

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. № НИОКТР АААА-А17-117041910033-8

УТВЕРЖДАЮ

Директор ИГХ СО РАН

д.г.-м.н. _____ А.Б. Перепелов

« » _____ 2021 г.

ОТЧЕТ
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

Типы металлогенических провинций цветных и благородных металлов в процессе изменения стиля тектонических движений в геологической истории Земли. Геохимия и условия формирования благороднометалльных рудно-магматических систем Центрально-Азиатского складчатого пояса

(заключительный)

№ 0350-2019-0010

Приоритетное направление IX.130. Рудообразующие процессы, их эволюция в истории Земли, металлогенические эпохи и провинции, и их связь с развитием литосферы. Условия образования и закономерности размещения полезных ископаемых

Программа IX.130.3. Формирование и эволюция рудно-магматических систем различных геодинамических обстановок

Проект IX.130.3.1. «Типы металлогенических провинций цветных и благородных металлов в процессе изменения стиля тектонических движений в геологической истории Земли. Геохимия и условия формирования благороднометалльных рудно-магматических систем Центрально-Азиатского складчатого пояса» № 0350-2019-0010

Руководитель проекта
Заместитель директора

_____ к.г.-м.н. А.Е. Будяк
подпись, дата

Иркутск, 2020

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Научный руководитель темы, кандидат геолого-минералогических наук	_____	А.Е. Будяк (разделы 1, 1.1, 2.1, 3.1, 4.3)
	подпись, дата	
Ответственные исполнители темы:		
член-корреспондент РАН	_____	Н.А. Горячев (разделы 1.2, 1.4, 3.3, 4.6)
	подпись, дата	
доктор геолого-минералогических наук	_____	Кравцова Р.Г. (разделы 1.3, 2.2, 3.4, 3.5)
	подпись, дата	
доктор геолого-минералогических наук	_____	Шабанова Е.В. (раздел 3.6)
	подпись, дата	
доктор геолого-минералогических наук	_____	С.В. Ефремов (раздел 4.4)
	подпись, дата	
кандидат геолого-минералогических наук	_____	Носков Д.А. (раздел 4.5)
	подпись, дата	
кандидат геолого-минералогических наук	_____	А.В. Паршин (раздел 1.2, 1.4, 3.3, 4.6)
	подпись, дата	
нормоконтроль	_____	Т.Ю. Гармышева
	подпись, дата	

РЕФЕРАТ

Отчет включает 100 стр., 21 илл., 2 табл., 112 ист., 1 прил.

ГЕОХИМИЯ, МИНЕРАЛОГИЯ, СТРУКТУРА МИНЕРАЛОВ, СТРУКТУРА РУДНЫХ ПОЛЕЙ, БЛАГОРОДНЫЕ МЕТАЛЛЫ, ЗОЛОТОРУДНОЕ МЕСТОРОЖДЕНИЕ, МЕТАСОМАТИТЫ, РУДЫ, ГЕНЕЗИС МЕСТОРОЖДЕНИЯ

За прошедший год по основным направлениям работ по теме лаборатории получены новые результаты, в разной степени освещенные в публикациях сотрудников лаборатории. Они содержат новые оригинальные данные и результаты обобщений по хронологии развития процессов магматизма и рудообразования в пределах основных золоторудных провинций Сибири (Байкало-Патом, Забайкалье), Дальнего Востока (Яно-Колымский пояс) и Монголии, с рассмотрением металлогенической специфики Монголо-Охотского складчатого пояса на примере ряда его районов. Одним из аспектов результатов текущих работ было проведение оценки условий формирования золотого оруденения сухоложского типа с выходом на генетические особенности и продуктивность минерализации, а также рассмотрение специфики эволюции минерального состава золотого оруденения на примере Средне-Голготайского месторождения и Карийского рудного узла Забайкалья и Их-Салинского месторождения Монголии. Была также проведена комплексная обработка и интерпретация данных, полученных разными геохимическими и геофизическими методами с помощью беспилотного летательного аппарата (БПЛА). Даны критерии прогноза рудной золотоносности в Юго-Западном Прибайкалье.

СОДЕРЖАНИЕ

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ	2
РЕФЕРАТ.....	3
ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ И ОБОЗНАЧЕНИЙ	6
ВВЕДЕНИЕ	8
1 РЕЗУЛЬТАТЫ, ПОЛУЧЕННЫЕ В 2017 Г.....	9
1.1 Эволюция минерального состава орогенных золоторудных месторождений в истории Земли.....	9
1.2 Крупномасштабные магнитометрические геофизические исследования различных типов золоторудных месторождений Байкало-Патомского нагорья с помощью беспилотного летательного аппарата (БПЛА)	12
1.3 Минеральный и геохимический состав руд на месторождениях золота и серебра, относящихся к разным рудным формациям ОЧВП: Au-Ag месторождения Дальнее и Кварцевая Сопка, Ag месторождение Дукат, Ag-Pb месторождения Гольцовое и Мечта.....	15
1.4 Разработка универсального геоинформационного подхода к оценке перспектив площади исследований и выделению наиболее перспективных участков, применимого для различных видов полезных ископаемых.	20
1.5 Основные результаты проведенного исследования.....	22
2 РЕЗУЛЬТАТЫ, ПОЛУЧЕННЫЕ В 2018 г.	23
2.1 Анализ возраста платинометалльного оруденения и соответствующих типов месторождений элементов платиновой группы в процессе изменения стилей тектонических движений	23
2.2 Геохимия и условия образования месторождений благородных металлов, в том числе крупных и уникальных, в складчатых структурах Северо-Востока России, критерии их поисков и оценки	25
2.3 Вклад ювенильного вещества и их роль в формировании крупных и уникальных месторождений золота, связанных с черносланцевыми горизонтами.	29
3 РЕЗУЛЬТАТЫ, ПОЛУЧЕННЫЕ В 2019 г.	32
- определены возрастные рамки формирования редкометалльного оруденения и соответствующих типов месторождений редких металлов в процессе изменения стиля тектонических движений в истории Земли.....	32
3.1 Возраст редкометалльного оруденения и соответствующих типов месторождений редких металлов в процессе изменения стиля тектонических движений в истории Земли.	33
3.2 Золоторудные месторождения Бодайбинского района.....	37
3.3 Оптимизация методики поисков месторождений золота приуроченных к черносланцевым толщам Бодайбинского района с учетом выявленных геолого-структурных, позиций поисковых критериев, с применением созданных беспилотных аэрогеофизических технологий.....	43

3.4 Рудно-магматические системы Забайкальского сектора Монголо-Охотского орогенного пояса.....	47
3.5 Золоторудные месторождения Северо-Востока России.....	53
3.6 Новые разработки в области микро-минералогии благородных металлов с использованием сцинтилляционной дуговой атомно-эмиссионной спектрометрии.....	56
3.7 Основные результаты проведённого в 2019 г. исследования	58
4 РЕЗУЛЬТАТЫ, ПОЛУЧЕННЫЕ В 2020 Г.....	60
4.1 Механизмы рудообразования и модель формирования месторождений Сухоложского типа (Бодайбинский район)	60
4.2. Модель формирования и критерии поисков золоторудных объектов, приуроченных к палеопротерозойским черносланцевым толщам Нечерского поднятия (Иркутская область).....	64
4.3. Рудная минерализация в плейстоценовых отложениях пролива Лонга (Восточно-Сибирское море)	68
4.4 Эволюция процессов минералообразования (Восточное Забайкалье).....	70
4.5 Геохимические особенности цирконов Ангаро-Витимского супербатолита и Яно-Колымского орогенного пояса	73
4.6 Формирование полного комплекса геофизических методов на базе низковысотных БПЛА.....	75
4.7 Основные результаты проведённого в 2020 г. исследования	77
5 ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ПРОВЕДЁННЫХ В 2017-2020 ГГ. ИССЛЕДОВАНИЙ.....	79
6 ЗАКЛЮЧЕНИЕ	81
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	82
ПРИЛОЖЕНИЕ А.....	93
Перечень публикаций по тематике проекта в 2020-2018 г.г.	93

ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ И ОБОЗНАЧЕНИЙ

В настоящем отчете о НИР применяют следующие сокращения и обозначения:

АОК – обстановка активных окраин континента

БЛПР – бриолитогеохимические потоки рассеяния

БПЛА – беспилотный летательный аппарат

БПП – Байкало-Патомская провинция

ВП – внутриплитные обстановки.

ГРР – геолого-разведочные работы

ГСП – обстановка границ скольжения плит

ЗТН - зона тектонических нарушений

КО – коллизионная обстановка

ЛПР – литогеохимические потоки рассеяния

ЛЗР – Ленский золоторудный район Бодайбинского синклинория

ЛЗП – Ленская золотоносная провинция

ОД – обстановка островных дуг

ОПР – Олоkitский полиметаллический (Ba-Pb-Zn) район

ОЧВП – Охотско-Чукотский вулканогенный пояс

ПО – программное обеспечение

РЗЭ – редкоземельные элементы

РМС –рудно-магматическая система

РСМА – рентгеноспектрального микроанализа

САЭС сцинтилляционная дуговая атомно-эмиссионная спектрометрия

СВАДМ – статистическая выборка аналитических данных для микрокристаллов

СО – субдукционная обстановка

СПКА – спектральный полуколичественный анализ

СЭМ-ЭДС – сканирующей электронной микроскопии с энергодисперсионной спектрометрией

ФН – формы нахождения

ФЭУ – фотоэлектронный умножитель

ЦМР – цифровая модель рельефа

BSE – изображение в обратно-рассеянных электронах

HREE – heavy-group rare earth element

LID–тектоника – тектоника покрывки

LREE – light-group rare earth element

LSA – низкокремнистые адакиты

МА – метасоматизирующий агент

МС-ICP-MS – метод многоколлекторной масс-спектрометрии с ионизацией
вещества в индуктивно связанной плазме

ММ – метасоматизированная мантия

NEB – высокониобиевые базальты

PAAS – post-Archean Australian shale

REE – редкоземельные элементы

ВВЕДЕНИЕ

Целями проекта является выявление условий изменения металлогении в геологической истории Земли, изучение геологических и минералого-геохимических процессов рудообразования месторождений различных формационных типов в благороднометалльных рудно-магматических системах (РМС), сформированных в определенных геодинамических обстановках Забайкалья, Прибайкалья, Монголии, Северо-Востока России, вещественного состава руд, метасоматитов, источников рудного вещества, состава металлоносных флюидов, геохимических критериев поисков и оценки рудных месторождений.

За отчетный период (2017-2020 гг.) работы проходили на территории двух основных и традиционных регионов работ лаборатории – Байкало-Патомском и Монголо-Забайкальском с привлечением отдельных материалов из других районов Сибири и Востока России. Основной акцент исследований был сделан на комплексном геологическом, минералого-геохимическом и геофизическом исследовании золоторудных объектов и потенциальных площадей с отработкой методов получения новых данных по генезису рудной минерализации и связях ее с процессами осадконакопления, метаморфизма и магматизма.

Для проведения и обработки результатов геофизических исследований разработана и апробирована методика низковысотной съемки с мультикоптеров и разработан метод геоинформационного подхода к оценке перспектив площади исследований и выделению наиболее перспективных.

Важным аспектом работ было вовлечение студентов ИРНИТУ в исследования в рамках проекта и дополнительных прикладных работ.

1 РЕЗУЛЬТАТЫ, ПОЛУЧЕННЫЕ В 2017 Г.

В 2017 решены следующие задачи:

- проведено изучение эволюция минерального состава орогенных золоторудных месторождений в истории Земли;
- с использованием новейших аналитических методов исследования получены новые результаты о минеральном составе и геохимических особенностях руд Au-Ag месторождений Кварцевая Сопка и Роговик, расположенных в Охотско-Чукотского вулканического пояса;
- разработана и апробирована методика низковысотной съемки с мультикоптеров;
- разработан метод геоинформационного подхода к оценке перспектив площади исследований и выделению наиболее перспективных.

Имеющийся научный задел и оригинальность ряда используемых методов позволяет надеяться на получение новых данных об источниках металлоносных флюидов и о процессах концентрирования Au и Ag.

1.1 Эволюция минерального состава орогенных золоторудных месторождений в истории Земли.

В распределении промышленных месторождений золота во времени наблюдается определенная дискретность: 3.3-3.1; 2.8-2.5; 2.1-1.8; 0.8-0.55; 0.45-0.40; 0.33-0.25, 0.18-0.12 и 0.10-0.0 млрд лет. Эти эпохи золотой минерализации коррелируют с суперконтинентальными циклами и главными орогенными событиями в их составе. Основная масса Au образовалась в архейское и раннепротерозойское время, в соответствии с рисунком 1. В это время золото четко демонстрирует свои мантийные связи в орогенной металлогении, которые, прежде всего, выражаются в ассоциации месторождений Au с месторождениями Ni, Cu, Pt, Fe. В мезо- и неопротерозое к ним добавляется ассоциация с урановыми месторождениями и черными сланцами, а в фанерозое – месторождения Mo, Cu, W, Ag, Sb, Hg и даже Sn (Тихоокеанское рудное кольцо, Центрально-Азиатский орогенный пояс). Это коррелирует с общим ростом коры в истории Земли и демонстрирует увеличение во времени доли коровых связей в металлогении Au.

Начиная с неопротерозоя, в металлогении Au проявляется двойственность, обусловленная разделением золоторудных ареалов тектонических зон существенно фемического (островодужного, аккреционного) и сиалического (коллизийного) профиля. Ассоциация орогенных месторождений Au с колчеданными или Cu-Ni

месторождениями сохраняется только для фемических металлогенических провинций (Урал, Саяны и др.), что подчеркивает важную роль мантии в металлогении Au. Его минерализация в сиалических складчатых поясах (на деформированных пассивных окраинах континентов) часто ассоциирует с черными сланцами, играющими важную роль при ее формировании в поздний орогенный этап [1, 2]. С этого времени месторождения Au в сиалических и фем-сиалических поясах разделяются на собственно орогенные (золото-кварцевые, золото-сульфидные прожилково-вкрапленные) и связанные с гранитоидами (золото-редкометалльные, золото-висмутовые) месторождения.

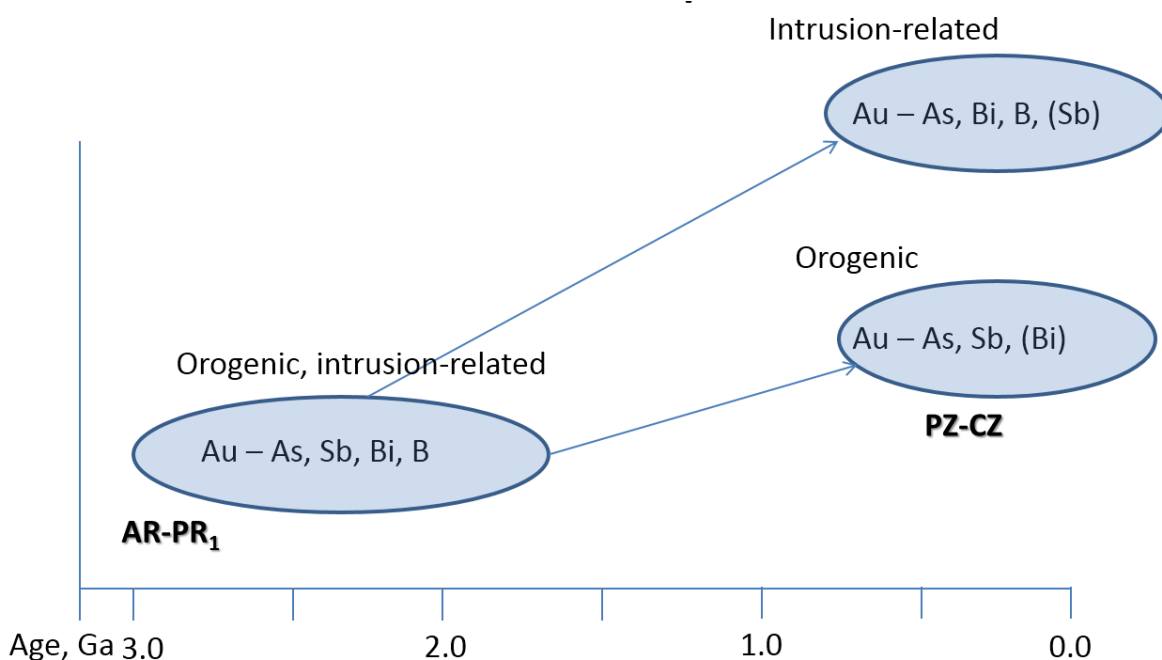


Рисунок 1 – Эволюция минерального состава орогенных руд Au во времени

Такая эволюция является результатом дифференциации минерального состава орогенных золоторудных месторождений во времени. Так, турмалин в архейских и раннепротерозойских орогенных месторождениях является обычным минералом руд, равно как и минералы всей Au-сопровождающей триады полуметаллов (As, Sb, Bi) и аналогов серы (Te, Se). В фанерозойских золотых месторождениях турмалин, становится нетипичным для орогенных руд и обычным только для месторождений, связанных с гранитоидами. Минерализация, сопутствующая золоту в фанерозойских месторождениях (особенно для позднего мезозоя и кайнозоя), отчетливо разделяется на As-Sb-Ag-Se минерализацию (арсенопирит, сульфосоли, блеклые руды, антимонит) в орогенных и

эпитермальных рудах и As-Bi-Te минерализацию (леллингит, арсенопирит, сульфосоли Bi, теллуриды и сульфотеллуриды Bi) в интрузион-релейтед рудах, связанных с гранитоидным магматизмом субдукционных и коллизионных обстановок. Наиболее контрастно это наблюдается по северному обрамлению Пацифика. Вклад корового компонента в фанерозое отчетливо фиксируется в изотопно-геохимических параметрах сопутствующих золоту минералов [3].

В этом ряду есть исключение, орогенные месторождения золота Забайкальского сектора Монголо-Охотского орогенного пояса, которым присуща специфическая минералогия, во многом, перекликающаяся с минералогией орогенных руд золота месторождений докембрия. В их составе широко присутствует турмалин и минералы всей триады полуметаллов (As-Sb-Bi). Спецификой этих месторождений является то, что они ассоциируют с латитовым магматизмом и возникли в период активных левосдвиговых деформаций, при вращении Сибирского континента по часовой стрелке. Т.е. они формировались в палеогеодинамическом режиме трансформной континентальной окраины [4], когда вещество мантии проникало в верхние горизонты коры, что и нашло отражение в минеральном составе их руд и в изотопных параметрах их минералов.

Таким образом, металлогенезис золота в истории Земли предполагает его первично глубинную (мантийную – фемическую) природу, но в истории Земли постепенно проявились его коровые свойства, зафиксированные в увеличении разнообразия типов и металлогенических ассоциаций месторождений золота в складчатых поясах фанерозоя. Минеральный состав руд орогенных месторождений Au отражает вклад коровых и мантийных источников в процессы их формирования.

1.2 Крупномасштабные магнитометрические геофизические исследования различных типов золоторудных месторождений Байкало-Патомского нагорья с помощью беспилотного летательного аппарата (БПЛА)

Одним из наиболее эффективных способов решения структурно-картировочных задач является геофизическая разведка методом магнитной съемки – магниторазведка. Традиционными вариантами магниторазведки являются пешеходная и аэромагнитная варианты съемки. Рассматриваемые площади, относящиеся к одному из основных перспективных на золото районов Российской Федерации, характеризуются сложными природно-ландшафтными условиями – курумы, заболоченность, заросли стланника, значительные уклоны рельефа, что затрудняет, замедляет и удорожает пешеходную съемку.

