: [10.15372/gig2025109](https://doi.org/10.15372/gig2025109)
106. Gvozdev V.I., Grebennikova A.A., Vakh A.S., Fedoseev D.G., Goryachev N.A. Mineral evolution during formation of gold–rare-metal ores in the Sredne-Golgotay deposit (Eastern Transbaikalia) // *Russian journal of pacific geology*. – 2020. – Vol. – 14. – № 1. – P. 66–86. DOI: [10.30911/0207-4028-2020-39-1-70-91](https://doi.org/10.30911/0207-4028-2020-39-1-70-91)
107. Grefflé C., Benedetti M. F., Parron C., Amouric M. Gold and iron oxide associations under supergene conditions: An experimental approach // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. – 1996. – Vol. 60. – I. 9. – P. 1531–1542.
108. Groen J.C., Craig J.R., Rimstidt J.D. Gold-rich rim formation on electrum grains in placers. *Can Mineral.* – 1990. – Vol. 28. – P. 207–228
109. Haack U., Heinrichs H., Bone M., Schneider A. Loss of metals from pelites during regional metamorphism // *Contrib. Mineral. Petrol.* – 1984. – Vol. 85. – P. 116–132.
<https://doi.org/10.1007/BF00371702>
110. Héral G., Fornari M., Viscarra G., Miranda V. Morphological and chemical evolution of gold grains during the formation of a polygenic fluvial placer: the Mio-

Pleistocene Tipuani placer example (Bolivia) // Chronique de la Recherche Minière. – 1990. – Vol. 500. – P. 41–49.

111. Hough R. M., Noble R. R. P., Reich M. Natural gold nanoparticles // Ore Geology Reviews. – 2011. – Vol. 42. – I. 1. – P. 55–61.

112. Keith, M.; Hackel, F.; Haase, K.M.; Schwarz-Schampera, U.; Klemd, R. Trace element systematics of pyrite from submarine hydrothermal vents // Ore Geol. Rev. – 2016. – Vol. 72. – P. 728–745. [CrossRef]

113. Keith M., Smith D.J., Doyle K., Holwell D.A., Jenkin G.R.T., Barry T.L., Becker J., Rampe J. Pyrite chemistry: A new window into Au-Te ore-forming processes in alkaline epithermal districts, Cripple Creek, Colorado. Geochim. Et Cosmochim. Acta. – 2020. – Vol. 274. – P. 172–191. [CrossRef]

114. Kerrick D.M. Caldeira K. Metamorphic CO₂, degassing from orogenic belts // Chem. Geol. – 1998. – Vol. 145. – P 213–232.

115. Kouzmanov, K.; Pokrovski, G.S. Hydrothermal Controls on Metal Distribution in Porphyry Cu (-Mo-Au) Systems In: Geology and Genesis of Major Copper Deposits and Districts of the World: A Tribute to Richard H Sillitoe; Hedenquist, J.W., Harris, M., Camus, F., Eds.; Society of Economic Geologists: Littleton, CO, USA. – 2012. – P. 573–618.

116. Large, R.R., Maslennikov, V.V., Robert, F., DanyushevskY, L.V., Chang, Z. Multistage sedimentary and metamorphic origin of pyrite and gold in the giant Sukhoi Log deposit, Lena Goldfield, Russia. // Econ. Geol. – 2007. – Vol. 102. – P.1233–1267.

117. Liao, J.;Wang, X.; Chen, B.; Wang, B.; Zhu, Z.;Wang,W.; Peng, D.; Zhang, Q.; Liu, Z.; Xu, Q. Pyrite Textures, Trace Element Geochemistry and Galena Pb Isotopes of the Yanzhupo Gold Deposit in the Jiangnan Orogen, South China: Implications for Gold Mineralization Genesis. Minerals 2025. – Vol. 15. – P. 94. <https://doi.org/10.3390/min15010094>

118. Manning, D.A.C., Gize, A.P. The role of organic matter in ore transport processes // In: Engel, M.H., and Macko, S.A. (eds.), Organic Geochemistry. – 1993. – P. 547–563.

119. Meffre, S., Large, R.R., Scott, R., Scott, R., Woodhead, Z.C., Gilbert, S.E., Danyshevsky, L.D., Maslenikov, V.V., Hergt, J.M. Age and pyrite Pb isotopic composition of the giant Sukhoi Log sediment hosted gold deposit, Russia. // Geochim. Cosmochim. Acta. – 2008. – Vol. 72. – P. 2377–2391.