Выполнение классической пилотируемой магниторазведки здесь затруднено из-за отсутствия поблизости аэропортов, в связи с типичным для ряда площадей сильно пересеченным рельефом, а также в принципе нерационально при выполнении работ на отдельных лицензионных участках, площадь которых обычно не превышает 100 квадратных километров. Таким образом, техническое совершенствование классических способов выполнения магнитной съемки не позволяет решить принципиальную проблему повышения эффективности геологического изучения перспективных на золото районов Восточной Сибири (в частности) в современных условиях.

В рамках настоящей темы проводились апробации разработанного ранее роботизированного беспилотного комплекса SibGIS UAS [5-12] в типичных для Восточной Сибири геологических и природно-ландшафтных условиях. Комплекс представляет собой набор специализированных мультироторных БПЛА с различными сенсорами и ПО для формирования полетных заданий и обработки данных. В составе комплекса имеется магниторазведочная и гамма-спектрометрическая технология на базе тяжелых 6-и или 8-и винтовых коптеров 1000-го класса, в соответствии с рисунком 2.



Рисунок 2 – Магниторазведочный (а) и гамма-спектрометрический (б) варианты комплекса SibGIS UAS

Картина поля также подтверждает высокую сходимость наземной и пешеходной съемки даже без пересчета поля по высоте и позволяет утверждать, что наземная и низковысотная беспилотная съемка в реальных условиях фиксируют одни и те же объекты. В целом можно отметить, что за счет постоянной скорости движения и меньших воздействий на датчик, в сложных природных условиях беспилотная технология обеспечивает высокое качество данных, часто превосходящее результаты наземных измерений. Данное утверждение справедливо при условии, что наземная съемка выполняется без предварительных топогеодезических работ и рубки профилей, как это обычно и происходит в современной геологоразведочной практике.

Результаты БПЛА-магнитометрической съемки на эталонном объекте в сопоставлении с наземной и традиционной аэромагнитной съемками приведены на рисунке 3. Полученные данные, по мнению авторов, качественно превосходят результаты

наземных работ, в которых проявляется комплекс негативных эффектов, обусловленных сложными природно-ландшафтными условиями. В связи с применением высокоточного абсолютного протонного магнитометрического канала в комплексе SibGIS UAS отсутствует профильность и многие другие негативные эффекты, устранение которых требует математической обработки данных. Результаты комплексной съемки на БПЛА пригодны для качественного анализа *in situ* после учета вариаций. В то же время значимого прироста детальности данных наземной съемки по сравнению с беспилотной не отмечается. Несмотря на высокую сходимость результатов беспилотной и вертолетной съемок, детальность данных с БПЛА существенно выше. Так, на карте магнитного поля, построенной по данным беспилотной съемки, линейные зоны запад-северо-западного и субмеридионального простираний проявляются более контрастно и детально, чем на картах предыдущих исследований. В данном случае эти зоны отвечают многочисленным дайкам габбро-доллеритов, которые в северо-восточной части площади съемки перекрываются верхнерифейскими отложениями осадочного чехла.

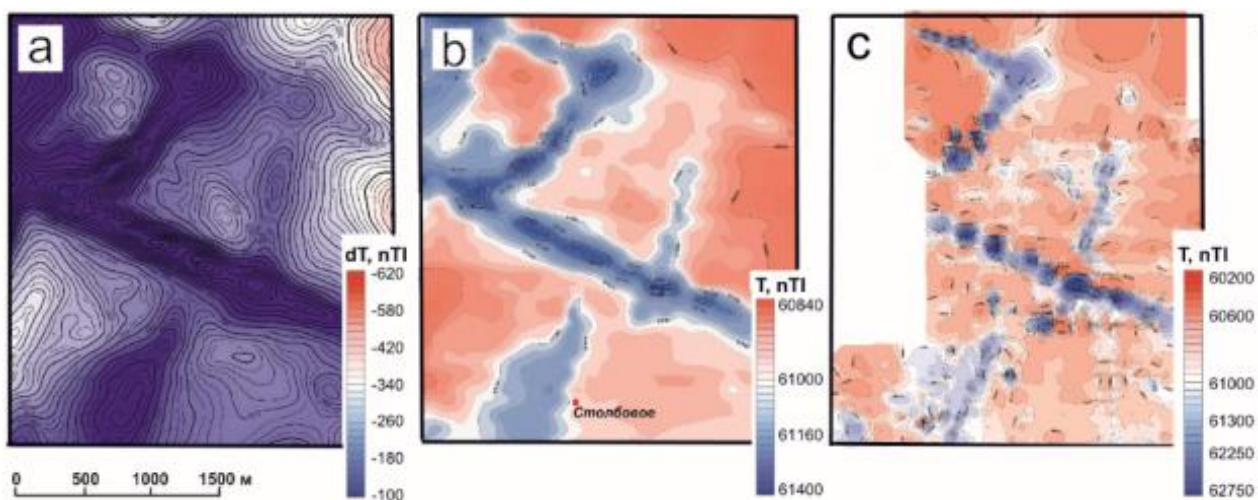


Рисунок 3 – Результаты магнитной съемки в вертолетном (А), беспилотном (Б) и пешеходном (С) вариантах

Разработанный комплекс можно рассматривать как технологию, позволяющую в значительной степени заместить традиционную наземную съемку при выполнении магниторазведочных работ масштабов 1:10000 – 1:1000 на сложнопроходимых территориях, в том числе со сложным рельефом и в зимнее время.

1.3 Минеральный и геохимический состав руд на месторождениях золота и серебра, относящихся к разным рудным формациям ОЧВП: Au-Ag месторождения Дальнее и Кварцевая Сопка, Ag месторождение Дукат, Ag-Pb месторождения Гольцовое и Мечта

Проведено детальное изучение геохимического и минерального состав руд на золото-серебряных (Au-Ag) месторождениях Охотско-Чукотского вулканогенного пояса (ОЧВП). Основные объекты исследования, по которым были получены наиболее значимые научные результаты – это эпитермальные Au-Ag месторождения Кварцевая Сопка (Эвенский рудный район) и Роговик (Омсукчанский рудный район).

Методами электронной спектроскопии поверхности (РФЭС, ЭОС), рентгеноспектрального микроанализа (РСМА) и сканирующей электронной микроскопии с энергодисперсионной спектрометрией (СЭМ-ЭДС) впервые изучены особенности состава поверхностных слоев самородного золота на Au-Ag месторождении Кварцевая Сопка [14].

Установлено, что типичное для этого типа руд самородное золото постоянно содержит довольно много серебра, преобладает электрум пробностью от 670 ‰ до 700 ‰. Реже встречается кюстелит. Из примесей постоянно присутствует (мас. %): S (0.08-0.54), Te (0.12-0.17), с глубиной появляется Bi (0.50-1.46) и Cu (0.05-0.31 %), реже As (0.06-0.22), Se (0.67-0.75), Fe (0.10-0.54), Pb (0.10-0.41), Zn (0.16-0.25).

Поиск сульфидов Ag и Au в образцах Ag-Au месторождения Кварцевая Сопка методами РСМА и СЭМ-ЭДС показал двойственный результат. В краевых частях зерен нередко наблюдались участки, сильно обогащенные серебром. Например, в обр. Р-5706 в каемке зерна толщиной ~10-20 мкм точка 1, в соответствии с рисунком 4, содержания Ag и S составляют ~64 и ~13 мас.% соответственно, тогда как в объеме частицы (точка 2) преобладает Au (66 мас.%), а содержание серы составляет около 1 мас.%. Состав точки 1 можно выразить формулой:



В ней имеется избыток отрицательного заряда, что, возможно, связано с окислением части S до сульфата или сульфита. Если весь кислород связан в сульфит-ионе, то атомное отношение Me/(S+Se) в сульфидной части составит 1.95, т.е. будет близким к стехиометрии Ag₂S.

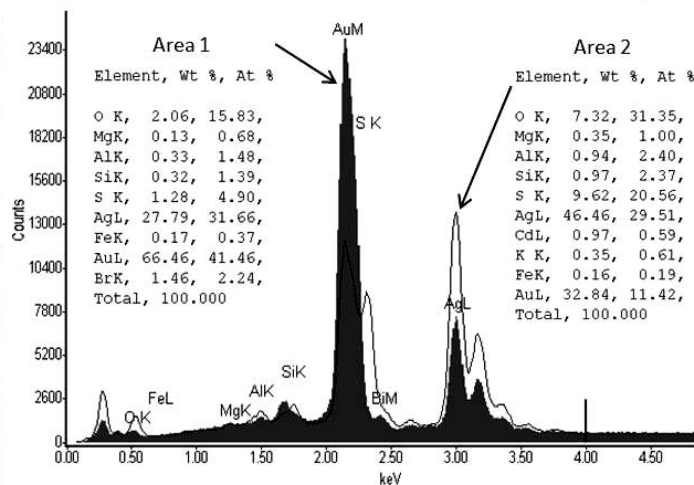
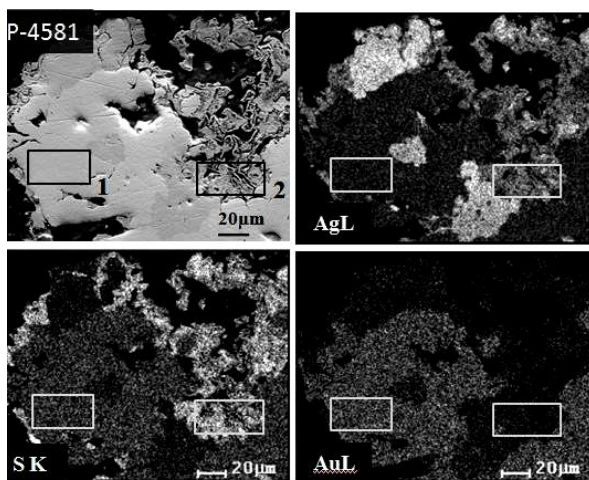
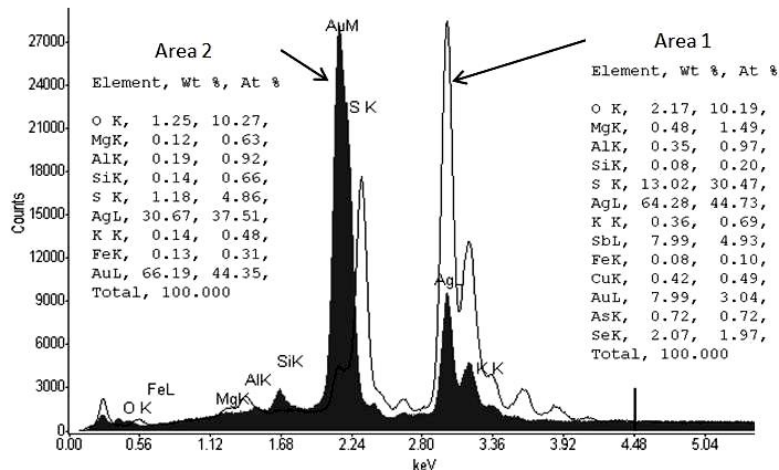
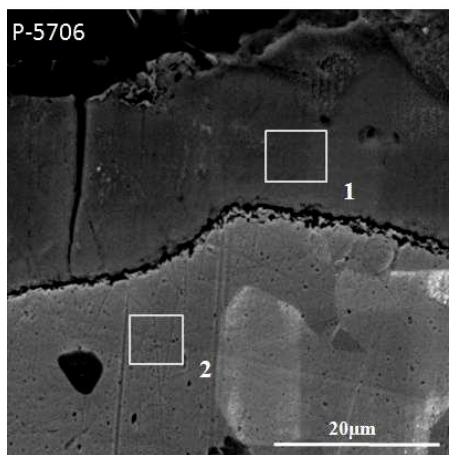


Рисунок 4 – Строение зерен самородного золота в образцах из месторождения Кварцевая Сопка с повышенными содержаниями серы. Изображения во вторичных электронах, в рентгеновских лучах элементов, рентгеновские энергетические спектры элементов, составы выделенных участков.

Полученные данные показывают, что поверхность самородного Au эпитеpмального месторождения имеет сложное строение: тонкий обогащенный Ag и S слой сменяется слоем толщиной ~30-60 нм, содержащим SiO₂ и, возможно, играющим роль защитного покрытия для AgAu-сульфидов. Ранее покрытия толщиной менее 0.5 мкм с высокими содержаниями Si и O были обнаружены методом ЭОС на поверхности кристаллов золотоносного пирита из метасоматитов эпитеpмального Au-Ag месторождения Дальнее [15].

В результате настоящего исследования выяснено, что низкопробное золото эпитеpмального Au-Ag месторождения в половине случаев содержит окисленное золото со степенью окисления Au(I) или выше. На поверхности такого самородного Au присутствует тонкий слой (~15 нм) с повышенными содержаниями Ag и S, под которым находится обогащенный SiO₂ слой толщиной ~30-60 нм. Такое многослойное покрытие

может нести защитную функцию, обеспечивая сохранность сульфидов Ag и Au в поверхностных частях зерен AuAg в окислительных условиях. Богатые S краевые участки частиц самородного золота далеко не всегда отвечают стехиометрии известных двойных сульфидов Ag и Au, а имеют переменный состав, что говорит о существовании твердых растворов $Ag_{2-x}Au_xS$. Нестехиометрические тройные фазы с дефицитом серы могли образоваться путем агрегации кластеров типа Ag_nAu_mS и последующей самосборкой наночастиц в поликристаллические структуры с развитыми дислокационными межблочными границами, насыщенными серой и, возможно, другими элементами, стабилизовавшими исходные кластеры (Se, Sb). Химическая и фазовая зональность состава поверхностного слоя самородного золота представляет собой довольно распространённое в природе явление и свойственна не только рудному, но и россыпному золоту. Она может быть использована для установления принадлежности золота к определенной геохимической обстановке и типу оруденения, а также учитываться при разработке технологии извлечения золота из руд месторождений разных генетических типов.

Получены новые данные по составу самородного серебра Au-Ag месторождения Роговик (Омсукчанский прогиб, Северо-Восток России). Впервые в Au-Ag рудах установлены амальгамы серебра. Самородное серебро было изучено во всех трех типах руд, выявленных на месторождении Роговик: золото-серебряном (Au-Ag), серебро-полиметаллическом (Ag-Pb) и золото-серебро-полиметаллическом (Au-Ag-Pb) [16-18].

Самородное серебро в собственно Au-Ag рудах встречается редко. Преобладает его золотосодержащая разновидность – кюстелит. Чаще всего самородное серебро образует тонкодисперсные включения в кварце, заполняя микротрещинки и интерстиции, реже отмечается в ассоциации с кюстелитом, сульфосолями и селенидами серебра. Размер зерен, не превышает 10 мкм. Преобладают округлые формы, часто зональной структуры. Примесь Hg присутствует во всех изученных нами зернах, от 0.53 мас.% до 1.70 мас.%. Из других примесей установлены Au, Sb и Se. Содержания этих элементов не превышают 2 мас.%, в соответствии с рисунком 5.

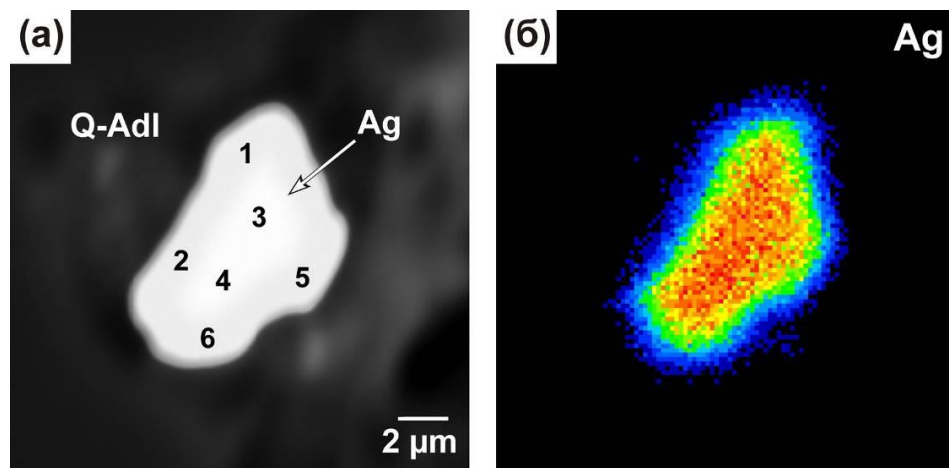


Рисунок 5 – Интерстициальное выделение самородного серебра (Ag) размером 6х10 мкм в кварц-адуляровом (Q-Adl) прожилке. Изображения: а – в обратно рассеянных электронах, б – в рентгеновских лучах. 1-6 на фото – точки определения содержаний элементов.

Самородное серебро в Ag-Pb рудах встречается в ассоциации с сульфосолями серебра и науманнитом, реже находится в виде сростаний с Se-акантитом, еще реже с фрейбергитом. Образует микро- и тонкодисперсные включения в кварце и пирите, в соответствии с рисунком 6. Преобладает ксеноморфная форма зерен размером не более 30 мкм, сохраняются элементы зональности. По сравнению с самородным серебром Au-Ag руд, концентрации Hg возрастают до 12.62 мас.%. Из других примесей отмечаются Sb, Se, Cu и Fe.

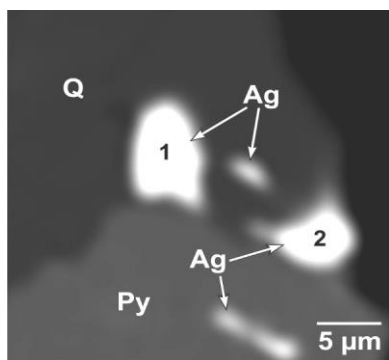


Рисунок 6 – Тонкодисперсное самородное серебро (Ag) в ассоциации с кварцем (Q) и пиритом (Py). Изображение дано в обратно-рассеянных электронах. 1, 2 на фото – точки определения содержаний элементов.

Самородное серебро в комплексных Au-Ag-Pb рудах образует сростания с сульфосолями серебра, науманнитом, акантитом, аргиродитом, часто замещает их на отдельных участках, выполняет каемки вокруг этих минералов. Преобладает серебро с размером частиц до 50 мкм и более. Также характерны зональные структуры, осложненные разными неоднородностями. Состав примесей и уровень их концентраций неустойчив и является отражением их более сложного и неустойчивого вещественного состава.

Ранее в составе руд месторождения были установлены киноварь, имитерит,

ртутьсодержащие кюстелит, электрум и золото [17]. Выявленное нами присутствие и высокие содержания Hg в самородном серебре месторождения Роговик, вплоть до образования амальгам, не типично не только для Au-Ag руд Омсукчанского прогиба, но и для ОЧВП в целом. Все это можно объяснить приуроченностью месторождения к участку сочленения крупных разломов, один из которых контролирует позднемеловой-палеогеновый Догдо-Эрикитский ртутоносный пояс [19, 20], юго-восточный фланг которого и фиксирует выявленная ртутная минералого-геохимическая специфика месторождения Роговик.

Типохимизм самородного серебра на Au-Ag месторождении Роговик проявлен достаточно отчетливо и хорошо отражает различия в геохимической специфике руд. Химический состав самородного серебра является устойчивым индикатором, характеризующим тип рудной минерализации. Специфика самородного серебра отражена в количестве примесей и уровне их концентрирования. На раннем Au-Ag этапе образуется самородное серебро с простым химическим составом и низким уровнем концентрации элементов-примесей – Au, Hg, Sb, Se, S. Самородное серебро более позднего этапа, на котором сформировались Ag-Pb и Au-Ag-Pb руды, характеризуется сложным, неустойчивым химическим составом и более высокими содержаниями элементов примесей – Hg, Sb, Se, S, Cu, Te, Zn и Fe, а в Au-Ag-Pb появляются еще Au и Pb.

В практическом отношении полученные результаты могут быть использованы при определении общего направления поисковых и разведочных работ на объектах подобного типа. Если придерживаться точки зрения, что находки амальгам серебра являются поисковым критерием, указывающим на возможность выявления богатых серебром руд на территории, где они были обнаружены, то можно говорить о положительной оценке Роговиковской площади на предмет обнаружения новых рудных месторождений, и не только золото-серебряных.

1.4 Разработка универсального геоинформационного подхода к оценке перспектив площади исследований и выделению наиболее перспективных участков, применимого для различных видов полезных ископаемых.

На поисково-оценочных этапах ГРП в этом случае повышаются требования к результативности «легких» геохимических и геофизических методов. Современное геофизическое оборудование позволяет фиксировать большой набор параметров среды. Быстро развивающееся направление дистанционного зондирования Земли, в том числе беспилотные технологии, также позволяют получать большой набор геофизических, мультиспектральных, морфоструктурных показателей.

Вне зависимости от программного обеспечения, применяемого при обработке данных конкретного метода, для итоговой систематизации и анализа данных используются геоинформационные технологии, которые обеспечивают возможность согласованного представления и визуального анализа всех имеющихся признаков в картографическом виде.

Предметом настоящего исследования является универсальная и экспрессная методика обработки разнородной геолого-геохимической и геофизической информации, которая позволяет быстро вычислить компактный набор информативных слоев признаков, обеспечивающих эффективную навигацию последующих детальных исследований.

В обобщенном виде методика включает следующие позиции:

1. Векторизация геологических и топографических карт (или иной способ получения цифровых данных о рельефе местности). В первую очередь необходимы слои структурно-вещественных комплексов, структурно-тектонических нарушений, гидросети, рельефа.

2. Уточнение геологических позиций с применением геофизических данных, в том числе возможный расчет дополнительных производных от первичной информации, выполнение послонной инверсии и другие виды обработки, позволяющие получить потенциально значимую информацию

3. Расчет коэффициентов контрастности для химико-аналитических данных.

4. Расчет дополнительных потенциально значимых характеристик – морфоструктурных параметров территории, производных от геологических карт, таких, как близость расчетных точек к структурно-тектоническим нарушениям или их попадание в зоны распространения определенных структурно-вещественных комплексов и др.

5. Приведение всех данных к одной регулярной сети. Нормирование, шкалирование, классификация всех признаков в соответствии с их положительной или отрицательной ролью в контексте решаемой геологической задачи.

6. Математический анализ всего набора данных с целью выделения показателей, связанных с искомой величиной. Для этого желательно иметь эталоны, при отсутствии таковых, положительные факторы определяются по результату расчета, картирования и интерпретации полей распределения главных компонент (каждая компонента картируется и анализируется с учетом не только вклада в нее факторов, но и с позиций ее пространственных особенностей). Применяется метод главных компонент в робастном варианте, позволяющий получать более устойчивые к случайным выбросам оценки.

7. В случае наличия эталонов и успешного получения ассоциации признаков, связанных с интересующими геологическими характеристиками, такие ассоциации картируются как один или несколько интегральных показателей, причем высокое значение каждого показателя указывает на высокую перспективность расчетной области с позиций решаемой задачи.

8. Возможен вариант, когда даже при наличии эталонов, полезный компонент (или иная характеристика) не входит в ассоциацию ни с какими иными производными от геологической ситуации. В этом случае необходимо разделить площадь на несколько обособленных выборок в соответствии с пространственным распределением первых главных компонент и произвести факторный анализ на каждом участке по отдельности. Установлено, что на площади работ присутствует три различных типа оруденения, естественно, характеризующихся разными поисковыми критериями и, соответственно, различным набором факторов.

9. Выделение и формирование итоговых наборов признаков, являющихся указанием на искомую геологическую позицию.

10. Их нормирование, шкалирование и/или классификация, обеспечивающие корректное сложение в один или несколько интегральных показателей (например, в соответствии с вкладами в главные компоненты). Каждый показатель должен принимать значения в диапазоне от 0 до 1, где максимальное значение – положительная роль признака в контексте решаемой задачи.

11. Суммирование признаков в интегральный показатель/и, отражающий, например, перспективность участка площади на какой-либо вид полезного компонента.

Таким образом, предлагаемая методика позволяет оптимизировать процесс анализа всей совокупности геолого-геохимических и иных данных, генерализовав их до небольшого количества высокоинформативных картографических представлений, удобных для визуального анализа. Методика реализуема средствами любых современных геоинформационных пакетов.

1.5 Основные результаты проведённого исследования

В результате исследований о металлогенезисе золота в истории Земли предполагается его первично глубинная (мантийная – фемическая) природа, но в истории Земли постепенно проявляются его коровые свойства, зафиксированные в увеличении разнообразия типов и металлогенических ассоциаций месторождений золота в складчатых поясах фанерозоя. Минеральный состав руд орогенных месторождений Au отражает вклад коровых и мантийных источников в процессы их формирования.

Полученные результаты о минеральном составе месторождений Au и Ag (Кварцевая Сопка и Роговик Охотско-Чукотского вулканического пояса) могут быть использованы при определении общего направления поисковых и разведочных работ на объектах подобного типа. Если придерживаться точки зрения, что находки амальгам серебра являются поисковым критерием, указывающим на возможность выявления богатых серебром руд на территории, где они были обнаружены, то можно говорить о положительной оценке Роговиковской площади на предмет обнаружения новых рудных месторождений, и не только золото-серебряных.

По мнению авторов, применение низковысотной съемки с мультикоптеров может в значительной степени модернизировать традиционные подходы к выполнению легких геофизических методов. В то время, как применение геоинформационного подхода к оценке перспектив площади исследований и выделению наиболее перспективных участков позволяет оптимизировать процесс анализа всей совокупности геолого-геохимических и иных данных, генерализовав их до небольшого количества высокоинформативных картографических представлений, удобных для визуального анализа. Методика реализуема средствами любых современных геоинформационных пакетов.

2 РЕЗУЛЬТАТЫ, ПОЛУЧЕННЫЕ В 2018 г.

Фокус исследований 2018 г. был направлен на выявление геохимических особенностей разнотипных рудно-магматических систем благородных металлов, формирующихся в различных геодинамических обстановках, построение их геохимических и генетических моделей и разработка комплекса геохимических методов прогноза и поисков месторождений.

Объекты исследований расположены на территориях Приколымья, Приохотья, Забайкалья, Прибайкалья Центрально-Азиатского орогенного пояса.

Получены важнейшие результаты:

- в результате металлогенического анализа ранней истории Земли показано, что наиболее ранняя минерализация благородных металлов представлена золотом и платиноидами, сформировавшими важные месторождения в период 3.1-2.0 млрд лет.;

- бриолитогеохимические потоки рассеяния являются составной частью литохимических потоков рассеяния и наравне с ними могут эффективно использоваться для выявления геохимических аномалий и оценки их рудно-формационной принадлежности;

– бриолитогеохимические потоки рассеяния в значительной степени отражают особенности вещественного состава первичных руд;

- в разрезе неопротерозойских углеродсодержащих толщ Ленской золотоносной провинции наиболее значимым является дальнетайгинский-жуинский горизонт, обладающий сидерофильной специализацией и надкларковыми содержаниями Au, Ag, Pb, Zn, Ba, P, Mn;

– в пределах Олоkitского полиметаллического (Ba-Pb-Zn) района все месторождения и рудопроявления (Pb-Zn – Холоднинское, Овгольское и др.; Ba-Pb-Zn – Йоко-Рыбачье, Ондоко и др.) также приурочены к единому горизонту, представленному итыкитской и ондокской свитами.

2.1 Анализ возраста платинометалльного оруденения и соответствующих типов месторождений элементов платиновой группы в процессе изменения стилей тектонических движений

В рамках этапа проведен металлогенический анализ ранней истории Земли, который показал, что наиболее ранняя минерализация благородных металлов представлена золотом и платиноидами, сформировавшими важные месторождения в период 3.1-2.0 млрд лет. При этом месторождения элементов платиновой группы тяготеют к концу архея – началу раннего протерозоя и связаны глубинными мантийными

интрузивами плюмовой природы. Такая обстановка на Земле, выделяемая как LID-тектоника (тектоника покрывки), совмещенная с тектоникой плюмов, существовала на Земле до начала переходного периода, он ознаменовался рядом новых геологических процессов и к 2.0 млрд лет привел к современной тектонике Земли, которая характеризуется совместным проявлением тектоники плит и тектоники плюмов. Переходный период смены тектонических движений на Земле начался со времени 3.4 млрд лет, когда происходило разделение ядра Земли на внутреннее железное и внешнее жидкое. Начиная с 3.4—3.3 млрд лет произошло значительное увеличение типов месторождений полезных ископаемых, среди рудных месторождений главную роль играли благородные и сидерофильные металлы. Только к возрасту 2.0 млрд лет отмечается образование карбонатитов с редкометалльным типом минерализации. Обращает также на себя внимание факт, что мантийные производные гадея и раннего архея не сопровождалась благороднометалльной (в том числе и платиноидной) минерализацией, что свидетельствует об отличных тектонических механизмах развития Земли в это время (тектоника покрывки) от позднего архея.

2.2 Геохимия и условия образования месторождений благородных металлов, в том числе крупных и уникальных, в складчатых структурах Северо-Востока России, критерии их поисков и оценки

Впервые на территории Северо-Восток России на площади Дукатского рудного поля (Au-Ag месторождение Дукат и Au-Ag рудопроявление Пиритовый) были выполнены бриолитохимические исследования. Опробование осуществлялось по водотокам I-го порядка, дренирующим Au-Ag рудные зоны, и было обусловлено тем, что в условиях криолитозоны в вершинах водотоков скопления аллювиальных отложений фрагментарны или полностью отсутствуют, но при этом по их берегам и руслу произрастают водные и полуводные мхи. Отбирались пробы, состоящие из моховых подушек и удерживаемых ими рыхлых отложений, представленных тонкими илистыми взвесями и песчано-илистым материалом

Показано, что моховые подушки являются эффективной природной ловушкой, позволяющей извлекать из водной взвеси современных водотоков, даже временных, тонкодисперсные, ультрадисперсные и коллоиднодисперсные частицы, в том числе рудные. Проведено сопоставление содержаний основных элементов-индикаторов Au-Ag оруденения (Au, Ag, As, Pb, Zn) в бриолитохимических и литохимических пробах. Установлено, что наиболее высокими концентрациями этих элементов характеризуются бриолитохимические пробы.

С помощью сцинтилляционного анализа показано преобладание тонкодисперсных частиц Au и Ag в бриолитохимических пробах. Методом РСМА изучен вещественный состав литочастиц, а также возможные формы нахождения элементов-индикаторов оруденения. Изучение полированной поверхности образцов в режиме обратно рассеянных электронов и в рентгеновских лучах показало, что большая часть изученных проб состоит из частиц озоленных мхов и литочастиц, а также их спекшихся агрегатов, имеющих сложную форму и разные размеры. Рудные минералы представлены микрочастицами золота и серебра, реликтами сульфосолей серебра, сильно разрушенными мелкими зернами пирита, сфалерита, галенита, арсенопирита. Более или менее однородные частицы, состоящие из Au, Ag, As, Pb и Zn, обладают крайне малыми размерами. Частицы, состоящие из Au и Ag, имеют в своем составе примесь As. Размер частиц чаще всего не превышает 1-2 мкм в соответствии с рисунком 7. Они имеют свойство соединяться в агрегаты, размер которых достигает 50 мкм. Внутри этих агрегатов частицы распределены крайне неравномерно. Представлены они, как и в рудах, электрумом. Ag-содержащие частицы представлены, помимо электрума, вероятнее всего сильно разрушенными собственными минералами (прустит, пирсеит?), в состав которых входит As, в соответствии с рисунками 5, 6. Ag-содержащие частицы, также как и электрум, имеют свойство соединяться в агрегаты

размером до 50 мкм.

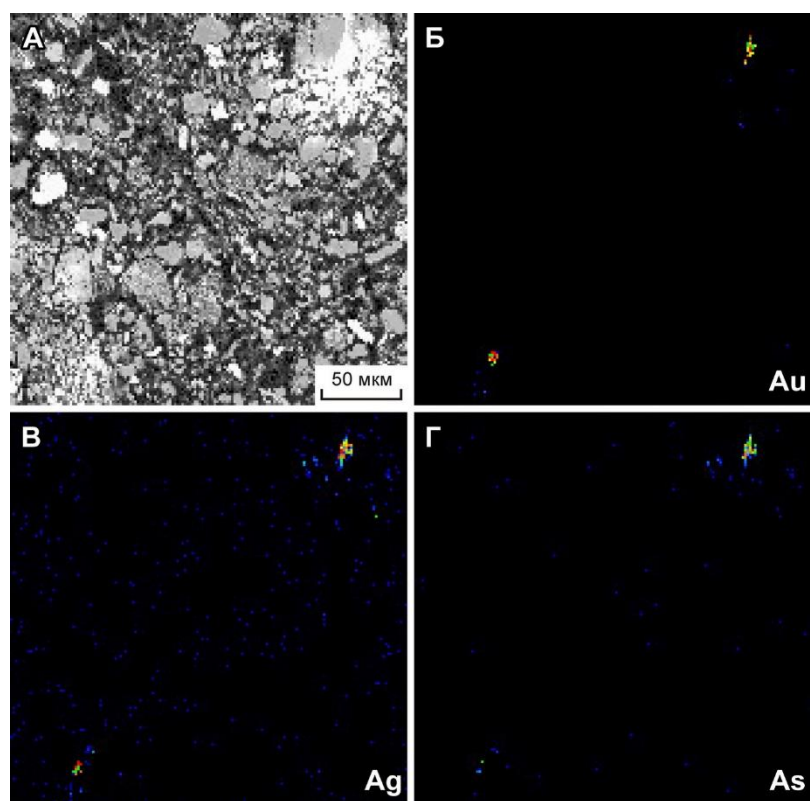


Рисунок 7 – Частицы электрума и минералов Ag (прустит, пирсеит?) в бриолитохимической пробе. Изображение дано: А – в обратно рассеянных электронах; Б-Г – в рентгеновских лучах.

As образует еще агрегаты состава Fe-As-S, в соответствии с рисунками 8, 9, размером до 20 мкм. По всей вероятности, такие образования являются производными от разрушенных зерен арсенопирита и, частично, питтицита, продукта разрушения арсенопирита, который во вторичных средах образует трудно растворимые формы.

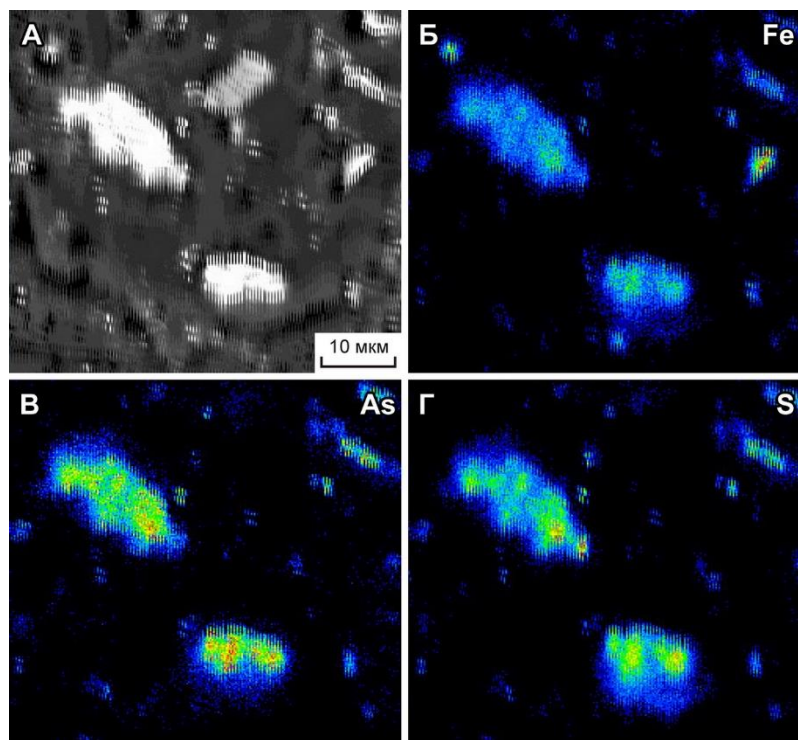


Рисунок 8 – Частицы состава Fe-As-S в бриолитохимической пробе. Изображение дано: А – в обратно рассеянных электронах; Б-Г – в рентгеновских лучах.

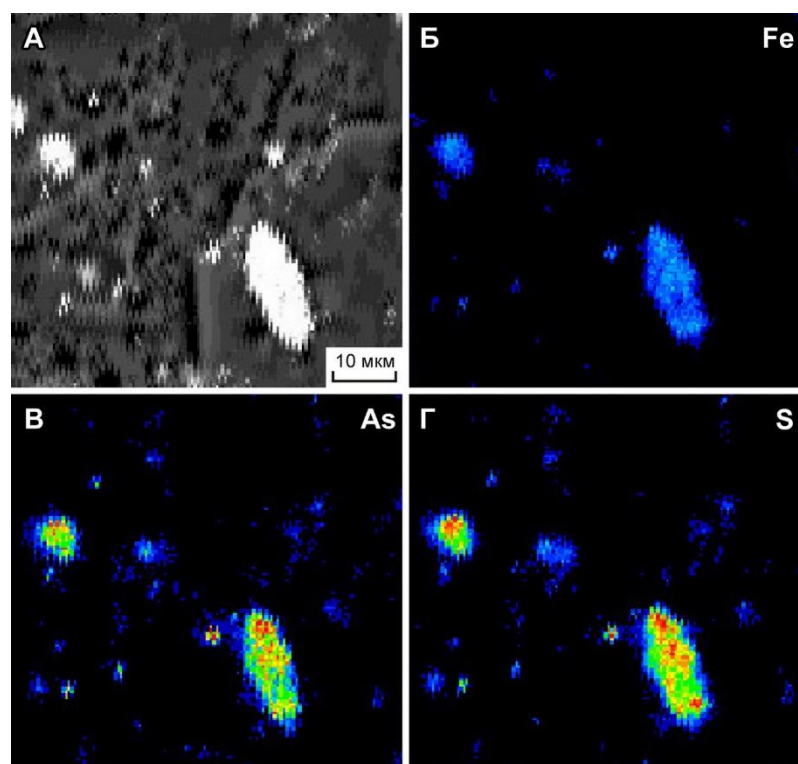


Рисунок 9 – Частицы состава Fe-As-S в бриолитохимической пробе. Изображение дано: А – в обратно рассеянных электронах; Б-Г – в рентгеновских лучах.

Pb и Zn встречается в бриолитохимических пробах в виде агрегатов, размером до 10. Такие агрегаты представлены полностью преобразованными в гипергенных условиях зернами галенита и сфалерита, которые перешли в церуссит и смитсонит, соответственно.

Это объясняется отсутствием в их составе S.

Сделан вывод о том, что БЛПР являются составной частью ЛПР и наравне с ними могут эффективно использоваться для выявления геохимических аномалий и оценки их рудно-формационной принадлежности. Показано, что БЛПР в значительной степени отражают особенности вещественного состава первичных руд: те же основные элементы-индикаторы (Au, Ag, Hg, Sb, As, Pb и Zn) и тот же близкий минеральный состав (тонкодисперсное золото и серебро, электрум, сульфосоли серебра, простые сульфиды).

Предложенные бриолитохимические исследования имеют широкие перспективы использования не только на территории Северо-Востока России. Они могут эффективно применяться и в других районах, имеющих сходные ландшафтные условия, в первую очередь, на тех площадях, где формирование литохимических и бриолитохимических потоков рассеяния происходит в условия северных субарктических и арктических обстановок.

2.3 Вклад ювенильного вещества и их роль в формировании крупных и уникальных месторождений золота, связанных с черносланцевыми горизонтами.