120. Morrison G.W., Rose W.J., Jaireth S. Geological and geochemical controls on the silver content (fineness) of gold in gold-silver deposits. 1991. – Ore Geol Rev. – Vol. 6. – P. 333–364. [https://doi.org/10.1016/0169-1368\(91\)90009-V](https://doi.org/10.1016/0169-1368(91)90009-V)

121. Myagkaya I. N., Lazareva E. V., Gustaytis M. A., Zhmodik S. M. Gold and silver in a system of sulfide tailings. Part 1: migration in water flow, *Journal of Geochemical Exploration*. – 2016. – Vol. 160. – P. 16-30.
122. Nevolko P.A., Kolpakov V.V., Nesterenko G.V., Fominykh P.A. Alluvial-placer gold of northwestern Salair: composition, types, and mineral microinclusions // *Russian Geology and Geophysics*. – 2019. – Vol. 60. – № 1. – P. 67-85.
123. Piatak N. M., Parsons M. B., Seal II R. R. Characteristics and environmental aspects of slag: a review, *Applied Geochemistry*. – 2015. – Vol. 57. – P. 236-266.
124. Powerman V., Shatsillo A., Chumakov N., Kapitonov I., Hourigane J. (2015). Interaction between the Central Asian Orogenic Belt (CAOB) and the Siberian Craton as Recorded by Detrital Zircon Suites from Transbaikalia // *Precambrian Research*. – 2011. – Vol. 267. – P. 39–71. – DOI: doi.org/10.1016/j.precamres.2015.05.015.
125. Shuster J., Reith F., Cornelis G., Parsons J. E., Parsons J. M., Southam G. Secondary gold structures: Relics of past biogeochemical transformations and implications for colloidal gold dispersion in subtropical environments // *Chemical Geology*. – 2017. – Vol. 450. – P. 154-164.
126. Sillitoe R.H. Porphyry Copper Systems // *Economic Geology*. – 2010. – Vol. 105. – P. 3–41.
127. Simone G., Kesler S.E., Essene E.J. Phase Relations among Sele nides, Sulfides, Tellurides, and Oxides: II. Application to Selenide-bearing Ore Deposits // *Economic Geology*. – 1997. – Vol. 92. – P. 468–484.
128. Spiridonov A.M., Kozlov V.D., Zorina L.D., Men'shikov V.I., Bychinskii V.A. Distribution of gold in igneous granitoid complexes in the central and southwestern areas of Eastern Transbaikalia. *Russian Geology and Geophysics*. – 2010. – Vol. 51. – № 8. – P. 846-856.
129. Stepanov A.S. A review of the geochemical changes occurring during metamorphic devolatilization of metasedimentary rocks // *Chem. Geol.* – 2021. – P. 568. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2021.120080>
130. Sugiyama, I., Metal transport by oil: application to ore Genesis // *Earth and Planetary Sciences*. – 2015. – McGill University Montréal Quebec, M.Sc. Thesis.
131. Tarasova Yu.I., Sotskaya O.T., Skuzovatov S.Yu., Vanin V.A., Kulikova Z.I., Budyak A.E. Mineralogical and geochemical evidence for multi-stage formation of the Chertovo Koryto deposit // *Geodynamics & Tectonophysics*. – 2016. – Vol. 7. – № 4. – P. 663–677. <http://dx.doi.org/10.5800/GT-2016-7-4-0227>

132. Tarasova Yu.I., Budyak A. E., Chugaev A.V., Goryachev N.A., Tauson V.L., Skuzovatov S.Yu., Reutsky V.N., Abramova V.D., Gareev B.I., Bryukhanova N.N., Parshin A.V. Mineralogical and isotope-geochemical ($\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{34}\text{S}$ and Pb-Pb) characteristics of the Krasniy gold mine (Baikal-Patom Highlands): Constraining ore-forming mechanisms and the model for Sukhoi Log-type deposits // Ore Geol. Rev. – 2020. – Vol. 119. P. – 103365. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2020.103365

133. Townley B.K., Herala G., Maksaev V., Palacios C. et al. Gold grain morphology and composition as an exploration tool: application to gold exploration in covered areas. // Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis. – 2003. – Vol. 3. – № 1. – P. 29–38.

134. Yudovskaya M.A., Distler V.V., Prokofiev V.Yu., Akinfiev N.N. Gold mineralisation and orogenic metamorphism in the Lena province of Siberia as assessed from Chertovo Koryto and Sukhoi Log deposits // Geoscience Frontiers. – 2016. – Vol. 7. – № 3. – P. 453-481. DOI: 10.1016/j.gsf.2015.07.010

135. Zhong R., Brugger J., Tomkins A.G., Chen Y., Li W. Fate of gold and base metals during metamorphic devolatilization of a pelite // Geochim. Cosmochim. Acta. – 2015. – Vol. 171. – P. 338–352. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2015.09.013>