В пределах южного обрамления Сибирского кратона наиболее значимыми рудными регионами являются Ленский золоторудный район Бодайбинского синклинория (ЛЗР) и территориально с ним сопряженный Олоkitский полиметаллический (Ba-Pb-Zn) район (ОПР). Предметом изучения является вопрос возрастной принадлежности рудоносных горизонтов, корреляция источников полезного компонента и палеогеодинамических событий, способствовавших их формированию. В разрезе неопротерозойских углеродсодержащих толщ ЛЗР наиболее значимым является дальнетайгинский-жуинский горизонт, вмещающий целый ряд известных месторождений Au (Угаханское Сухой Лог, Голец Высочайший и др.). Возраст отложений горизонта оценивается в ~610–635 млн. лет [21] при мощности, не превышающей 3 км, в то время как суммарная мощность рифей-вендских толщ в регионе достигает 15 км. В сравнении с подстилающими и перекрывающими толщами, отложения этого интервала обладают сидерофильной специализацией и надкларковыми содержаниями Au, Ag, Pb, Zn, Ba, P, Mn. В пределах ОПР все месторождения и рудопроявления (Pb-Zn – Холоднинское, Овгольское и др.; Ba-Pb-Zn – Йоко-Рыбачье, Ондоко и др.) также приурочены к единому горизонту, представленному итыкитской и ондоксской свитами.

Для определения возраста накопления ондоксской свиты из образца углеродсодержащего глинистого сланца были выделены около 80 зерен циркона размером 50-100 мкм, крайне редко – 100-250 мкм. Из них проанализировано 46 зерен с размером, достаточным для анализа, в соответствии с рисунком 9. Локальный U-Pb анализ методом масс-спектрометрии с лазерной абляцией выполнен в Институте наук о Земле г. Тайпей (Академия Синика, Тайвань) с использованием магнитосекторного масс-спектрометра Agilent 7900 и системы лазерного пробоотбора Photon Machines Analyte G2 с 193 нм лазером по точкам с размером 35 мкм. Даты зерен с дискордантностью менее 10% преимущественно сгруппированы в кластеры с палеопротерозой-архейскими (2786–1771 млн. лет) и неопротерозойскими значениями (980–597 млн. лет), указывая на вендский возраст осадконакопления ондоксской свиты (~600 млн. лет) и значительный вклад «несибирского» источника, представленного породами Байкало-Муйского террейна. Особенности U-Pb системы ряда как дискордантных, так и некоторых конкордантных зерен, предполагают существенное влияние более позднего (не старше 569 млн. лет) метаморфического события. Изотопный состав свинца толщ, вмещающих Ba-

полиметаллическое месторождение Йоко-Рыбачье (итыкитская свита) и Pb-Zn Холоднинское месторождение (ондокская свита) указывают на единый источник рудного свинца на всем этапе седиментации дальнетайгинского горизонта при различии модельного возраста в 10-20 млн. лет [21], что схоже с предполагаемой разницей между отложениями бужуихтинской и хомолхинской свит в разрезе БПН [22, 23]. Таким образом, с учетом полученных возрастных данных, можно констатировать факт синхронного накопления бужуихтинской и хомолхинской свит ЛЗР с итыкитской и ондокской свитами ОПР и их общего отнесения к дальнетайгинскому горизонту.

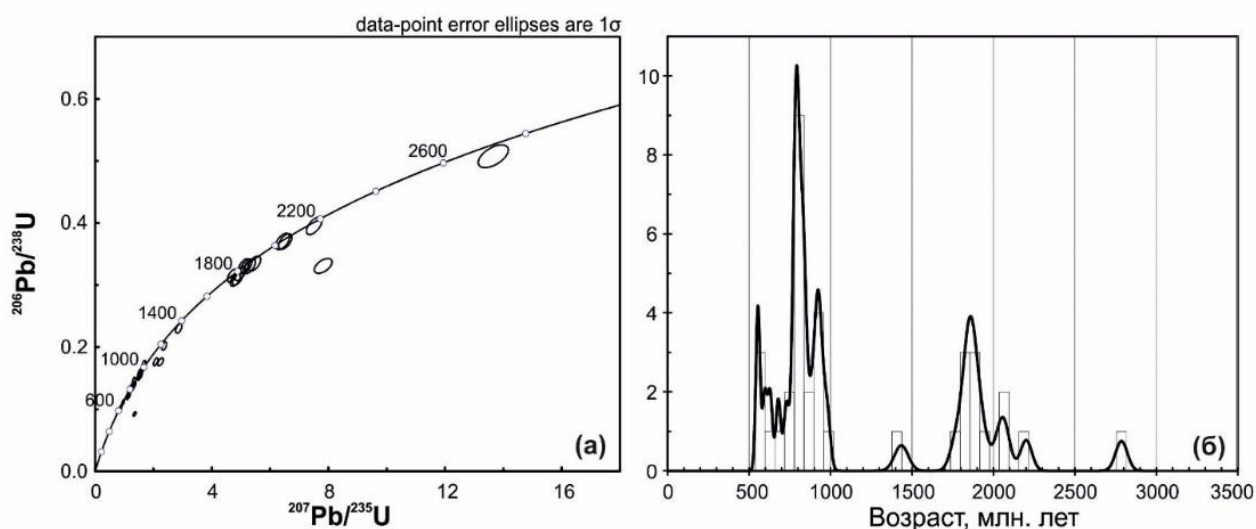


Рисунок 10 – а) Диаграмма с конкордией для цирконов из глинистого сланца ондокской свиты; б) Кривая вероятности и гистограмма распределения для цирконов с дискордантностью менее 10%.

При литолого-геохимическом анализе реконструируется последовательный фациальный ряд обстановок осадконакопления Ленского золоторудного и Олоkitского полиметаллического районов от задугового бассейна на севере [24-26], к островодужной системе на юге [27], что вероятно и определяет металлогенический потенциал отложений. Эксплозивная деятельность вулканических аппаратов Байкало-Муйской зоны, а также подводные эксгаляции зоны спрединга задугового бассейна с большой вероятностью могли оказывать влияние на геохимические особенности амагматичных отложений Бодайбинской, Приленской и Прибайкальской зон. Источником обогащения рудной зоны месторождения Ва, Zn, Pb, Ag и другими элементами, свойственными для низко- и среднетемпературных ассоциаций, являлся гидротермальный раствор задуговых бассейнов. Этот процесс имел распространение в северном направлении, формируя сидерохалькофильную специализацию амагматичных черносланцевых толщ дальнетайгинского горизонта ЛЗР.

2.4 Основные результаты проведённого в 2018 г. исследования

В результате исследований о металлогенезисе золота в истории Земли предполагается его первично глубинная (мантийная – фемическая) природа, но в истории Земли постепенно проявляются его коровые свойства, зафиксированные в увеличении разнообразия типов и металлогенических ассоциаций месторождений золота в складчатых поясах фанерозоя. Минеральный состав руд орогенных месторождений Au отражает вклад коровых и мантийных источников в процессы их формирования.

Полученные результаты о минеральном составе месторождений Au и Ag (Кварцевая Сопка и Роговик Охотско-Чукотского вулканического пояса) могут быть использованы при определении общего направления поисковых и разведочных работ на объектах подобного типа. Если придерживаться точки зрения, что находки амальгам серебра являются поисковым критерием, указывающим на возможность выявления богатых серебром руд на территории, где они были обнаружены, то можно говорить о положительной оценке Роговиковской площади на предмет обнаружения новых рудных месторождений, и не только золотосеребряных.

По мнению авторов, применение низко высотной съемки с мультикоптеров может в значительной степени модернизировать традиционные подходы к выполнению легких геофизических методов. В то время, как применение геоинформационного подхода к оценке перспектив площади исследований и выделению наиболее перспективных участков позволяет оптимизировать процесс анализа всей совокупности геолого-геохимических и иных данных, генерализовав их до небольшого количества высокоинформативных картографических представлений, удобных для визуального анализа. Методика реализуема средствами любых современных геоинформационных пакетов.

3 РЕЗУЛЬТАТЫ, ПОЛУЧЕННЫЕ В 2019 г.

Целью исследований 2019 года было выявление условий изменения металлогении в геологической истории Земли.

Задачи проекта: изучение геологических и минералого-геохимических процессов рудообразования месторождений различных формационных типов в благороднометалльных рудно-магматических системах, сформированных в определенных геодинамических обстановках Забайкалья, Прибайкалья, Монголии, Северо-Востока России, вещественного состава руд, метасоматитов, источников рудного вещества, состава металлоносных флюидов, геохимических критериев поисков и оценки рудных месторождений

- определены возрастные рамки формирования редкометалльного оруденения и соответствующих типов месторождений редких металлов в процессе изменения стиля тектонических движений в истории Земли

- доказано, что вариации изотопных характеристик серы в сульфидах месторождений Бодайбинского района, связаны с влиянием крупного термально-флюидного события в результате формирования куполов зонального метаморфизма в окружении Бодайбинского синклиория.

- доказано, что рудная минерализация крупных месторождений золота (>50 тонн) расположенных в пределах дальнетайгинско-жуинского горизонтов Байкало-Патомского пояса сформировалась в результате схожих условий, связанных с единым процессом.

- впервые для отложений неопротерозойского горизонта Бодайбинского района было проведено изучение изотопной системы $^{238}\text{U}/^{235}\text{U}$. Полученные результаты позволяют предположить, что основной причиной выявленных вариаций $^{238}\text{U}/^{235}\text{U}$ в метаосадочных породах БПП является изменение окислительно-восстановительных условий в осадочном палеобассейне.

- в процессе проведения комплексной геолого-геофизической съемки, доказано преимущество комплексных беспилотных вариантов съемок, позволяющих более оперативно и с низкими затратами, создавать крупномасштабную высокоинформативную картографическую основу для последующих поисков золотого оруденения.

3.1 Возраст редкометалльного оруденения и соответствующих типов месторождений редких металлов в процессе изменения стиля тектонических движений в истории Земли.

Классически к редким металлам относятся литий, рубидий, бериллий, тантал, ниобий. Однако, вместе с перечисленными элементами, традиционно к месторождениям редких металлов относят также месторождения олова, вольфрама, молибдена и висмута. Речь в дальнейшем пойдет, в основном, о гранитогенных месторождениях редких металлов, поскольку месторождения, связанные с щелочными породами, относятся к единой внутриплитной обстановке и проявлены в специфических условиях.

В данном исследовании мы связываем формирование месторождений с конкретными геодинамическим обстановкам, принятыми в рамках современной геотектонической парадигмы: коллизионной (КО), субдукционной активных окраин континента (АОК), островных дуг (ОД), границ скольжения плит (ГСП) и внутриплитных (ВП). Мы опираемся на генетическую классификацию оруденения, основываясь на типах: гранит-пегматитовом (Li, Sn, Be, Ta, Nb), скарновом (W, Sn, Mo, Bi), грейзеново-альбититовом (Li, W, Sn, Be, Bi), кварцево-жильном (W, Sn, Be, Mo, Bi) гидротермальном и экзогенно-термальном (Li). При этом сознательно избегаем дробной формационной типизации, в силу большой неопределенности отнесения конкретных месторождений к тому или иному формационному типу у разных исследователей.

В текущем году был завершён анализ золотоносности разных регионов и эпох в истории Земли, который показал, что на ранних этапах развития Земли (древнейший гадей-средний архей и переходный поздний архей – начало раннего протерозоя) мантийную металлогению золота определяли орогенные обстановки сагдукции и мантийной конвекции, проявление плюм-тектоники и, возможно, плитной тектоники в переходный этап с начала палеопротерозоя, но только с конца неопротерозоя можно уверенно говорить об определяющей роли процессов субдукции и собственно тектоники плит, а также и роли коры в металлогении золота, определяя ее как корово-мантийную [28].

Прежде всего выявляется большая степень родства к золоту в поведении вольфрама, первые проявления металлогении которого известны с конца архея (2.9-2.6 млрд. лет) в ЮАР в виде аномально высоких содержаниях в определенных горизонтах метаморфических толщ [29], затем известны аналогичные крупнообъемные, но с низкими содержаниями W объекты мезопротерозоя Руанды и максимальная вспышка и разнообразие месторождений в фанерозое (палеозое и мезозое). Еще более контрастно преобладание позднейшей фанерозойской эпохи проявлено в металлогении олова, для

которого известен также ряд пегматитовых месторождений переходного этапа в Африке (2.6-2.4 млрд. лет) [30], затем раннепротерозойские месторождения Центральной Бразилии [31], с абсолютным максимумом в позднейшем этапе в мезозое, где в формировании его месторождений преобладали коллизионные, пост-коллизионные и субдукционные обстановки [32, 33]. Для молибдена практически неизвестны крупные месторождения древнее протерозоя [33]. Максимумы проявления формирования месторождений молибдена, характерны для палеозоя и позднего мезозоя – кайнозоя, с преобладанием порфирирового стиля минерализации, связанного с АОК. Известные в литературе порфирировые месторождения Канадского и Австралийского архейских кратонов похожи на порфирировые, но имеют свою специфику [34-37]. Для лития выделяется два периода минерализации 2.8-2.5 млрд. лет (пегматитовый) и моложе 0.5 млрд. лет [38]. Основная масса раннего «пегматитового и литий-фтористых гранитов» этапа была сформирована в фанерозое и это единственный из рассматриваемых элементов, одним из типов месторождений которого являются рассольные системы [39]. Главный тип – это гранитогенные пегматиты, как в докембрии, так и в фанерозое и только в кайнозое преобладает рассольный тип. Висмут редко образует собственные месторождения являясь попутной примесью для месторождений золота, олова и вольфрама, его минерализация широко проявлена как в древних месторождениях золота, так и в более молодых с выделением собственного золото-висмутитового типа гранитоидных систем в фанерозое [28]. Аналогичны его минералогические скопления в фанерозойских месторождениях олова и вольфрама как коллизионных грейзеновых (Корнуолл, Рудные Горы и пр.) и скарновых (Агылки, Восток-2), так и для субдукционных АОК (месторождения Перу, Боливии и пр.). Месторождения тантала и ниобия в гранитогенных системах тесно связаны с оловом и литием, что характерно для пегматитовых объектов (месторождения Забайкалья, Приискатель на Колыме и пр.). Промышленные скопления этих элементов, наряду с РЗЭ и цирконием типичны для карбонатитовых и щелочных пород палеопротерозоя (Гулинская интрузия), конца мезопротерозоя и фанерозоя [33, 34, 40], которые в настоящее обобщение не входят. Отметим также тесные связи ниобия и тантала с трахитоидным вулканизмом и щелочными гранитами и литий-фтористыми гранитами, появляющимися как во внутриплитной обстановке, так и в связи со сменой чисто субдукционных обстановок АОК на трансформные движения блоков, что типично для позднемезозойского оруденения на Востоке Азии, равно как и кайнозойского. Следует обратить внимание на то, что в структурах Африки так же проявлены гранитогенные месторождения тантало-

ниобатов (Нигерия), связанные с внутриплитной тектоно-магматической активизацией. В целом, в распределении тантал-ниобиевого оруденения во времени отмечено два крупнейших цикла: архейский – начала палеопротерозоя и фанерозойский [40]. Бериллиевые проявления также характерны для гранитных пегматитов (в т.ч. и докембрийских в ядрах древних кратонов), грейзенизированных метаморфитов(?) (Урал, Мурзинка), грейзенов и альбититов Монголо-Охотского пояса и гидротермальных кварцевых жил (Светлое на Чукотке), где берилл тесно ассоциирует с касситеритом и вольфрамитом. Все указанные примеры типичны для фанерозойского периода. Однако есть и редкометалльные альбититы в метаморфических толщах Становика и Алдана с промышленными концентрациями бериллия, связанные с процессами активизации. И, конечно, есть древнейшие пегматиты в Южной Америке и Африке. Все эти объекты возникли в обстановках коллизии, субдукции (АОК), либо ГСП.

Таким образом, рассматривая данные по распределению месторождений редких элементов во времени и пространстве мы приходим к следующим выводам:

(1) основная их масса сформировалась в фанерозойскую эпоху земной истории, что иллюстрирует максимум влияния коровых процессов на их металлогению, за исключением тантала и ниобия, элементов, которые сохранили более тесную связь с мантийными процессами;

(2) раннее проявление месторождений вольфрама, лития и олова только в кратонных блоках Палео-Гондваны (или Гондваны-1) свидетельствует об их изначально коровой природе, в отличии от металлогении золота, мантийной в то время;

(3) тем не менее, постоянное нахождение вольфрамовой и висмутовой минерализации в золоторудных месторождениях указывает на их изначальную металлогеническую связь с металлогенией золота, на всем протяжении истории Земли;

(4) анализ редкометалльной рудоносности (наряду с золотом – [28]) древних континентальных блоков показывает уникальную обогащенность месторождениями этих элементов Палео-Гондваны, что требует дополнительного анализа причин металлогенической неоднородности древних континентальных блоков;

(5) если на ранних этапах развития Земли металлогению редких элементов во многом определяли орогенные и посторогенные процессы связанные с межконтинентальными тектоническими взаимодействиями как следствиями сагдукции, плюм-тектоники и начала плейт-тектоники, то на поздних фанерозойских этапах важнейшую роль стали играть субдукционные процессы активных континентальных

окраин и островных дуг, своей энергетикой во многом способствовавшие коровому рециклингу редких элементов;

(б) внутриплитная металлогения бериллия, тантала и ниобия обусловлена определяющим вкладом мантии в происхождение их месторождений.

3.2 Золоторудные месторождения Бодайбинского района

Мамско-Оронский плутоно-метаморфический купол, точнее – морфологически это вал, является тектоно-металлогенической структурой первого порядка для всего Байкало-Патомского региона. Это своеобразная раннепалеозойская (силурийская [41]) орогенная ось данной территории. Анализ материалов 200-тысячных карт и карты миллионного масштаба последнего поколения показывает, что помимо золоторудных объектов разного масштаба [42], обрамляющих данную структуру, ее сопровождают геохимические и шлиховые поля олова и касситерита, металлогенически подтверждающая его орогенную природу. Совпадение возраста раннего этапа формирования основных руд Сухого Лога с возрастом магматизма, поздней плутонической фазы плутоно-метаморфической системы Мамско-Оронского вала не случайно, а указывает на их генетическую взаимосвязь. В этом отношении любопытно, что золото-пирит-арсенопиритовая минерализация месторождений Ожерелье и Ыкан, локализованных в сильно метаморфизованных породах амфиболитовой фации наиболее близких к осевой части вала, не несет внешних следов метаморфизма (внутри изоград граната и силлиманита), что позволяет предполагать их связь с поздними магматическими гранитоидными образованиями данной структуры. А широкое развитие пирротина в рудах Высочайшего, локализованного на «гребне» метаморфического преобразования в провисе кровли купольной осевой части вала в месте разворота этой структуры в сторону Нечерского поднятия (выступа вала), при сравнительно гомогенном и легком относительно Сухого Лога и Вернинского изотопном составе серы сульфидов, позволило предположить рабочую модель, согласно которой процесс развития пирротина (дисульфидизации) отвечает метаморфической стадии формирования этой структуры, а более поздние пирит и арсенопирит (и более легкие по сравнению с ранними минералами по сере в Сухом Логу и Вернинском) [28] связаны с реализацией орогенной золото-мышьяк-сульфидной системы в связи со становлением ордовичско-силурийской гранитоидной плутонической фазы (возможно, начиная с мигматитовой субфазы), характерной для ядра данного купола – вала. Полученные данные по изотопии серы для пиритов пород разных свит Жуинского сектора отобранных в течение полевого сезона отчетного года, намечают зональность в изменении данного параметра: от максимально легкого для пирита максимально близкого к оси вала (+3.0) и до тяжелого (+17 ÷ +24.5‰) на удалении.