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Публикации 2025 г. по теме

1. Будяк А.Е., Тарасова Ю.И. Роль органического углерода при формировании месторождений золота орогенного типа (Бодайбинский регион, Россия) // Геология и геофизика. – 2025. – Т. 66. – № 7. – С. 860–882, DOI: [10.15372/GIG2025122](https://doi.org/10.15372/GIG2025122)
2. Ванин В. А., Мазукабзов А. М., Будяк А. Е., Чугаев А. В. Концептуальная модель формирования уникального золоторудного месторождения Сухой Лог по результатам детального геолого-структурного анализа // Геология и геофизика. – 2025. – Т. 66, № 7. – С. 844-859.
3. Горячев Н.А., Юргенсон Г.А., Никанюк Т.Н. Рудная минерализация Алиинского рудного поля (Забайкальский сектор Монголо-Охотского орогенного пояса): структурные соотношения, минералогия, геохимия и зональность // Геология и геофизика. – 2025. – Т. 66. – № 7. – С. 831–843, DOI: [10.15372/GiG2025109](https://doi.org/10.15372/GiG2025109), EDN: MTSQLQ
- 4 Активация металлического сырья в горной промышленности и металлургии / С. В. Галачиева, В. М. Зароченцев, В. В. Кондратьев, Н. А. Штырхунова // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. – 2025. – № 2. – С. 234-240
5. Chanturia V.A., Dmitrak Y.V., Kravtsov A.A., Kondratiev V.V. et al. Digitaln simulation of rock grinding process in ball mill. Sci Rep. – 2025. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-30289-7>.
6. Горячев Н.А. Золотое оруденение Арктического пояса Дальнего Востока России // Руды и металлы. – 2025. – №4. – С. 754-765

7. Bashkeev A. Parshin A. Trofimov I. Bukhalov S. Prokhorov D. Grebenkin N. Modern Capabilities of Semi-Airborne UAV-TEM Technology on the Example of Studying the Geological Structure of the Uranium Paleovalley// Minerals. – 2025. – Vol. 15. – P. 630

В печати

1. Тарасова Ю.И., Щербаков Ю.Д., Ефремов С.В., Будяк А.Е., Горячев Н.А., Ванин В.А., Чугаев А.В. Типоморфизм самородного золота Ключевского рудно-rossыпного узла (Восточное Забайкалье) // Тихоокеанская геология. – 2026. – № 2 (в печать)

Тезисы конференций

1. А.Е. Будяк, С.Ю. Скузоватов, Ю.И. Тарасова общая история формирования неопротерозойских отложений Бодайбинского и Олокитского рудных районов. XXIII всероссийская научная конференция «Геодинамическая эволюция литосферы Центрально-Азиатского подвижного пояса: от океана к континенту».

2. Горячев Н.А., Чан Тuan Ань, Соцкая О.Т., Васильева Т.И., Фам Нгок Кан, Ву Хоанг Ли, Чан Чонг Хoa, Нго Тхи Фыонг. О находке реликта палеогидротермальной системы в габброидах массива Йенчу (Центральный Вьетнам). // Минералогия и геохимия ландшафта горнорудных территорий. Рациональное природопользование. Современное минералообразование: тр. X Всерос. симпозиума с междунар. участием и XVII Всерос. чтений памяти акад. А.Е. Ферсмана [отв. ред. Г.А. Юргенсон]. – Чита, 2025. — С. 28-31.

3. Горячев Н.А., Чан Тuan Ань, Фам Нгок Кан, Неволько П.А., Ву Хоанг Ли, Светлицкая Т.А., Шелепаев Р.А., Чан Чонг Хoa, Изох А.Э., Чан Куок Конг, Нго Тхи Хыонг, Нго Тхи Фыонг, Нгуыен Тuan Ань, Дао Тхай Бак, Фам Тхи Фыонг Лиен, Ле Дук Люонг. О металлогении золота и сопутствующих металлов орогенного пояса Чуонг Шон и прилегающих структур (Вьетнам) // Сборник тезисов докладов XIV Международной научно-практической конференции «Геология, прогноз, поиски и оценка месторождений алмазов, благородных и цветных металлов» (Москва ФГБУ «ЦНИГРИ» 15-18.04. 2025 – М.: ЦНИГРИ, 2025, с. 92-94

4. Бахтина В.Н., Гребенникова А.А., Доброшевский К.Н., Горячев Н.А. Термобарогеохимические параметры формирования рудной минерализации Малиновского рудного узла (Южный Сихотэ-Алинь) // Владивосток, 2025-09-19

5. Голионко Б.Г., Бяков А.С., Горячев Н.А., Ведерников И.Л., Хасанов И.М. Необычные лежачие складки северного обрамления Балыгычанского блока Верхояно-Колымских мезозоид (Северо-Восток России) // Тезисы ГИН Тектоника

6. Соцкая О.Т., Соловьев В.Ю., Горячев Н.А. Минералы индикаторы происхождения руд Албазинского месторождения // Владивосток, 2025-09-19

7. Ю.И. Тарасова, Ю.Д. Щербаков. Бимодальный характер развития самородного золота Давенда-Ключевского рудно-rossыпного узла/ XXIII всероссийская научная конференция «Геодинамическая эволюция литосфера Центрально-Азиатского подвижного пояса: от океана к континенту».

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Публикации 2021-2025 г. по теме

2025 г.

1. Будяк А.Е., Тарасова Ю.И. Роль органического углерода при формировании месторождений золота орогенного типа (Бодайбинский регион, Россия) // Геология и геофизика. – 2025. – Т. 66. – № 7. – С. 860–882, DOI: [10.15372/GIG2025122](https://doi.org/10.15372/GIG2025122)

2. Ванин В. А., Мазукабзов А. М., Будяк А. Е., Чугаев А. В. Концептуальная модель формирования уникального золоторудного месторождения Сухой Лог по результатам детального геолого-структурного анализа // Геология и геофизика. – 2025. – Т. 66, № 7. – С. 844-859.

3. Горячев Н.А., Юргенсон Г.А., Никанюк Т.Н. Рудная минерализация Алиинского рудного поля (Забайкальский сектор Монголо-Охотского орогенного пояса): структурные соотношения, минералогия, геохимия и зональность // Геология и геофизика. – 2025. – Т. 66. – № 7. – С. 831–843, DOI: [10.15372/GiG2025109](https://doi.org/10.15372/GiG2025109), EDN: MTSQLQ

4. Активация металлического сырья в горной промышленности и металлургии / С. В. Галачиева, В. М. Зароченцев, В. В. Кондратьев, Н. А. Штырхунова // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. – 2025. – № 2. – С. 234-240

5. Chanturia V.A., Dmitrak Y.V., Kravtsov A.A., Kondratiev V.V. et al. Digitaln simulation of rock grinding process in ball mill. Sci Rep. – 2025. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-30289-7>.

6. Горячев Н.А. Золотое оруденение Арктического пояса Дальнего Востока России // Руды и металлы. – 2025. – №4. – С. 754-765

7. Bashkeev A. Parshin A. Trofimov I. Bukhalov S. Prokhorov D. Grebenkin N. Modern Capabilities of Semi-Airborne UAV-TEM Technology on the Example of Studying the Geological Structure of the Uranium Paleovalley// Minerals. – 2025. – Vol. 15. – P. 630

2024 г.

1. Damdinov B. B., Khubanov V. B., Goryachev N. A., Damdinova L. B., and Izvekova A. D. Composition and Age of Atypical Zircon–Titanomagnetite Ores of the Tret'yakovskoe Gold–Fluorite Deposit, West Transbaikal // Doklady Earth Sciences. - 2024. DOI: [10.1134/S1028334X23602614](https://doi.org/10.1134/S1028334X23602614)

2. Будяк А.Е., Тарасова Ю.И., Чугаев А.В., Горячев Н.А., Веливецкая Т.А., Игнатьев А.В. Особенности формирования золоторудной минерализации в условиях амфиболитовой фации метаморфизма: месторождение Ыкан (Байкало-Патомский пояс) // Тихоокеанская геология. - 2024.

3. Будяк А.Е., Чугаев А.В., Тарасова Ю.И, Горячев Н.А., Блинов А.В.,
Абрамова В.Д., Рассохина И.В., Реутский В.Н., Игнатьев А.В., Веливецкая Т.А., Ванин
В.А. Геолого-минералогические и геохимические особенности золоторудного
месторождения Угахан «Сухоложского» типа (Байкало-Патомское нагорье) // Геология и
геофизика. – 2024. doi: [10.15372/GiG2023132](https://doi.org/10.15372/GiG2023132)

4. Скузоватов С.Ю., Тарасова Ю.И. Сульфидная минерализация в орогенных
эклогитах Северо-Муйского блока (северо-восточное Забайкалье): генезис и первые
данные об изотопном составе серы // Науки о Земле и недропользование. - 2024. - Т. 47. -
№1. - С. 35-43. 10.21285/2686-9993-2024-47-1-35-43.

5. Vanin V.A., Ivanov A.V., Gorovoy V.A., Budyak A.E. and Bortnikov N.S.
Timing of Ore Mineralisation in Deposits of the Baikal-Muya Belt and the Barguzin-Vitim
Super-Terrain (Transbaikalie) // Minerals. - 2024. - Vol. 14. - № 11. – Р. 1158. DOI:
[10.3390/min14111158](https://doi.org/10.3390/min14111158)

6. Ефремов С.В., Горячев Н.А., Будяк А.Е., Скузоватов С.Ю., Блинов А.В.
Использование цифровых моделей геологического строения для выделения
палеовулканических структур, контролирующих порфировые рудные объекты.
Геодинамика и тектонофизика. – 2024. - Т. 15. - № 2. 0750. DOI: [10.5800/GT-2024-15-2-0750](https://doi.org/10.5800/GT-2024-15-2-0750).

7. Evdokimov S.I., Golikov N.S., Pryalukhin A.F., Kondratiev V.V., Mishedchenko
A., Kuzina A.V., Bryukhanova, N.N., Karlina, A.I. Studying Flotation of Gold Microdispersions
with Carrier Minerals and Pulp Aeration with a Steam–Air Mixture // Minerals. – 2024. - Vol.
14. - Р. 108. <https://doi.org/10.3390/min14010108>

8. Evdokimov S.I., Golikov N.S., Zadkov D.A., Voitovich E.V., Kondratiev V.V.,
Petrovskiy A.A., Konyukhov V.Y., Gladkikh V.A. Studying the Flotation of Gold-Bearing Ores
Using Carrier Minerals // Minerals. – 2024. - Vol. 14. - № 88.
<https://doi.org/10.3390/min14010088>.