Проведено сопоставление минералогических особенностей месторождения (Чертово Корыто). В результате минералого-петрографического и геохимического изучения вмещающих пород и руд месторождения прослежено 5 минеральных

ассоциаций, сформированных в результате разновременных процессов, поэтапно сменяющих друг друга.

1. Наиболее ранняя ассоциация связана с метасоматозом и выражена в образовании кварц-мусковит-серицитовых прожилков, а также экстракции и выносе РЗЭ из пород, с их частичным переотложением в виде мельчайших включений самостоятельных карбонатных и оксидных минералов.

2. Ранняя сульфидная минерализация, не связанная с золотом, представлена пирротином-I и пиритом-I и развивается по метасоматически измененным породам. Данная ассоциация не имеет регионального распространения и проявлена только на площади рудного поля. Формирование дорудной сульфидизации по всей вероятности является аналогичным, начальному этапу формирования месторождения Сухой Лог [43, 44], который, по мнению В.К. Немерова с соавторами [45] связан с катагенетическим преобразованием рудопродуктивных углеродистых толщ на этапе низкотемпературного метаморфизма Байкальского этапа складчатости [46].

3. Собственно рудный этап формирования месторождения, представленный ассоциацией арсенопирита с пиритом-II и пирротином-II, связан с наложенными более поздними гидротермально-метасоматическими процессами. Сами минералы отличаются от сульфидов прерудной стадии высокой степенью идиоморфизма и более крупными размерами, что характерно для гидротермально-метасоматической стадии.

При детальном изучении химического состава сульфидов рудной ассоциации в арсенопирите и пирротине-II установлена примесь Co и Ni, соответственно. Важно отметить, что в пробах с максимальными содержаниями золота установлены наибольшие концентрации Co и Ni. Несмотря на это, содержание данной пары элементов, в неизменных отложениях и отложениях претерпевших рудный метасоматоз, остается ниже значений стандарта PAAS и коэффициент их концентрации равен Co – 0.25 и 0.72; Ni - 0.35 и 0.56, соответственно. Данный факт говорит в пользу заимствования золота и сопутствующих компонентов из вмещающих пород, без привлечения дополнительных источников глубинного происхождения.

4. В завершении рудного этапа происходит образование халькофильной минерализации, обусловленное затуханием гидротермального процесса. Изменения, произошедшие в данное время, имеют большое значение для рудообразующего процесса, т.к. именно с ними связано переотложение образованного ранее самородного золота, его укрупнение и очистка.

5. Завершает процесс формирования месторождения образование пострудных кварцевых жил и прожилков, не являющихся золотоносными. С процессом пострудного окварцевания связано повторное переотложение золота, обусловившее его повышенную пробность и формирование повышенных концентрации золота в данных прожилках, зафиксированных только в местах их пересечения с рудной зоной.

Ленская золотоносная провинция (ЛЗП) является одной из крупнейших по запасам и известна во всем мире. В разрезе неопротерозойских углеродсодержащих толщ ЛЗП наиболее значимым является дальнетайгинско-жуинский горизонт, вмещающий ряд известных месторождений Au (Угаханское, Сухой Лог, Голец Высочайший и др.) [46-49]. Возраст отложений горизонта ~610–635 млн лет [22, 23] при мощности не более 3 км. В сравнении с подстилающими и перекрывающими толщами отложения этого интервала обладают сидерофильной специализацией и надкларковыми содержаниями Au, Ag, Pb, Zn, Ba, P, Mn [1, 25, 26, 48].

Согласно предложенной выше модели, в пределах дальнетайгинского и жуинского горизонтов, месторождения более верхних стратиграфических уровней, используют рудный потенциал нижних уровней: месторождения хомолхинской свиты используют дополнительный потенциал отложений бужуихтинской свиты; в свою очередь месторождения аунакитской свиты (используют потенциал отложений хомолхинской свиты [30, 48].

Таким образом, была обоснована вероятность эшелонированного оруденения для месторождений указанных стратоуровней. В результате проведенной работе, совместно с геологической службой ПАО «Высочайший» была предложена «программа бурения 2018 – 2019» направленная на доразведку флангов и глубоких горизонтов на месторождениях Угахан, в соответствии с рисунком 11, Голец Высочайший, в соответствии с рисунком 12, Ыкан и Ожерелье. На основе имеющихся структурных, геолого-минералогических и геохимических данных регионального и локального уровней, а также данных полученных в ходе бурения скважин, произведен геологический анализ с целью выявления закономерностей распределения благороднометалльного (золотого) оруденения.

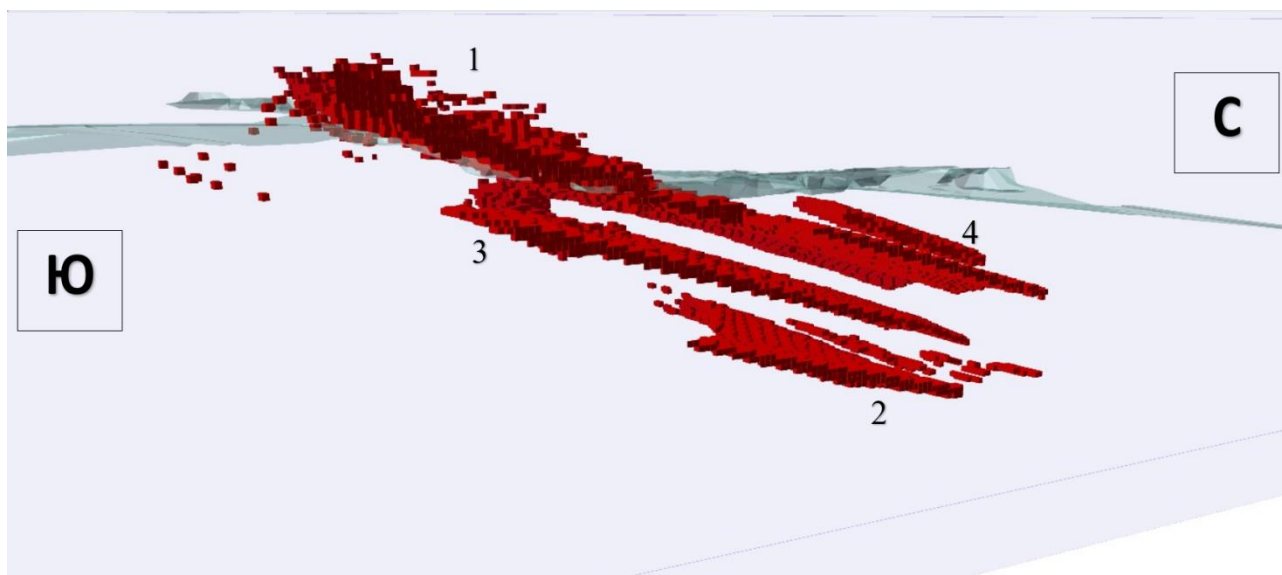


Рисунок 11 – Каскадное строение рудных тел месторождения Угахан (1, 2 – выявленные на стадии разведки рудные тела; 3,4 – новые слепые тела) (М 1:300)

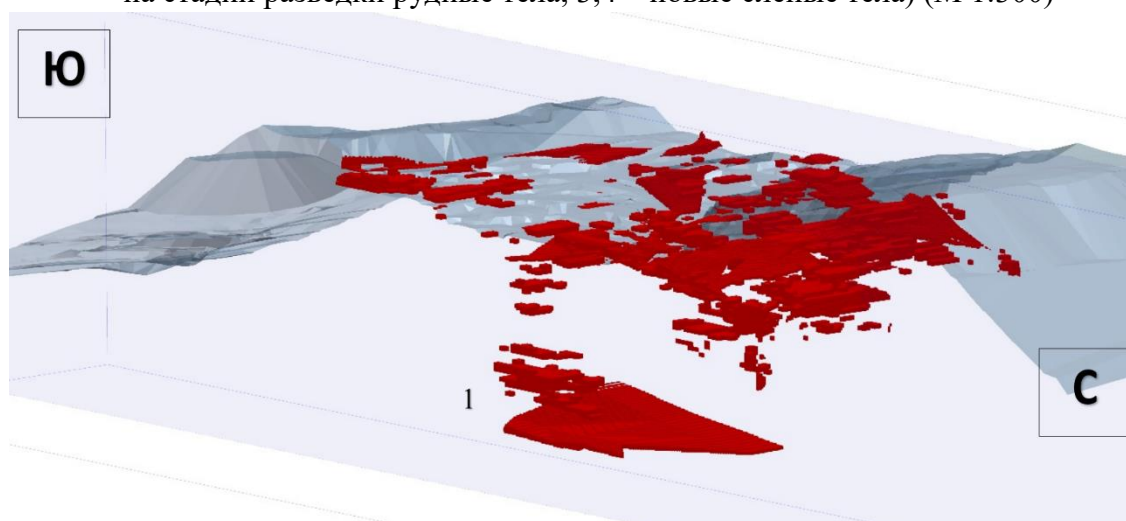


Рисунок 12 – Геологический разрез по месторождению Голец Высочайший – юго-запад – северо-восток. Данные 2018 года (1 - Нижний эшелон оруденения) (М 1:300)

Особое внимание было уделено поискам слепого оруденения, приуроченного к потенциально рудоносным толщам (бужуихтинская, хомолхинская и аунакитская свиты) на крыльях и на глубоких горизонтах в ядерных частях антиклинальных складок.

Результатом проведенной буровой программы 2018 - 2019 гг стало:

1. Выявлены новые зоны с золоторудной минерализацией на глубоких горизонтах в ядре антиклинальной складки (м-е Голец Высочайший) и в пологом крыле антиклинальной складки на месторождении Угахан.
2. Прирост запасов и ресурсов на месторождениях Угахан и Голец Высочайший составили (ЗАПАСЫ - 19911.3 кг; РЕСУРСЫ 43613.0 кг).

Одна из ключевых задач в рудной геологии – исследование процессов осадконакопления различных геологических эпох, реконструкция физико-химических палеообстановок, при которых протекали, наложенные процессы, способствовавшие формированию рудной минерализации. Существенный вклад в понимание этого вопроса вносит изучение вариаций изотопных характеристик. В отчетный период было проведено изучение вариаций изотопного состава U в неопротерозойских метаосадочных породах Байкало-Патомского прогиба (БПП). Исследование проводилось на приборной базе ИГЕМ РАН (ответственный исполнитель Чугаев А.В.).

Изученная коллекция образцов – разновозрастные осадочные отложения БПП, отличающиеся по своим геохимическим особенностям и условиям формирования [52]. Для наиболее древних отложений баллаганаской, дальнетайгинской серий, величина $\delta^{238}\text{U}$ достаточно постоянна, в среднем $-0,31 \pm 0,04\text{‰}$ (SD). Напротив, систематически более тяжёлый изотопный состав U устанавливается для пород жуинской, юдомской серий. Для них среднее значение $\delta^{238}\text{U} = -0,18 \pm 0,06\text{‰}$ (SD).

Как известно, отложения балаганаской и дальнетайгинской серий (~750–580 млн лет назад) патомского комплекса накапливались в шельфовой зоне в условиях открытого морского бассейна, тогда как образование терригенно-карбонатных пород жуинской, юдомской серий (580–540 млн лет назад) происходило уже в бассейне типа “foreland”. Предполагается, что в позднеэдиакарское время сформировался достаточно изолированный бассейн с застойными условиями и анаэробной обстановкой в зонах осадконакопления [48, 52]. В современных морских бассейнах, для которых характерна слабая циркуляция придонных вод и анаэробная обстановка, аутигенный U новообразованных осадков в большей степени обогащён тяжёлым ^{238}U по сравнению с U, растворённым в морской воде [53]. Преимущественное накопление изотопа ^{238}U в осадках обусловлено фракционированием изотопов ^{238}U , ^{235}U в процессе редукции урана ($\text{U(VI)} \rightarrow \text{U(IV)}$).

Учитывая вышесказанное, можно предположить, что утяжеление изотопного состава U в метаосадках жуинской, юдомской серий вызвано анаэробной обстановкой в палеобассейне во время их накопления и поступлением аутигенного U в осадки. В пользу такого вывода свидетельствует повышенное содержание в породах жуинской серии органического вещества (в сланцах вачской свиты концентрация Сорг до 10 мас. %), а также присутствие в толщах сульфидной минерализации. Изменение условий осадконакопления на границе дальнетайгинской, жуинской серий фиксируется также

результатами изучения вариации $\delta^{34}\text{S}$ в пиритах пород Бодайбинской зоны [52], в соответствии с рисунком 13.

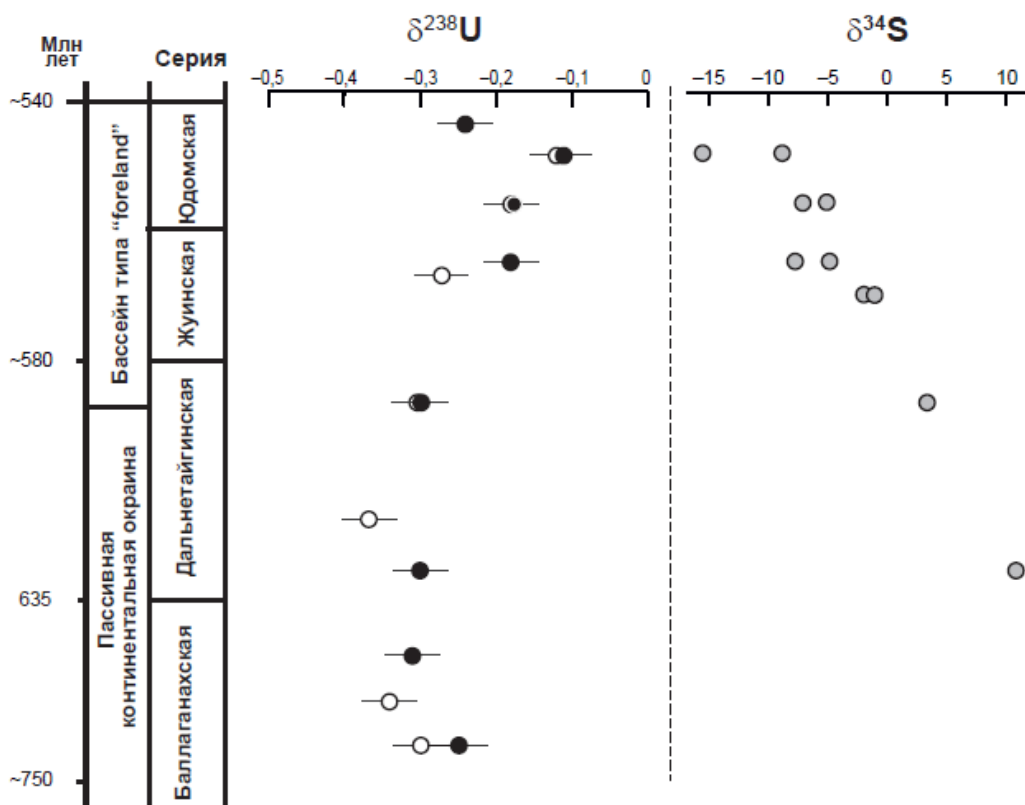


Рисунок 13 – Изменение величин $\delta^{238}\text{U}$ и $\delta^{34}\text{S}$ в стратиграфическом разрезе неопротерозойских метаосадочных пород БПП (северное Забайкалье). Белые кружки – Патомская зона, черные – Бодайбинская зона

Изотопный состав U метаосадочных пород БПП ($\delta^{238}\text{U}$ от -0,37 до -0,11‰) находится в пределах (от -0,39 до +0,15‰), характерного для древних метаосадочных терригенных пород, формирование которых происходило в морских палеобассейнах [54, 55]. За счет процессов поверхностного выветривания пород и, соответственно, поступления в океан со стоком речных вод U и других металлов, происходило повышения содержания U в морской воде, что предполагает увеличение доли аутигенного U в формирующихся осадках. Таким образом, основная причина выявленных вариаций $^{238}\text{U}/^{235}\text{U}$ в метаосадочных породах БПП – изменение окислительно-восстановительных условий в осадочном палеобассейне. Возможная исходная неоднородность по изотопному составу U пород-источников кластогенного материала, по-видимому, не вносила значимый вклад в вариации изотопного $^{238}\text{U}/^{235}\text{U}$ в осадочных толщах БПП. В пользу этого свидетельствует близость величин $\delta^{238}\text{U}$ отложений дальнетайгинской, баллаганакской серий.

3.3 Оптимизация методики поисков месторождений золота приуроченных к черносланцевым толщам Бодайбинского района с учетом выявленных геолого-структурных, позиций поисковых критериев, с применением созданных беспилотных аэрогеофизических технологий

Современный этап геологоразведки в основном связан с поисками скрытых объектов, расположенных в районах, удаленных от инфраструктуры со сложными условиями ландшафта и/или рельефа. Роботизированные аэрогеофизические системы, позволяющие выполнять съемку на высотах в первые десятки метров и с обтеканием рельефа, обеспечивают высокую производительность, низкую стоимость работ, высокое качество данных, которое в реальных условиях площадей со сложными ландшафтно-морфологическими условиями может превосходить наземные съемки [5, 56, 57]. В последние годы особенно широкое распространение в мире получили технологии низковысотной магниторазведки, выполняемой с помощью мультироторных БПЛА [5, 58-60], существенно меньшее распространение в области геологических поисков получили технологии БПЛА-гамма-съемок [8, 61, 62].

Важно отметить, что выше процитированные работы описывают беспилотные комплексы, реализующие только один метод геофизической съемки. Дальнейшее повышение эффективности работ с применением беспилотных систем, аналогично классической наземной и аэрогеологии, безусловно лежит в области комплексирования нескольких взаимодополняющих методов съемки.

Работы проводились на флангах месторождения Угахан в Бодайбинском районе Иркутской области, в соответствии с рисунком 14. Геологическое строение и золотоносность Бодайбинского синклинория детально описаны в литературе [26, 49, 50]. Наиболее значимыми критериями поисков золоторудных объектов в Бодайбинском районе является их приуроченность к конкретным стратоединицам (бужуихтинской, хомолхинской и аунакитской свиты) и их структурная позиция (приуроченность к антиклинальным складкам третьего порядка [61, 62]. К этим частям складок может быть приурочена сульфидная минерализация (пирит, халькопирит, арсенопирит, пирротин), которая чаще всего имеет парагенетическую связь с золотом. Перспективные стратиграфические подразделения (контакт черносланцевой и карбонатной пачек бужуихтинской свиты) по сравнению с ниже- и вышележащими свитами (мариинская и угаханская свита соответственно) также характеризуются повышенной радиоактивностью. Описанные позиции формируют совокупность поисковых критериев на золото, которые могут быть зафиксированы методами магнитной и гамма-съемки:

- 1) повышенная радиоактивность перспективных подразделений,
- 2) в пределах областей повышенной радиоактивности – наличие аномалий высокого градиента магнитного поля, вплоть до смены знака, либо отрицательных аномалий. Эти магнитные аномалии, вызванных моноклинным пирротинном, картируют непосредственно тела с сульфидной минерализацией.