9. Карлина А.И., Кондратьев В.В., Петровский А.А., Николаев М.Д., Колосов
А.Д. Исследование процессов извлечения целевых нанофракций двуокиси кремния
методами коагуляции и электрокоагуляции // Черная металлургия. Бюллетень научно-
технической и экономической информации. - 2024. - Т. 80. - № 10. - С. 75-84. DOI:
10.32339/0135-5910-2024-10-75-84

10. Кондратьев В.В., Карлина А.И., Петровский А.А., Дьячков А.А., Карлина
Ю.И. Технологические решения повышения уровня извлечения железа из складированных
хвостов обогащения // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и

экономической информации. - 2024. - Т. 80. - № 11. - С. 5-11. DOI: 10.32339/0135-5910-2024-11-5-11.

11. Gantimurova S. Parshin A. Combined Methodology for Rockfall Susceptibility Mapping Using UAV Imagery Data // Remote Sens. – 2024. - Vol. 16. – P. 177. <https://doi.org/10.3390/rs16010177> ((WOS) IF 5.0 Q1)

2023 г.

1. Горячев Н.А., Фридовский В.Ю., Будяк А.Е., Горячев И.Н., Ефремов С.В., Кудрин М.В., Тарасова Ю.И. Роль металлогенических исследований в прогнозе перспективных территорий. От моделей к объектам // Вестник Российской академии наук. – 2023. – Т. 93. - № 7. - с. 614–622 (WOS).

2. Sinyakova E.F., Goryachev N.A., Kokh K.A., Karmanov N.S., Gusev V.A. The Role of Te, As, Bi, and Sb in the Noble Metals (Pt, Pd, Au, Ag) and Microphases during Crystallization of a Cu-Fe-S Melt // Minerals. – 2023. - 13(9). – 150. <https://doi.org/10.3390/min13091150> (WOS)

3. Будяк А.Е., Тарасова Ю.И., Горячев Н.А., Блинов А.В., Игнатьев А.В., Веливецкая Т.А., Абрамова В.Д., Щербаков Ю.Д. Рудная минерализация месторождения Ожерелье: сопоставление с объектами «Сухоложского» типа // Доклады Российской академии наук. - 2023. - Т. 509. - №2. - С. 199-207. DOI: [10.31857/S268673972260223X](https://doi.org/10.31857/S268673972260223X)

4. Davidenko Y., Hallbauer-Zadorozhnaya V., Bashkeev A., Parshin A. Semi-Airborne UAV-TEM System Data Inversion with S-Plane Method-Case Study over Lake Baikal. // Remote Sens. – 2023. Vol. 15. - 5310. <https://doi.org/10.3390/rs15225310> ((WOS) IF 5.0 Q1)

5. Golik V.I., Klyuev R.V. Martyushev N.V., Kondratiev V.V., Tynchenko V.S., Gladkikh V.A., Iushkova L.V., Brigida V. Reuse and Mechanochemical Processing of Ore Dressing Tailings Used for Extracting Pb and Zn // Materials. – 2023. – Vol. 16. - № 21. 7004. DOI: [10.3390/ma16217004](https://doi.org/10.3390/ma16217004) (01.11.2023) (WOS) ИФ = 3,4 Q2)

6. Панфилов И.А., Шепета Н.А., Ступина А.А., Бойко А.А., Кондратьев В.В. К электрохимической технологии извлечения золота из сульфидных руд // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2023. – № 11-1. – С. 226–238. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_111_0_226. (WOS)

7. Горячев Н.А., Будяк А.Е., Михалицына Т.И., Тарасова Ю.И., Горячев И.Н., Соцкая О.Т. Эволюция орогенного золотого оруденения в структурах южного и восточного обрамления Сибирского кратона // Науки о Земле и недропользование. – 2023. - №46 (4). – С. 374-389 (BAK)

8. Никанюк Т.С. Состав руд и характеристика самородного золота одного из рудопроявлений Восточного Забайкалья // Науки о Земле и недропользование. – 2023. - 46(1). - С.36-50. doi.org/10.21285/2686-9993-2023-46-1-36-50 (BAK)

9. Тарасова Ю.И., Будяк А.Е. Стадийность формирования рудной зоны месторождения Холоднинское (Байкало-Патомское нагорье) // Науки о земле и недропользование. - 2023. - Т. 46. - № 2. - С. 201 – 212 <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2023-46-2-201-211> (BAK)

2022 г.