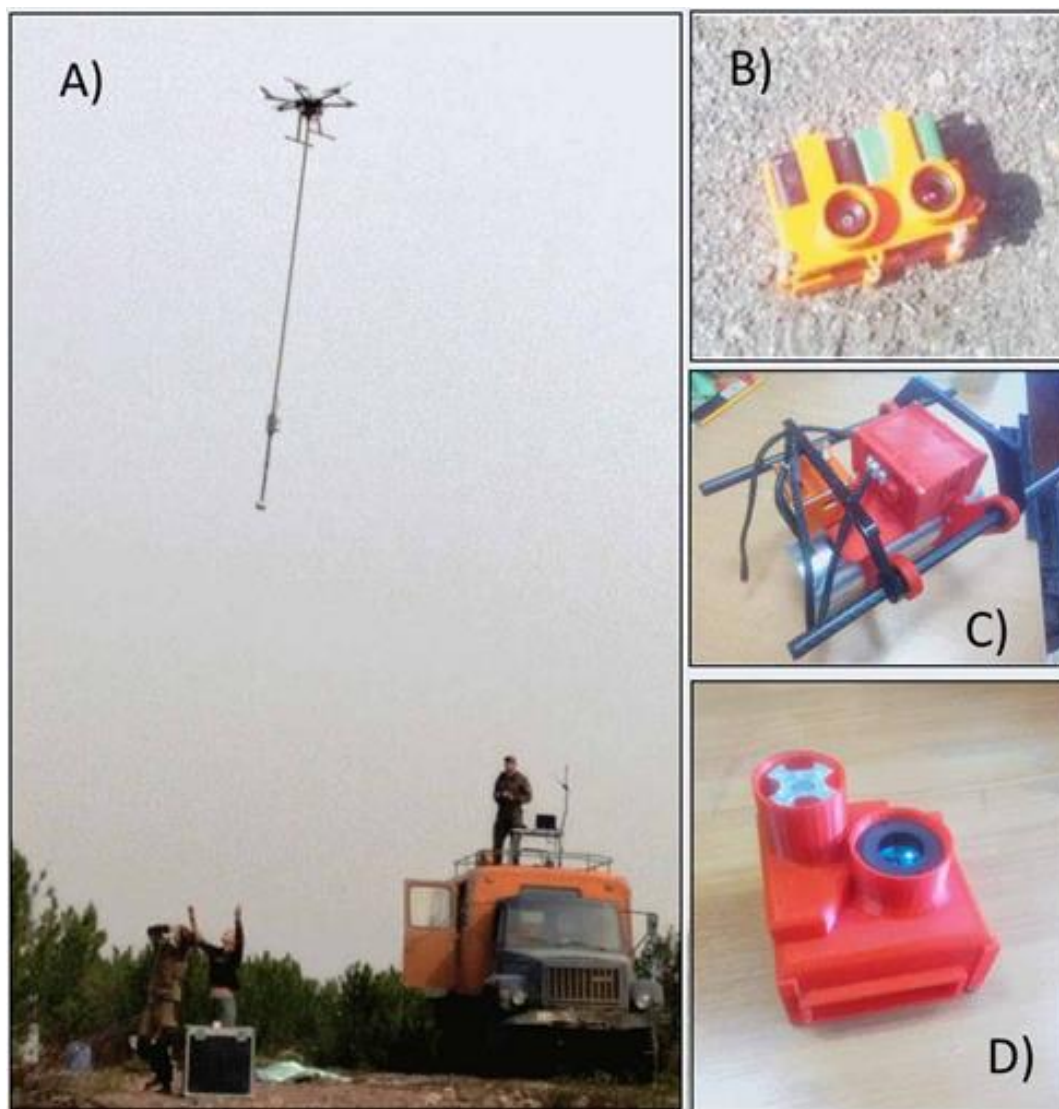
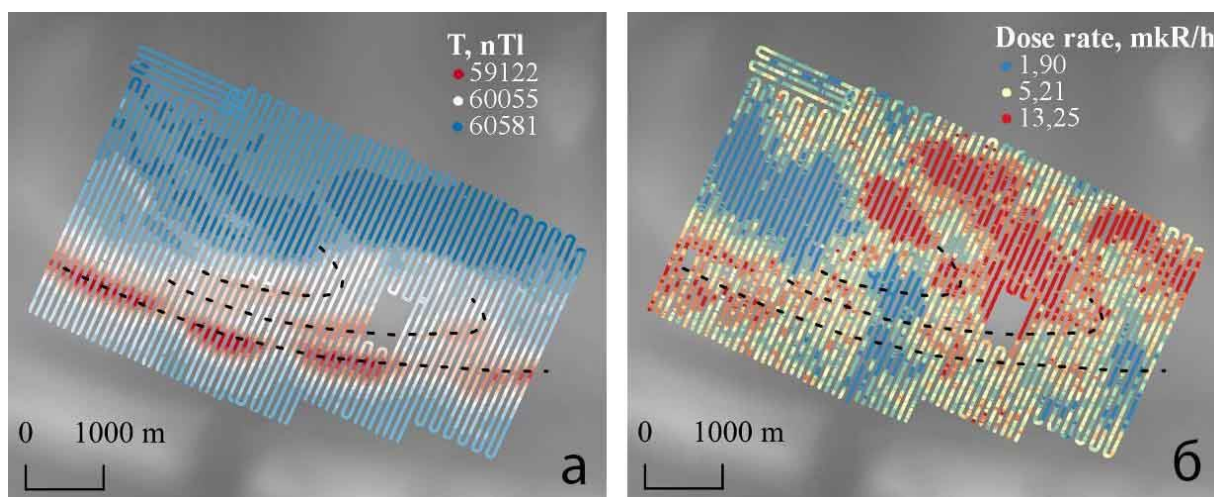


Рисунок 14 – Беспилотная система SibGIS UAS в варианте для одновременной магнитной и гамма-съемки (А) и дополнительные полезные нагрузки – (В) мультиспектральные камеры, (С) гамма-спектрометр (вариант с кристаллом CsI 63x63, (D) экспериментальный лидарный сканер твердотельного типа

Для оценки качества получаемых данных на рисунке 15 приведены первичные данные измерений, пропуск в данных обусловлен наличием техногенных отвалов, съемка поверх которых не велась. Среднеквадратическая погрешность магнитной съемки составляет менее 1.5 нТл, гамма-съемки – менее 8%.



15 – Первичные данные съемки: а – магнитная съемка (с учетом вариаций). Пунктиром обозначены предполагаемые рудные пачки в пределах бжуихтинской свиты; б – первичные данные гамма-съемки

Работы проводились в осенний период, когда в изучаемом районе уже появился первый снежный покров, однако листва на деревьях еще сохранялась. Это в совокупности с неравномерной залесенностью участка и ожидаемой невысокой контрастностью аномалий гамма-поля ставило вопрос о необходимости учета влияния биомассы растительности на результаты радиометрических измерений, поскольку живая растительность по сравнению с воздухом характеризуется более чем тридцатикратной поглощаемостью гамма-излучения. Необходимость внесения такого рода поправок отмечалась в литературе с самого начала аэрогаммасъемок [64-66], но на тот момент она была практически неосуществимой. С появлением БПЛА-аэрогаммасъемки, запрос к информативности результатов которой по определению выше, чем к данным традиционных методов, данный вопрос стал еще более очевидным и актуальным [63, 67].

Наиболее эффективным способом оценки распределения биомассы растительности и автоматизированного выявления техногенных участков на наш взгляд является расчет мультиспектральных индексов по данным аэрофотосъемки. Так, для расчета наиболее распространенного нормализованного относительного индекса биомассы растительности NDVI (вычисляется по формуле $(NIR-RED)/(NIR+RED)$, где NIR и RED – спектральные яркости в ближнем инфракрасном и красном каналах электромагнитного спектра), достаточно наличие наряду с фотоснимками в видимом спектре, которые можно получить с помощью обычной цифровой фотокамеры, дополнительного канала из области ближнего инфракрасного спектра с длиной волны порядка 800-850 нм.

Полученную схему магнитного поля, представленную на рисунке 15, можно интерпретировать как лежащую антиклинальную складку, запрокинутую на юг, с частично эродированной ядерной частью. Согласно принципиальной структурной схеме, наличие на эрозионном срезе структур лежащего крыла складки при отсутствующем (эродированном) замке, предполагает наличие тех же стратиграфических горизонтов в пределах ее запрокинутого крыла. Сульфидная минерализация и в висячем, и в лежащем крыле проявляется линейными аномалиями, но особенности намагниченности и последующих складчатых деформаций по всей видимости привели к тому, что лежащее субгоризонтальное крыло в целом относится к области положительных значений поля, а в висячем, близком к субвертикальному залеганию крыле, области развития сульфидов проявляются контрастными локальными аномалиями отрицательного знака. Точнее, сульфидная минерализация (и, возможно, полезный компонент) локализована в висячем крыле тремя близкими к вертикальным пачками, отмеченными, в соответствии с рисунком 7. В целом результаты магнитной съемки фиксируют замыкание известной по данным геологической съемки антиклинальной структуры третьего порядка. Аномалии смены знака поля меньшей амплитуды, 100-150 нТл в верхнем крыле, находящиеся в близядерной части складки, соответствуют по всей видимости нижней пачке бужуихтинской свиты (bz_1^3), в соответствии с рисунком 15. Пачка bz_2^5 характеризуется аномалией максимальной контрастности, к ней приурочено второе разведанное на месторождении тело.

Гамма-поле фиксирует несколько аномалий различной интенсивности. Заметно, что растительность действительно является фактором, влияющим на уровень гамма-фона, поскольку в пределах этой аномалии интенсивность гамма-излучения максимальна на том участке, где биомасса растительности минимальна. Данная аномалия радиоактивности имеет распространение от западного края участка работ непосредственно до террикона, а разделяющая ее на две части область пониженных значений гамма-поля в некоторой степени вызвана перекрытием истинного гамма-фона горных пород болотом, приуроченных к руслу ручья, хотя по данным магнитной съемки эта же область характеризуется и отсутствием концентрации сульфидной минерализации.

По результатам комплексной геофизической и мультиспектральной съемки была обоснована целесообразность более детального геологического изучения выделенного перспективного участка площади. К настоящему моменту получены положительные результаты заверки представленных геофизических аномалий, подтвердившие наши предположения.

3.4 Рудно-магматические системы Забайкальского сектора Монголо-Охотского орогенного пояса.

О объектом изучения были производные средних и кислых магм относимые к заключительной фазе амуджикано-сретинского комплекса (гибридные порфиры, грорудиты и их интрузивные аналоги). Эти породы являются синрудными, генетически связаны с золотой минерализацией и, с этих позиций, изучение их геохимических и изотопных характеристик будет способствовать выявлению источников золота и выделению процессов ответственных за его концентрирование и перенос.

По своей геохимической характеристике гибридные порфиры наиболее близки к производным первичных мантийных магм. Породы обладают довольно выдержанным содержанием SiO_2 колеблющимися от 57 до 59 масс %. Им свойственна высокая магнезиальность ($\text{Mg} = 65-69$), суммарная щелочность ($\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O} = 7.4 - 7.6$ масс %), преобладание натрия над калием ($\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O} = 1.1-1.2$), невысокие концентрации Ti, Al, слабо повышенные, R. Среди рассеянных элементов отмечаются аномальные концентрации Cr (470 - 660 г/т.), Ni (140 - 160 г/т.), повышенные концентрации Rb (118 - 165 г/т.), Cs (4,5 - 14 г/т.), B (11 - 27 г/т.), U (3,5 - 5 г/т.), Th (6,5 - 11 г/т.), Pb (11 - 55 г/т.), умеренные концентрации Ba и Sr (393 — 550 и 341 - 345 г/т.), повышенные концентрации LREE, пониженные HREE и Y.

По своей вещественной характеристике они полностью соответствуют примитивным санукитоидам - «мантийным» гранитоидам архейских кратонов, аналогам низкокремнистых адакитов (LSA), контаминированных веществом континентальной коры [52]. Источником санукитоидов считаются перидотиты верхней мантии, метасоматически преобразованные адакитовыми расплавами.

Грорудиты аналогичны по составу гранитоидам третьей фазы комплекса, наследуют все геохимические особенности гибридных порфиров. Им также свойственна повышенная магнезиальность ($\text{Mg}\# = 0,65 - 0,55$), аномальные концентрации Cr и Ni, преобладание Na над K, при более высокой суммарной щелочности, повышенные концентрации Rb, Li, Cs, Ba, Sr, LREE, низкими концентрациями HREE и Y. Отличаются они более высокими концентрациями кремния и калийных компонентов. В целом, они также могут рассматриваться как производные санукитоидных магм.

Образование пород комплекса может быть рассмотрено в контексте взаимодействия продуктов плавления геохимически специализированного мантийного источника и кислых коровых расплавов, что подразумевается генетическими моделями созданными для санукитоидов. Проиллюстрировать это можно с помощью диаграммы Th/La - Sm/La, приведенной на рисунке 16.

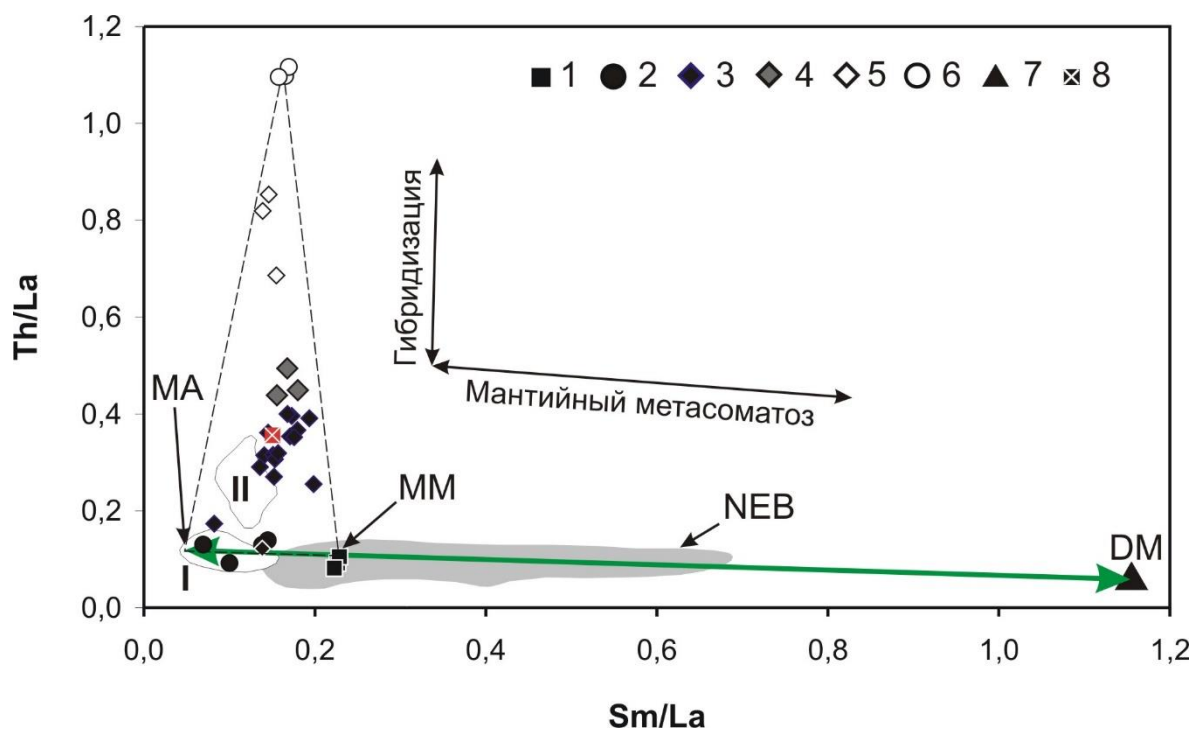


Рисунок 16 – Диаграмма Sm/La – Th/La для производных средних и кислых магм амуджикано-сретинского комплекса. Цифрами даны составы пород: 1 – 2 – амананский (?) комплекс: 1 – габбро, 2 – тоналиты; 3 – 6 – амуджикано-сретинский комплекс: 3 – гибридные порфиры, 4 – первая фаза, 5 – вторая фаза, 6 – третья фаза; 7 – деплетированная мантия; 8 – верхняя континентальная кора по [69]. МА – метасоматизирующий агент. ММ – метасоматизированная мантия. NEB – поле составов высоконикобиевых базальтов. I – поле составов адакитов. II – поле составов санукитоидов

Отношение Sm/La расположенное по оси абсцисс этой диаграммы позволяет фиксировать степень обогащение легкими лантаноидами магматического расплава/источника вещества (степень метасоматических преобразований пород мантийного клина/литосферной мантии). Отношение Th/La, расположенное по оси ординат, долю вещества осадочной природы/корового расплава [70].

Для иллюстрации процесса формирования геохимически специализированного субконтинентального литосферного источника на диаграмму нанесены поля составов базитов NEB, адакитов LSA и санукитоидов, взятых из работ [68, 71-74]. Мы видим, что все эти поля группируются вдоль линии смешения деплетированная мантия – метасоматический агент (адакитовый расплав). Часть точек составов примитивных санукитоидов тяготеет к этой линии в пределах поля адакитов LSA, свидетельствуя о возможности образования их из подобного источника. Однако большая часть точек составов этих пород обладает более высокими значениями Th/La отношения и смещена вверх от линии смешения.

В рамках модели, увеличение Th/La отношения в примитивных санукитоидах должно рассматриваться как добавление к первичному адакитовому расплаву вещества верхней континентальной коры. Для иллюстрации этого тезиса на диаграмме приведена точка ее среднего состава [69]. Мы видим, что эта точка лежит в центре ареала примитивных санукитоидов, и ее положение не может объяснить вариации всех составов пород этой группы.

В подобных случаях считается, что в качестве «контаминанта» мантийных магм выступал кислый коровый расплав [75], имеющий более высокое Th/La отношение. Для иллюстрации этого тезиса на диаграмму нанесены точки составов гранитоидов первой, второй и третьей фаз/группировок амуджикано-сретенского комплекса. Положение точек их составов показывает, что примитивные санукитоиды вполне могли образоваться при взаимодействии продуктов плавления геохимически специализированного мантийного источника (адакиты LSA) с кислым коровым расплавом.

Диаграмма также показывает, что гранитоиды разных фаз могли образоваться при добавлении к кислому расплаву определенной доли более основной магмы, что вполне согласуется с данными приведенными в предыдущем разделе и представлениями других исследователей [75, 76].

На примере Пильненского месторождения золота, входящего в состав Карийского рудного узла сделана попытка проследить эволюцию рудно-магматической системы (РМС) через смену ассоциаций минералов, с возможностью использования полученной информации для разбивки комплексного геохимического ореола рудного узла на зоны соответствующие пространственному положению ассоциаций минералов той, или иной стадии рудного процесса, в соответствии с рисунком 17.

Выделено две группы минеральных ассоциаций, отражающих существование двух этапов становления РМС месторождения, связанных с эволюции единой магматической системы Карийского рудного узла. Первая локальная РМС является продуктом раннего этапа становления рудно-магматических ассоциаций Карийского узла и по своему геохимическому профилю она является редкометалльной. Ее рудные производные относятся к вольфрамит-молибденит-кварцевой рудной формации. В ее пределах выделяются кварц-магнетитовая, кварц-вольфрамит-молибденитовая и карбонатная-сидеритовая минеральные ассоциации, соответствующие стадиям рудного процесса. Минеральные ассоциации второй локальной РМС наложены на первую, отражая поздне-орогенный этап становления минерализации Карийского рудного узла. Они представлены жильно-метасоматическими зонами золото-редкометалльной рудной формации,

характеризующейся сменой во времени кварц-пирит-турмалиновой, кварц-молибденит-шеелитовой, пирит-халькопирит-сульфоарсенидной и золото-висмута-теллуридной минеральными ассоциациями, соответствующими стадиям золоторудного процесса. Отнесение РМС к золото-редкометалльной рудной формации значительно повышает перспективы Пильненского месторождения и Карийского рудного узла в целом в отношении золоторудной минерализации. Золотая минерализация свойственна только второй РМС. Для нее характерна тесная ассоциация с бором, фиксирующим поступление вещества из-за пределов магматической камеры. Наиболее вероятным источником Au и В является мантийный домен, образовавшийся при взаимодействии адакитовых магм с перидотитами верхней мантии.

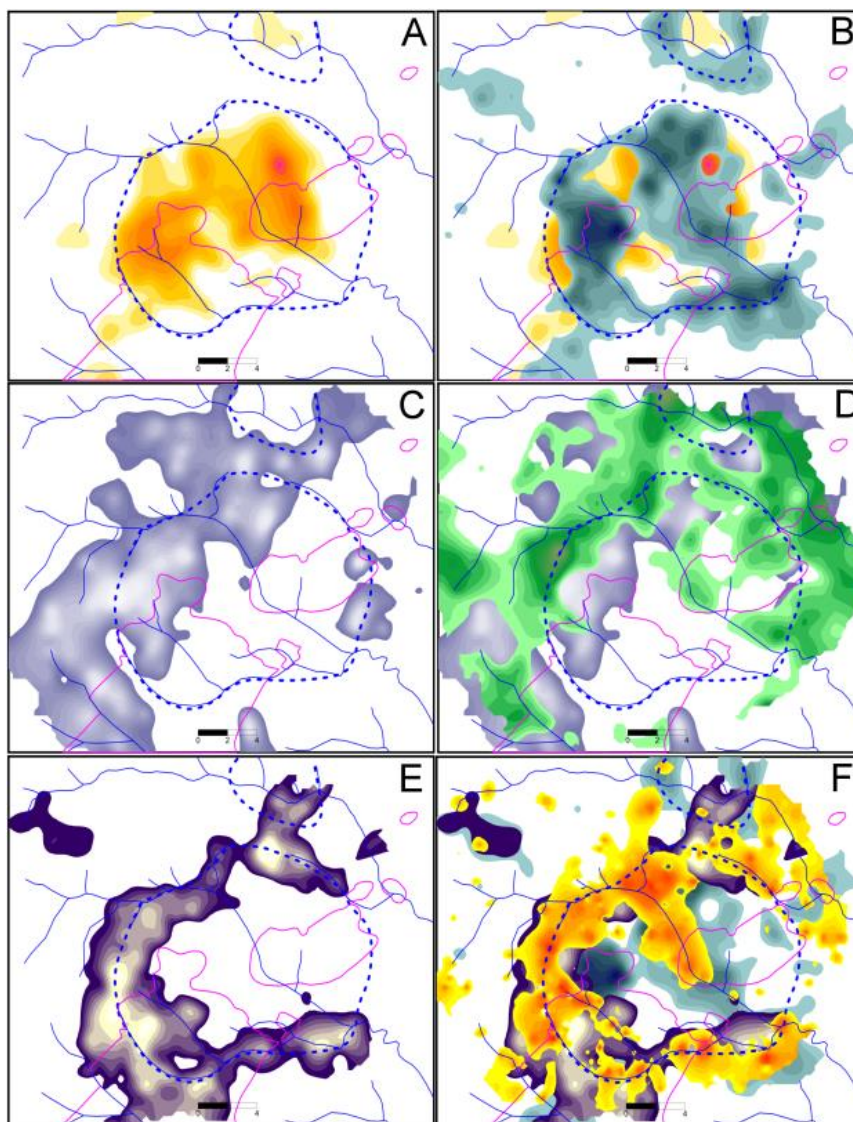


Рисунок 17. Геохимические поля различных стадий минерализации Карийской рудно-магматической системы. Минеральные ассоциации: А – вольфрамит-молибденит кварцевая; В – кварц-молибденит-шеелитовая с золотом; С – полиметаллическая; D – пирит-халькопирит сульфоарсенидная; E – золото-висмута-теллуридная; F – комплексная золотая.

Геохимическая характеристика руд и минералов позволяет выделить ассоциации химических элементов, характеризующих стадии рудного процесса и использовать эту информацию для выделения локальных зон комплексного геохимического ореола. Это послужило основой для разработки оригинальной методики выделения геохимических полей разноэтапных локальных РМС.

В рамках данного раздела проведено исследование минералогии сурьмяно-мышьяковых сульфосолей Pb (Pb и Cu) в золотоносных рудах месторождения Березитовое (Верхнее Приамурье), расположенного на восточном фланге Монголо-Охотского орогенного пояса. Сульфосоли Pb (Pb и Cu) представлены цугаруитом, дюфренуазитом, буланжеритом, менегинитом, висмутовым менегинитом (с содержаниями Вi до 11,5 мас.%), а также минералами иорданит-геокронитового и бурнонит-зелигманитового рядов. Выявлены основные особенности взаимоотношений сульфосолей Pb с рудными и силикатными минералами в различных минеральных ассоциациях прожилковых руд, закономерности вариации их состава. Установлено, что сложные сурьмяно-мышьяковые сульфосоли Pb (Pb и Cu) образуют квазинепрерывные ряды твердых соединений, которые резко различаются между собой по соотношению в их составе полуметаллов, а также полуметаллов и Pb. Высказано предположение, что основные типоморфные особенности состава сурьмяно-мышьяковых сульфосолей Pb Березитового месторождения определяются специфическими процессами частичного плавления сульфидов при высокотемпературном метаморфизме первичных полиметаллических руд.

В отчетный период, изучен изотопный состав кислорода рудного кварца Балейского и Тасеевского месторождений Балейского рудного поля и халцедона миндалин юрских палеовулканов. Выявлены элементы вертикальной изотопной зональности рудобразующей системы от существенно тяжелого (+14.2 - +10.9‰) халцедона миндалин, через переходные (+10.5 - +7.4‰) значения для опалитов и опал-халцедоновых образований надрудной части первой рудной зоны Тасеевского месторождения, до максимально легкого (+1.7‰) для продуктивного халцедона глубоких горизонтов, близкого к рудному кварцу Балея (+0.8 - -2.6‰). Эта зональность подтверждает вертикальную минеральную и температурную зональность оруденения.

Изучена минералогия Средне-Голготайского золоторудного месторождения, на котором нами выделена ранняя золото-редкометалльная минерализация гранитоидного генетического ряда и поздняя золото-сульфидно-турмалиновая, типичная для месторождений околошовной зоны Монголо-Охотского шва (Ключевское, Карийское,

Дарасунское и пр.). Рассмотрение эволюционной последовательности формирования рудной минерализации показывает, что гидротермальный процесс на рассматриваемом месторождении был многоактным, а растворы, генерирующие золото-висмутовое оруденение на ранних стадиях рудного процесса, имели не только мышьяковую специализацию, но и борную. При этом следует отметить двойственное поведение бора в формировании Средне-Голготайского месторождения, поскольку в рудах борная минерализация присутствует в обоих продуктивных стадиях рудного процесса. Однако основная масса турмалина, локализованного в кварц-сульфидных рудах, несомненно, была сформирована позже основной массы Au-Bi минерализации.

3.5 Золоторудные месторождения Северо-Востока России

Получены новые данные по типоморфизму и типохимизму самородного золота эпитермальных Au-Ag месторождений Дальнее, Кварцевая Сопка и Роговик (Северное Приохотье). Самородное золото выполняет трещины и интерстиции в кварце и кварц-адуляровых агрегатах, тесно ассоциирует с рудными минералами. Чаще всего находится в сростании с минералами Ag – акантитом, сульфосолями Ag (полибазит-пирсеит, пираргирит, Se-пирсеит, стефанит, прустит и их изоморфные смеси), селенидами Ag (науманнит, агвиларит), реже – с самородным серебром. По отношению к простым сульфидам золото является более поздним, заполняет трещинки в пирите (часто окисленном до гидроксидов Fe), халькопирите, захватывает включения сфалерита и галенита, в соответствии с рисунком 18.

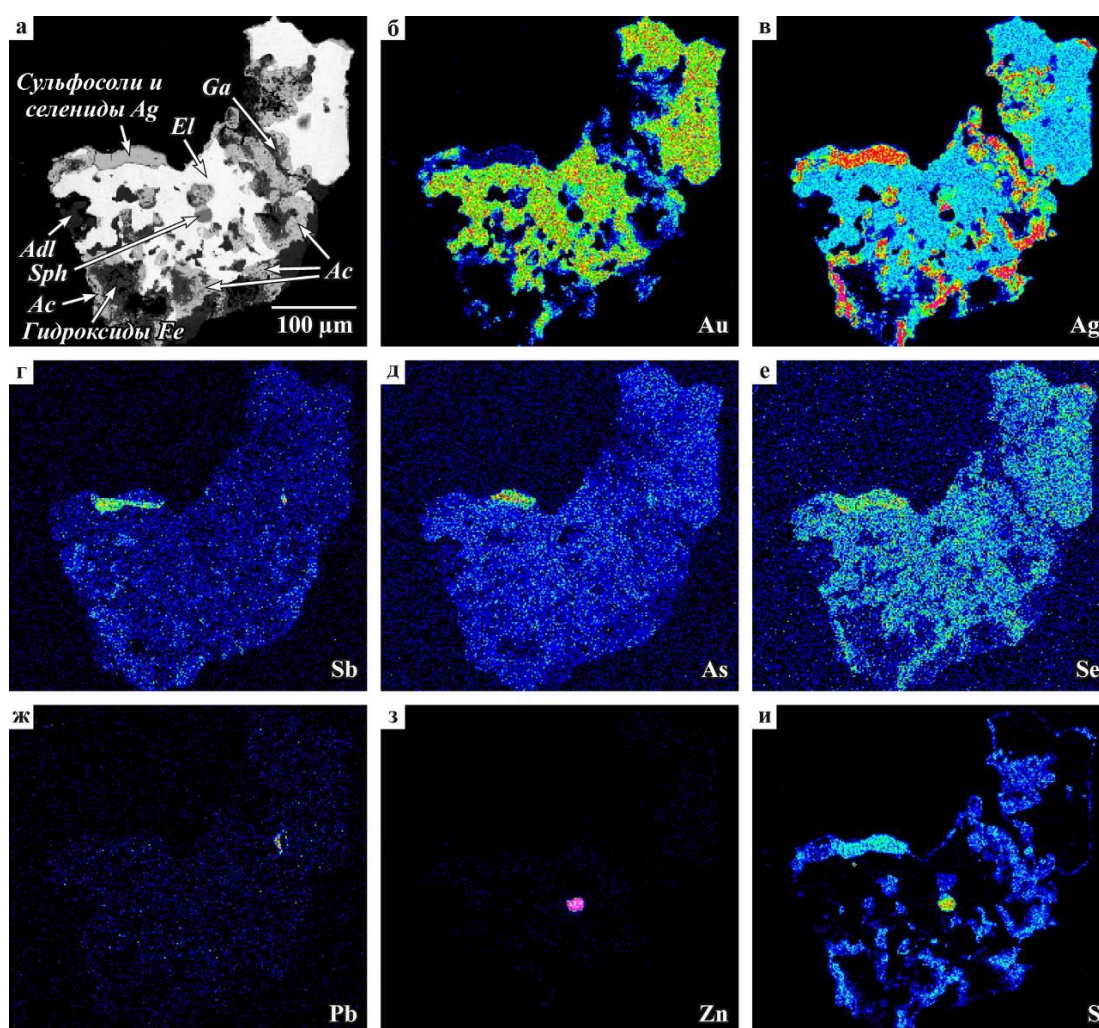


Рисунок 18 – Зерно электрума (*El*) в сростании с акантитом (*Ac*), сульфосолями и селенидами Ag, сфалеритом (*Sph*), галенитом (*Ga*), адуляром (*Adl*) и гидроксидами Fe. Изображения даны: а – в обратно-рассеянных электронах; б(Au), в(Ag), г(Sb), д(As), е(Se), ж(Pb), з(Zn), и(S) – в рентгеновских лучах (данные PCMA). Месторождение Кварцевая Сопка.

Для изученных месторождений характерно золото с высокой дисперсией основного состава: кюстелит – электрум пониженной пробыности – электрум – низкопробное самородное золото. Размер золотинок варьируют от тонкодисперсных (2–10 мкм) до мелких (10–100 мкм), зерна более 100 мкм (0.1–1.5 мм) встречаются редко. Золотины имеют преимущественно изометричные, реже чешуйчато-листоватые и пластинчатые формы, и крайне неоднородный состав. Значительную часть составляет тонкодисперсное золото.

Из примесей в самородном золоте месторождений Дальнее и Кварцевая Сопка установлены (в мас. %): Bi (до 1.44), S (до 0.79), Se (до 0.75), Pb (до 0.34), Cu (до 0.31), Te (до 0.27), Zn (до 0.25) и As (до 0.14). Самородное золото месторождения Роговик отличается от первых двух очень высокими содержаниями Hg, до 18.89 мас. %. Из других примесей установлены только (в мас.%) Se до 1.40, Fe до 1.23 и Cu до 0.41.

Появление высокортутистого золота, вплоть до образования амальгам, не типичное для эпитермальной Au-Ag минерализации, можно объяснить приуроченностью месторождения Роговик к участку сочленения крупных разломов, один из которых (Долинный) контролирует Догдо-Эрикитский ртутоносный пояс, с которым связана ртутная специфика месторождения. Кроме того, находка высокортутистого золота в рудах месторождения Роговик говорит об уникальности этого объекта и возможной перспективе выявления на территории Северного Приохотья нового нетрадиционного типа минерального сырья и новых рудных объектов, в том числе крупных и уникальных.

На примере Дукатского Au-Ag месторождения (Северное Приохотье) показано, что одним из критериев при поисках рудной минерализации являются формы нахождения (ФН) элементов, в первую очередь Au и Ag, в рыхлых аллювиальных отложениях водотоков, дренирующих Au-Ag зоны. Из собственных минералов Au и Ag в аллювиальных отложениях были установлены тонкодисперсные частицы (<10 мкм) электрума, сульфосолей и сульфидов Ag, в соответствии с рисунком 19, из неминеральных ФН – примесное Au в сильно разрушенном пирите, серебро в галените, сфалерите и их вторичных образованиях. Установлено, что вещественный состав аллювия, хорошо согласуются с составом и ФН этих элементов в рудах.

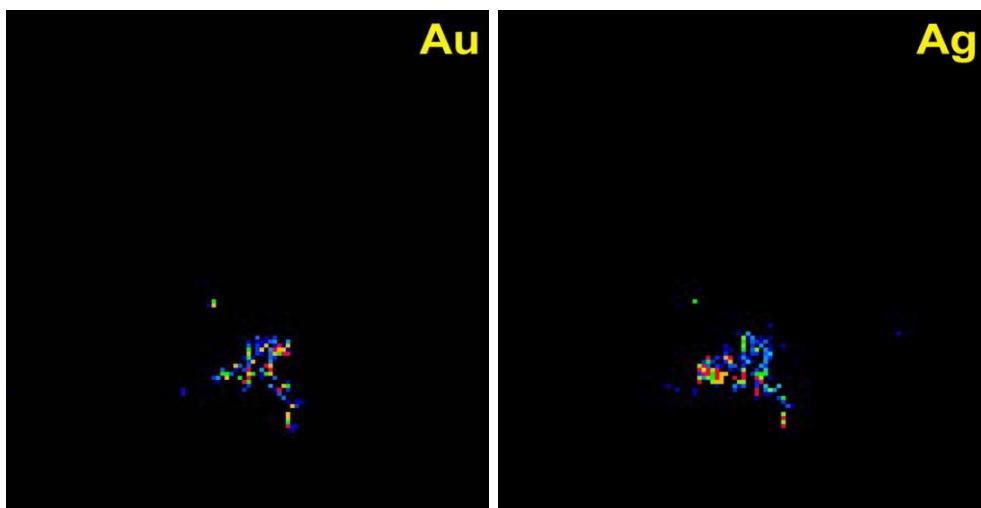


Рисунок 19 – Тонкодисперсные (6-8 мкм) частицы электрума (Au) и сульфосолей серебра (Ag) в аллювиальных отложениях водотоков, дренирующих Au-Ag зоны Дукатского месторождения. Изображение дано в рентгеновских лучах (данные РСМА).

Выявленные закономерности могут успешно применяться на всех стадиях геохимического изучения рудоносных площадей, начиная с прогнозной оценки на слабо изученных территориях, до детальных работ на уже известных рудных объектах.

3.6 Новые разработки в области микро-минералогии благородных металлов с использованием сцинтилляционной дуговой атомно-эмиссионной спектроскопии

Рассмотрены и представлены новые разработки в области микроминералогии благородных металлов (БМ) с использованием сцинтилляционной дуговой атомно-эмиссионной спектроскопии (САЭС). Оценены и сопоставлены аналитические возможности спектральных комплексов «СТЭ-1 – Поток», «Гранд-1500 – Поток» и «Гранд-1000 – Поток» с фотодиодными линейками БЛПП-369М4, БЛПП-2000 и БЛПП-4000 соответственно. За счет корректного выбора аналитических линий, записываемых в сцинтилляционном режиме, в порошковых пробах выполняется одновременное определение валовых содержаний всех БМ – Au, Ag, Pt, Pd, Ir, Os, Rh, Ru на уровне 1-50 ppb, а также элементов-спутников золоторудных месторождений, в соответствии с таблицей 1.

Таблица 1 – Кларки и нижние границы определения элементов

Элемент	Ед. изм., %	Среднее содержание в земной коре	C min в градуировочных образцах
Au	10 ⁻⁷ (ppb)	4.3	0.6
Ag		60	4
Pt		5	4
Pd		10	1.3
Rh		1	30
Ru		50	0.4
Ir		1	3
Os		50	10
As		10 ⁻⁴ (ppm)	1.7-1.8
Bi	0.009-0.17		0.04
Cd	0.13-0.20		0.025
Cu	47-55		11
Ni	58-75		5
Pb	16-12.5		2
S	470-200		50000
Sb	0.5-0.2		0.8
Se	0.05		17
Sn	2.5-2		1.8
W	1.3-1.5		0.2

Завершена метрологическая аттестация методики измерений массовых долей 22 элементов (Li, P, B, Mn, Ni, Co, V, Cr, W, Mo, Sn, Ga, Pb, Cu, Zn, Ag, Sb, As, Tl, Ge, Bi и Cd) в порошках органоминеральных проб (горные породы, рыхлые отложения, донные

осадки, почвы, золы, золото-серебряные руды) методом атомно-эмиссионной спектromетрии по способу вдувания-просыпки вещества в плазму дугового разряда и регистрацией спектров фотодиодными линейками МАЭС. Методика постоянно используется при проведении поисковых и оценочных геолого-геохимических работ.

Отличительной особенностью методики является применение компьютеризированных спектрометров и специальной обработки спектральной информации в коммерческой программе АТОМ (одномерное градуирование) и авторской программе ИПП АРДЭС многомерного градуирования. ИПП АРДЭС обеспечивает расширение списка определяемых элементов за счет более полного учета матричных влияний и спектральных помех, улучшение пределов обнаружения элементов и повышение точности результатов прямого атомно-эмиссионного анализа до III-IV категории точности по Классификации ОСТ 41-08-212-2004 Министерства природных ресурсов и экологии РФ.

3.7 Основные результаты проведённого в 2019 г. исследования

1) Проведено сопоставление минералогических особенностей месторождений разных стратиграфических уровней протерозойского времени (Чертово Корыто) и неопротерозойского (Красный). Полученные результаты подтверждают представление, что рудная минерализация месторождений золота Байкало-Патомского пояса формировалась при температурах близких к температурам зеленосланцевой фации метаморфизма (200–400° С), что позволяет отнести их к месторождениям мезотермального типа. В целом последовательность образования минеральных ассоциаций на месторождениях «сухоложского» типа близка, что свидетельствует о сходном развитии рудообразующих процессов. Однако следует отметить, что каждое месторождение имеет ряд индивидуальных черт, связанных со спецификой вмещающей толщи и степенью проявленности метаморфизма.

2) Интерполяция предложенной модели формирования золоторудных месторождений Бодайбинского синклинория, на золоторудных месторождениях Угахан и Голец Высочайший, позволила составить «программу бурения 2018-2019», в результате которой компания получила значительный прирост запасов и ресурсов.