1. Chugaev A.V., Budyak A.E., Larionova Yu.O., Chernyshev I.V., Travin A.V., Tarasova Yu.I., Gareev B.I., Batalin G.A., Rassokhina I.V., Oleinikova T.I. ^{40}Ar - ^{39}Ar and Rb-Sr age constraints on the formation of Sukhoi-Log-style orogenic gold deposits of the Bodaibo District (Northern Transbaikalia, Russia) // Ore Geology Reviews. - 2022. – Vol. 144: 104855 (01.05.2022). DOI: 10.1016/j.oregeorev.2022.104855

2. Damdinov B.B., Goryachev N.A., Moskvitina M.L., Damdinova L.B., Izvekova A.D., Reutsky V.N., Posokhov V.F., Artemyev D.A. Zun-Kholba Orogenic Gold Deposit, Eastern Sayan, Russia: Geology and Genesis // Minerals. – Vol. 2022. - № 12(4). 395. (01.04.2022) DOI: 10.3390/min12040395

3. Ванин В.А., Мазукабзов А.М., Юдин Д.С., Блинов А.В., Тарасова Ю.И. Наложенные деформации герцинского времени в структуре месторождения Голец Высочайший (Байкало-Патомский пояс), ^{40}Ar / ^{39}Ar данные // Геодинамика и тектонофизика. - 2022. – Т. 13(1): 0575. DOI: 10.5800/GT-2022-13-1-0575. (WOS)

4. Горячев Н.А., Мишунин В.И., Горячева Е.М., Соцкая О.Т., Тарасова Ю.И., Будяк А.Е. Термоэдс сульфидов: возможности метода и значение для минералогических исследований, на примере изучения пирита и арсенопирита золоторудных месторождений восточного и южного обрамления Сибирского кратона // Вестник СВНЦ ДВО РАН. – 2022. - № 3. - С. 14-30

5. Тарасова Ю.И., Будяк А.Е., Горячев Н.А., Игнатьев А.В., Веливецкая Т.А., Блинов А.В., Горячева Е.М. Типоморфизм сульфидов золоторудного месторождения Угахан (Байкало-Патомское нагорье) // Доклады Российской академии наук. Науки о земле. – 2022. - Т. 503. - № 1. – С. 12–17. DOI: 10.31857/S2686739722030136 (англ. DOI: 10.1134/S1028334X22030138).

6. Tarasova Yu., Budyak A., Goryachev N., Skuzovatov S., Reutsky V., Gareev B., Batalin G., Nizamova A. The Role of Metamorphic Devolatilization in Building Orogenic Gold Deposits within Paleoproterozoic Organic-Rich Sediments: P-T-X Thermobarometric and

Carbon Isotopic Constraints from the Chertovo Koryto Deposit (Eastern Siberia) // Russian Journal of Pacific Geology. - 2022. - Т. 16. - № 4. -С. 387-404 (01.08.2022) DOI: 10.1134/S1819714022040078

7. Tarasova Yu.I., Budyak A.E., Ivanov A.V., Goryachev N.A., Ignatiev A.V., Velivetskaya T.A., Radomskaya T.A., Blinov A.V., Babyak V.N. Indicator and Isotope Geochemical Characteristics of Iron Sulfides from the Golets Vysochaishy Deposit, East Siberia // Geology of Ore Deposits. - 2022. – Vol. 64. № 7. - P 1–10. DOI: 0.1134/S1075701522070108

2021 г.

1. Горячев Н.А., Май Ч.Ту., Чан Ч.Х., Веливецкая Т.А., Игнатьев А.В. Изотопный состав серы сульфидов золоторудных месторождений Вьетнама: новые данные // В сборнике: Геологические процессы в обстановках субдукции, коллизии и скольжения литосферных плит. материалы V Всероссийской конференции с международным участием. Дальневосточный геологический институт Дальневосточного отделения Российской академии наук. Владивосток. - 2021. - С. 147-148.

2. Tarasova Yu.I., Budyak A.E., Radomskaya T.A., Goryachev N.A., Ivanov A.V. Typomorphism, typocomposition, and isotopic characteristics of pyrite from the Golets Vysokiy deposit (Eastern Siberia) // GeoBaikal. - 2020. № 6.

3. Горячев Н.А., Кузнецова А.Н., Сысоева Н.М. Малый и средний бизнес в золотодобывающей промышленности Иркутской области // В сборнике: Труды II Гранберговской конференции. Сборник докладов Всероссийской конференции с международным участием, посвященной памяти академика А.Г. Гранбера «Пространственный анализ социально-экономических систем: история и современность». Сибирское отделение Российской академии наук Институт экономики и организации промышленного производства СО РАН. Новосибирск. - 2021. - С. 308-317.

4. Кузьмин М.И., Ярмолюк В.В., Гладкочуб Д.П., Горячев Н.А., Деревянко А.П., Диденко А.Н., Донская Т.В., Кравчинский В.А., Оганов А.Р., Писаревский С.А., Кузьмин М.И., Ярмолюк В.В. Геологическая эволюция земли: от космической пыли до обители человечества. - 2021.

5. Ефремов С.В., Горячев Н.А., Будяк А.Е., Блинов А.В. Генетические реконструкции по результатам площадных геохимических съемок при изучении рудно-магматических систем // В сборнике: Геодинамическая эволюция литосферы Центрально-Азиатского подвижного пояса от океана к континенту. Материалы научного совещания. Иркутск. - 2021. - С. 83-85.

6. Damdinov B.B., Mironov A.G., Damdinova L.B., Khubanov V.B., Posokhov V.F., Huang X.-W., Goryachev N.A., Zhmodik S.M., Reutsky V.N., Yudin D.S., Travin A.V. Intrusion-hosted gold deposits of the southeastern east Sayan (Northern central asian orogenic belt, Russia) // Ore Geology Reviews. - 2021. - Vol. 139. - P. 104541.
7. Вилор Н.В., Волкова М.Г., Будяк А.Е., Горячев Н.А., Павлова Л.А., Спиридов А.М., Брянский Н.В., Данилов Б.С. Сульфоарсенидное оруденение с золотом в зоне смятия на Восточно-Забайкальской ветви Монголо-Охотской Сутуры (месторождение Погромное, восточное Забайкалье, Россия) // Тихоокеанская геология. - 2021. - Т. 40. - № 4. - С. 33-50.
8. Ефремов С.В., Спиридов А.М., Горячев Н.А., Будяк А.Е. Эволюция Карийской рудно-магматической системы (восточное Забайкалье, Россия): опыт применения мелкомасштабной геохимической съемки // Геология рудных месторождений. - 2021. - Т. 63. - № 3. - С. 283-294.
9. Кузьмин М.И., Ярмолюк В.В., Горячев Н.А., Диценко А.Н. Эволюция земли: от зарождения до появления ноосферы // Природа. - 2021. - № 11. - № 1275. - С. 3-16.
10. Тарасова Ю.И., Будяк А.Е., Иванов А.В., Горячев Н.А., Игнатьев А.В., Веливецкая Т.А., Радомская Т.А., Блинов А.В., Бабяк В.Н. Типоморфизм, типохимизм и изотопно-геохимические характеристики сульфидов железа месторождения Голец Высочайший (восточная Сибирь) // Записки Российского минералогического общества. - 2021. - Т. 150. - № 1. - С. 63-75.
11. Blinov A.V., Budyak A.E., Tarasova Yu.I., Papkin I.V., Ilchenko V.O., Nikulina A.A. Comparative evaluation of geochemical methods of searches for secondary dispersion halos in complex landscape-geochemical conditions of Eastern Transbaikal // 17th Conference and Exhibition Engineering and Mining Geophysics. - 2021. – Т.17.
12. Tarasova Yu.I., Budyak A.A. Physical and chemical parameters of the ore-forming process of the Chertovo Koryto deposit // 17th Conference and Exhibition Engineering and Mining Geophysics. - 2021. – Т. 17.
13. Будяк А.Е., Блинов А.В., Байкин В.Д. Механизмы рудообразования месторождений золота в черносланцевых толщах на примере месторождения Красный (Бодайбинский район, Иркутская область) // Инженерная и рудная геофизика. - 2021. - С. 100.
14. Брюханова Н.Н., Бычинский В.А., Будяк А.Е. Особенности поведения золота при формировании золоторудной минерализации на примере месторождения Сухой Лог (Бодайбо) // Петрология и геодинамика геологических процессов. Материалы XIII

Всероссийского петрографического совещания (с участием зарубежных ученых). В 3-х томах. Иркутск. - 2021. - С. 82-84

15. Ефремов С.В., Горячев Н.А., Будяк А.Е., Блинов А.В. Генетические реконструкции по результатам площадных геохимических съемок при изучении рудно-магматических систем // Геодинамическая эволюция литосферы Центрально-Азиатского подвижного пояса от океана к континенту. Материалы научного совещания. Иркутск. - 2021. - С. 83-85.

Тезисы конференций

1. А.Е. Будяк, С.Ю. Скузоватов, Ю.И. Тарасова общая история формирования неопротерозойских отложений Бодайбинского и Олокитского рудных районов. XXIII всероссийская научная конференция «Геодинамическая эволюция литосферы Центрально-Азиатского подвижного пояса: от океана к континенту».

2. Горячев Н.А., Чан Тuan Ань, Соцкая О.Т., Васильева Т.И., Фам Нгок Кан, Ву Хоанг Ли, Чан Чонг Хoa, Нго Тхи Фыонг. О находке реликта палеогидротермальной системы в габброидах массива Йенчу (Центральный Вьетнам). // Минералогия и геохимия ландшафта горнорудных территорий. Рациональное природопользование. Современное минералообразование: тр. X Всерос. симпозиума с междунар. участием и XVII Всерос. чтений памяти акад. А.Е. Ферсмана [отв. ред. Г.А. Юргенсон]. – Чита, 2025. — С. 28-31.

3. Горячев Н.А., Чан Тuan Ань, Фам Нгок Кан, Неволько П.А., Ву Хоанг Ли, Светлицкая Т.А., Шелепаев Р.А., Чан Чонг Хoa, Изох А.Э., Чан Куок Конг, Нго Тхи Хыонг, Нго Тхи Фыонг, Нгуыен Тuan Ань, Дао Тхай Бак, Фам Тхи Фыонг Лиен, Ле Дук Люонг. О металлогении золота и сопутствующих металлов орогенного пояса Чуонг Шон и прилегающих структур (Вьетнам) // Сборник тезисов докладов XIV Международной научно-практической конференции «Геология, прогноз, поиски и оценка месторождений алмазов, благородных и цветных металлов» (Москва ФГБУ «ЦНИГРИ» 15-18.04. 2025 – М.:ЦНИГРИ, 2025, с. 92-94

4. Бахтина В.Н., Гребенникова А.А., Доброшевский К.Н., Горячев Н.А. Термобарогеохимические параметры формирования рудной минерализации Малиновского рудного узла (Южный Сихотэ-Алинь) // Владивосток, 2025-09-19

5. Голионко Б.Г., Бяков А.С., Горячев Н.А., Ведерников И.Л., Хасанов И.М. Необычные лежачие складки северного обрамления Балыгычанского блока Верхояно-Колымских мезозоид (Северо-Восток России) // Тезисы ГИН Тектоника

6. Соцкая О.Т., Соловьев В.Ю., Горячев Н.А. Минералы индикаторы происхождения руд Албазинского месторождения // Владивосток, 2025-09-19

7. Ю.И. Тарасова, Ю.Д. Щербаков. Бимодальный характер развития самородного золота Давенда-Ключевского рудно-rossыпного узла/ XXIII всероссийская научная конференция «Геодинамическая эволюция литосфера Центрально-Азиатского подвижного пояса: от океана к континенту».

1. Будяк А.Е., Тарасова Ю.И. Эволюция рудного минералообразования месторождений орогенного типа Бодайбинского региона В книге: Научно-методические основы прогноза, поисков, оценки месторождений алмазов, благородных и цветных металлов. Сборник тезисов докладов XIII Международной научно-практической конференции. Москва. - 2024. - С. 66-69.

2. Тарасова Ю.И., Будяк А.Е. Минеральные системы месторождения Холоднинское (первая и рыжая рудные зоны) В книге: Научно-методические основы прогноза, поисков, оценки месторождений алмазов, благородных и цветных металлов. Сборник тезисов докладов XIII Международной научно-практической конференции. Москва, 2024. С. 374-377.

3. Дамдинов Б.Б., Горячев Н.А., Дамдинова Л.Б. Особенности состава руд Третьяковского золото-флюоритового месторождения (Западное Забайкалье) // Сборник тезисов докладов XIII международной научно-практической конференции «Научно-методические основы прогноза, поисков, оценки месторождений алмазов, благородных и цветных металлов» Москва ЦНИГРИ 2024 10-12.04.2024 г. – М.: ЦНИГРИ, 2024, с. 103-106

4. Будяк А. Е., Тарасова Ю. И., Горячев Н. А., Чачанагова О. И., Лычагин М. А., Очиржапова С. М., Анохина А. Ю. Роль органического вещества в процессе рудообразования месторождений «Сухоложского» типа на примере месторождения Угахан (Бодайбинский район) // Материалы VI Международной научной конференции, посвященной 50-летию Геологического института им. Н. Л. Добрецова СО РАН. - 2023. - С. 99 – 102

5. Тарасова Ю.И., Будяк А.Е., Горячев Н.А., Будяк А.А., Жарикова А.А., Черкашина Д.А. Минералогический состав рудной зоны месторождения Угахан (Бодайбинский район) // Материалы VI Международной научной конференции, посвященной 50-летию Геологического института им. Н. Л. Добрецова СО РАН. - 2023. - С. 510 – 513

6. Будяк А.Е., Тарасова Ю.И. Стадийность формирования месторождений орогенного типа северного Прибайкалья (на примере месторождения Ыкан) // Геодинамическая эволюция литосферы Центрально-Азиатского подвижного пояса (от океана к континенту) 2023. – В. 21. - С. 21–23

7. Ефремов С.В., Горячев А.Н., Будяк А.Е., Скузоватов С.Ю., Блинов А.В. Использование цифровых моделей геологического строения для выделения палеовулканических структур, контролирующих порфировые рудные объекты // Геодинамическая эволюция литосферы Центрально-Азиатского подвижного пояса (от океана к континенту) 2023. – В. 21. - С. 100–102

8. Бадмацыренова Р.А. Геохимические особенности магнетита и ильменита Кручининского месторождения, Восточное Забайкалье, Россия // Ультрамафит-мафитовые комплексы: геология, строение, рудный потенциал: Материалы VIII Всеросс. конф. с междунар. участием. Новосибирск / Ин-т геол. и минералогии им. В. С. Соболева СО РАН – Новосибирск: ИПЦ НГУ. - 2023. - С. 14-16

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Исполнители проекта

Горячев Н.А.	гнс, д.г.-м.н	Пройдакова О.А.	Гл. спец.
Тарасова Ю.И.	снс, к.г.-м.н	Куликова З.И.	Вед.инж.
Будяк А.Е.	снс, к.г.-м.н	Яхин А.М.	Инж.
Кондратьев В.В.	снс, к.т.н	Петровский А.А.	Инж.
Брюханова Н.Н.	нс, к.х.н	Блинов А.В.	Инж.
Просекин С.Н.	нс, к.г.-м.н	Бутура С.Н.	Ст. лаб.
Паршин А.В.	снс, к.г.-м.н		
		Баранова С.А.	Инж.-иссл.
		Дьячков А.А.	Инж.-иссл.