3) Установленные вариации изотопных характеристик серы в сульфидах месторождений Бодайбинского района позволяют предполагать возникновение изотопной гомогенизации серы сульфидов в ходе крупного термально-флюидного события, связанного с формированием куполов зонального метаморфизма в окружении Бодайбинского синклинория (Мамско-Оронский плутоно-метаморфический пояс).

4) Изучение вариаций изотопной системы $^{238}\text{U}/^{235}\text{U}$ в метаосадочных породах Байкало-Патомского прогиба, позволило восстановить изменение окислительно-восстановительных условий в осадочном палеобассейне на этапе осадконакопления. Обоснованно, что возможная исходная неоднородность по изотопному составу U пород-источников кластогенного материала, по-видимому, не вносила значимый вклад в вариации изотопного $^{238}\text{U}/^{235}\text{U}$ в осадочных толщах БПП.

5) По результатам комплексной геофизической и мультиспектральной съемки доказано преимущество комплексных беспилотных съемок, позволяющее более оперативно и с низкими затратами, создавать крупномасштабную высокоинформативную картографическую основу для последующих поисков золотого оруденения. При выполнении БПЛА-геофизических работ в пределах Бодайбинского синклинория следует всегда выполнять комплексную съемку, где гамма-съемка картирует перспективные вещественно-структурные комплексы, а магнитная позволяет выделять в их пределах

зоны концентрации сульфидной минерализации. Роль мультиспектральной фотосъемки в таком случае заключается в возможности создания высокодетальных моделей рельефа для полетов на сверхнизких высотах, и в обеспечении корректной интерпретации данных гамма-съемок в условиях повсеместного распространения участков ландшафтов, техногенно нарушенных в результате геологоразведки или эксплуатации.

6) Последовательность формирования рудной минерализации Средне-Голготайского месторождения показывает, что гидротермальный процесс на рассматриваемом месторождении был многоактным, а растворы, генерирующие золото-висмутное оруденение на ранних стадиях рудного процесса, имели не только мышьяковую специализацию, но и борную. При этом следует отметить двойственное поведение бора в формировании Средне-Голготайского месторождения

7) Представлены новые разработки в области микроминералогии благородных металлов (БМ) с использованием сцинтилляционной дуговой атомно-эмиссионной спектроскопии (САЭС). За счет корректного выбора аналитических линий, записываемых в сцинтилляционном режиме, в порошковых пробах выполняется одновременное определение валовых содержаний всех БМ – Au, Ag, Pt, Pd, Ir, Os, Rh, Ru на уровне 1-50 ppb, а также элементов-спутников золоторудных месторождений.

4 РЕЗУЛЬТАТЫ, ПОЛУЧЕННЫЕ В 2020 Г.

Целью исследований 2020 года было выявление условий изменения металлогении в геологической истории Земли.

Задачи проекта: изучение геологических, минералогических, геохимических и физико-химических параметров формирования благороднометалльного оруденения месторождений неопротрозойского возраста (Сухой Лог).

В 2020 г. работы проводились на территории двух основных и традиционных регионов работ лаборатории – Байкало-Патомском и Монголо-Забайкальском с привлечением отдельных материалов из других районов Сибири и Востока России. Основной акцент исследований был сделан на комплексном геологическом, минералого-геохимическом и геофизическом исследовании золоторудных объектов и потенциальных площадей с отработкой методов получения новых данных по генезису рудной минерализации и связях ее с процессами осадконакопления, метаморфизма и магматизма.

Для проведения и обработки результатов геофизических исследований разработана и апробирована методика низковысотной съемки с мультикоптеров и разработан метод геоинформационного подхода к оценке перспектив площади исследований и выделению наиболее перспективных.

Важным аспектом работ было вовлечение студентов ИРНИТУ в исследования в рамках проекта и дополнительных прикладных работ.

4.1 Механизмы рудообразования и модель формирования месторождений Сухоложского типа (Бодайбинский район)

Проведены комплексное исследование руд и рудовмещающих пород промышленных золоторудных месторождений Бодайбинского золотоносного района Байкало-Патомского нагорья. Рассмотрена изотопно-геохимическая и минералогическая эволюция золоторудной минерализации сухоложского типа. Предложена геолого-генетическая модель, характеризующая сочетание седиментогенного и метаморфогенного преобразования терригенных рудовмещающих комплексов в неопротрозойской-раннепалеозойской истории месторождения [77].

Результаты изучения крупного месторождения Красное, а также сопоставление их с ранее выполненными исследованиями других орогенных золоторудных месторождений Байкало-Патомского нагорья, включая месторождение гигант Сухой Лог, позволяют выделить главные (минералогические, геохимические и изотопно-геохимические) черты для месторождений «сухоложского» типа.

1. В локализации крупных орогенных месторождений золота «сухоложского» типа отчетливо проявлена их приуроченность к определенным стратиграфическим горизонтам черносланцевых толщ Байкало-Патомского нагорья. Рудовмещающими для них являются породы хомолхинской (например, Сухой Лог и Голец Высочайший) и аунакитской (например, Вернинское, Невское и Красное) свит, которые по сравнению с метаосадочными породами других свит патомского комплекса характеризуются сидеро-халькофильной специализацией и повышенным содержанием золота.

2. Рудная минерализация орогенных месторождений золота Байкало-Патомского пояса формировалась при температурах близких к температурам зеленосланцевой фации метаморфизма (200–400° С), что позволяет отнести их к месторождениям мезотермального типа [78].

В целом последовательность образования минеральных ассоциаций на месторождениях «сухоложского» типа близка, что свидетельствует о сходном развитии рудообразующих процессов, в соответствии с рисунком 1. На ранней (диагенетическое и катагенетическое преобразование рудоносных толщ) низкотемпературной стадии формировался фрамбоидальный и микрозернистый пирит (I и II), с равномерно распределенными по поверхности наночастицами самородного золота. Более поздняя высокотемпературная ассоциация рудных минералов, включающая арсенопирит, пирротин, пирит-III, самородное золото, галенит, сфалерит, блеклые руды, связана с развитием регионального метаморфизма зеленосланцевой фации. На пострудной стадии происходит кристаллизация пирита-IV в кварц-карбонатной оторочке.

3. Из геохимических данных следует, что при формировании рудной минерализации, не происходило значимого привноса флюидом K, Na, Mg и Si в зоны рудоотложения. Вероятней всего, рудный флюид на момент формирования оруденения находился в пределах рудной структуры и в процессе оруденения перераспределялся *in situ*, не изменяя общий баланс компонентов во вмещающих породах. Это согласуется с гидротермальными моделями, предложенными для Сухого Лога в работах [44, 79, 80]

4. Данные об изотопном составе серы и свинца в сульфидах из руд месторождения Красное свидетельствует о преимущественном поступлении минералообразующих компонентов во флюид из вмещающих неопротерозойских метаосадочных толщ. Это согласуется с представлениями о том, что метаосадочные толщи играли ведущую роль, как источник вещества, при формировании золоторудной минерализации месторождений «сухоложского» типа [80-83].

Minerals	I	II (T< 200) (P~1-2 Kbars)	III (T=300-380) (P~5-6 Kbars)	IV (T=270-320) (P~0,5 Kbars)	V (T< 180) (P<0,5 Kbars)	VI
Calcite						
Siderite, ankerite						
Quartz <i>regeneration</i>						
Quartz						
Pyrites						
<i>globular pyrites-I</i>						
<i>small idiomorphic pyrites-II</i>						
<i>large metacrystals pyrites-III</i>						
<i>idiomorphic pyrites-IV</i>						
Arsenopyrite						
<i>arsenopyrite-I</i>						
<i>arsenopyrite-II</i>						
Gersdorffite						
Pyrrhotite						
<i>pyrrhotite-I</i>						
<i>pyrrhotite-II</i>						
Chalcopyrite						
Sphalerite						
Galena						
Tennantite						
Tetrahedrite						
Gold						
<i>Hypergenic Covellite</i>						
Goethite, hydrogoethite						

Рисунок 20 – Схема последовательности формирования рудной минерализации месторождения Красное

5. Повышенные содержания золота (до 1 г/т) в битумоидах, выделенных из пород аунакитской виты, дает основание предположить, что на стадии диагенетического и катагенетического преобразования рудоносных толщ органический флюидом мог играть важную роль в концентрировании и перераспределении золота.

В то же время, можно отметить и ряд индивидуальных черт, характерных для месторождения Красное. Прежде всего, это широкое распространение в рудах арсенопирита по сравнению с рудами месторождения Сухой Лог и Голец Высочайший, локализованных в толщах хомолхинской свиты. По этому признаку месторождение Красное сходно с месторождениями Вернинское и Невское, которые также расположены в метаосадочных породах аунакитской свиты. По-видимому, наличие в рудах этих месторождений арсенопирита является следствием первичного обогащения мышьяком пород аунакитской свиты.

Таким образом, основное отличие рассматриваемой модели от предлагаемых ранее [44, 82, 84], заключается в наличии предрудного этапа перераспределения золота и сопутствующих элементов совместно с органическим флюидом на этапе катагенетических преобразований вмещающих отложений.

Рассмотрены минералого-петрографические и геохимические характеристики золоторудного месторождения Угахан с целью создания схемы формирования минералогических ассоциаций, вписанной в общую геодинамическую эволюцию Бодайбинского региона. Установлены три генерации карбонатных минералов, образованные в разное время и связанные с различными этапами формирования месторождения. В пределах месторождения повсеместно отмечается также развитие агрегатов регенерационного кварца. Особенно масштабно данное явление наблюдается в верхних пачках бужуихтинской свиты, сложенных кварцевыми песчаниками. Формирование минеральных ассоциаций на месторождении происходило несколько стадий. На ранней стадии формировался фрамбоидальный и мелкий идиоморфный пирит (I и II), позже была образована ассоциация, включающая арсенопирит, пирротин, пирит-III, самородное золото, галенит, сфалерит, блеклые руды. В пострудную стадию кристаллизовался пирит-IV в кварц-карбонатной оторочке. Изученная последовательность минералообразования однотипна месторождениям Красный и Сухой Лог, что позволяет предполагать ее формирование в результате сходных рудообразующих процессов. Локализация руд месторождения Угахан в отложениях бужуихтинской свиты позволяет считать данное стратиграфическое подразделение перспективным для дальнейших поисков в нем месторождений золота. Однако, содержание мышьяка в этих отложениях на порядок ниже чем в пределах других рудовмещающих толщ Бодайбинского региона, что предполагает его исключение из поисковых характеристик в границах данного стратоевровня [85].

Установлена последовательность формирования пирит-пирротиновой минерализации в пределах месторождения Голец Высочайший, которая по своим ключевым характеристикам оказалась аналогичной последовательности формирования типов пирита месторождений Сухой Лог, и Красный также расположенных в пределах Бодайбинского района [77, 44], что свидетельствует о развитии рудообразующих процессов, по сходному сценарию [86, 87].

4.2. Модель формирования и критерии поисков золоторудных объектов, приуроченных к палеопротерозойским черносланцевым толщам Нечерского поднятия (Иркутская область)

Предложена трехэтапная (седиментационно-метаморфогенно-тектоногенная) генетическая модель на примере Ходоканской площади Нечерского поднятия, потенциальные рудные объекты которой представляют собой систему крутопадающих или субвертикальных локальных зон разуплотнения, вмещающих сульфидную (пирит, пирротин) минерализацию и значительное количество углерода, возможно урановую минерализацию. Они являются контрастными по отношению к вмещающим породам по целому ряду признаков: магнитным свойствам, электросопротивлению и, особенно, поляризуемости, весьма вероятно – радиоактивности (уран?). Визуально они проявляются в виде сильно лимонитизированных выходов пород, однако по большей части рудные объекты не выходят на дневную поверхность, в связи с чем, роль геофизических методов при их поисках будет велика [88].

Данное исследование посвящено оценке перспектив черносланцевых отложений ходоканской свиты, мощность которой в пределах ходоканской площади достигает ~400м. Отложения формации смяты в крупные и мелкие складки разного порядка. Наименее измененные породы формации метаморфизованы в условиях хлорит-серицитовой субфации фации зеленых сланцев. Более детальное изучение отложений ходоканской свиты производилось по выходу коренных пород в среднем течении р. Малый Ходокан, в соответствии с рисунком 21. Образцы отбирались с детальностью, достаточной для получения статистически значимой информации относительно распределения минерализации и геохимического распределения рудных и сопутствующих элементов. В пределах указанного выхода отложений ходоканской свиты, была обнаружена зона тектонического нарушения (ЗТН), мощность которой колеблется от 0,2 – до 0,5 м, с раздувами до 0,7 м. В пределах данной структуры отмечается визуальное повышение органического вещества, что выражается в более темном цвете породы, а также появление видимой невооруженным глазом сульфидной минерализации.

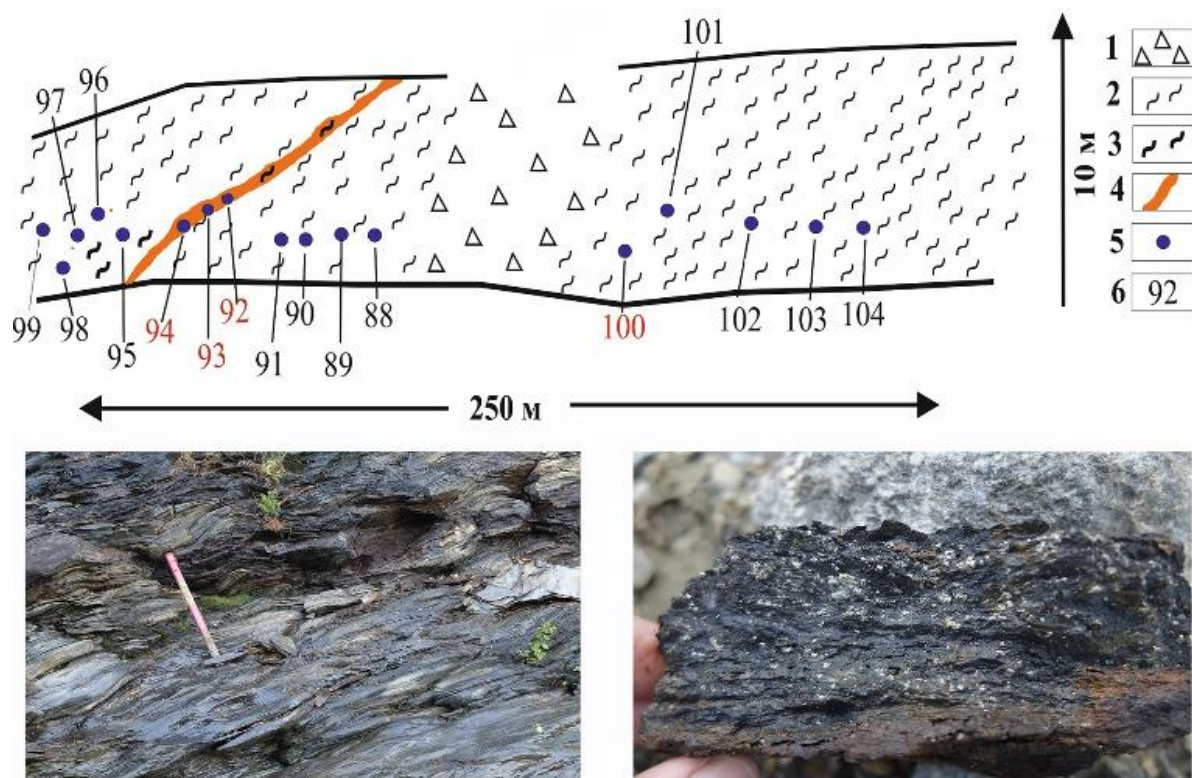


Рисунок 21 – Схема коренного выхода отложений ходоканской свиты. 1 – эллювиально-деллювиальные отложения; 2 – серицитовые сланцы; 3 – углеродсодержащие сланцы; 4 – существенно сульфидизированная зона; 5 – точка отбора; 6 – порядковый номер образца

В пределах исследуемых выходов пород свиты, отложения представлены мелкозернистыми, серыми и зеленовато-серыми полимиктовыми песчаниками; углеродистыми, серыми кварцево-сланцевыми сланцами; зелеными хлорит-кварцевыми слюдястыми сланцами, окварцованными метаалевролитами. Отложения в пределах всей стенки коренного выхода сходны по своему составу, независимо от принадлежности к ЗТН.

Сульфидизация в породе наблюдается в виде равномерно распределенной по массе пород рассеянной мелкозернистой вкрапленности пирротина с единичными знаками, сфалерита и халькопирита в резко подчинённом количестве отмечается пирит.

В пределах зоны тектонических нарушений (ЗТН) отмечается существенное обогащение сульфидными минералами и углеродистым веществом. Порода здесь представлена хлорит-серицитовым сланцем с прожилками карбонат-кварцевого состава и значительным количеством сульфидных минералов (5 – 10 %). Вторичные минералы: гидроксиды железа (лимонит, гидрогётит).

Сульфидная минерализация представлена пиритом (более 90% сульфидов), марказитом, пирротинном, халькопиритом. Кроме сульфидных минералов, повсеместно отмечается рутил.

Для более обоснованного утверждения ведущей роли в рудном процессе отложений ходоканской свиты, было произведено изучение распределения петрогенных, редких и благороднометалльных элементов в обозначенных толщах. Установлено, что отложения ходоканской свиты, которые имеют резкое отличие практически по всем основным показателям от стратиграфически вышележащих отложений региона. Наиболее характерным является увеличение содержаний Fe_2O_3 , SO_2 , MnO и P_2O_5 .

По распределению редких элементов, отложения ходоканской свиты, относительно стандарта черных сланцев Байкальской горной области (SCHS-1) [89] отличаются повышенными содержаниями Sn, Mo, Ag, Sr, Sb, Pb, As и Au. Данный набор элементов сопоставим с прочими породами кевактинского горизонта, которые являются стратиграфическим аналогом отложениям ходоканской свиты. Согласно работе [1, 90], такая геохимическая характеристика предполагает накопление садков при участии синхронной гидротермальной деятельности на начальных этапах развития рифтогенеза, что подтверждает геодинамические построения В.С. Федоровского [91].

Результаты анализа метасоматически измененных пород, отобранных в пределах ЗТН, показали, что с увеличением количества углерода возрастает общее содержание и размерность частиц золота, в соответствии с таблице 2.

Таблица 2 – Содержания золота и углерода в пробах сланцевых отложений

№ п.п.	Образец	Au г/т						C, 10 ⁻⁴ мас. %	Сорг. %
		общее число частиц шт.	Распределение частиц по диаграммам (мкм), %						
			2-6	6-10	10-16	16-22	>22		
1	88/17	7	85,7	14,3	0	0	0	0,01	0,3
2	89/17	4	100	0	0	0	0	0,008	0,13
3	90/17	7	100	0	16,7	0	0	0,01	0,17
4	91/17	14	100	0	0	0	0	0,015	0,3
5	92/17	16	75	0	0	0	0	0,05	9,89
6	93/17	10	100	0	0	0	0	0,01	5,51
7	94/17	13	53,8	15,4	15,4	7,7	7,7	0,09	9,56
8	98/17	4	75	25	0	0	0	0,01	0,5
9	101/17	6	100	0	0	0	0	0,005	0,63
10	102/17	10	100	0	0	0	0	0,01	0,63
11	103/17	2	100	0	0	0	0	0,002	0,19
12	95-97;99;100/17	3	100	0	0	0	0	0,005	0,55

Примечание: Au – методом САЭС, аналитик д.г.-м.н. Е.В. Шабанова, Сорг – методом ААА, аналитик П.Т. Долгих

Согласно полученным петрографическим и минералогическим данным, можно сделать предварительные выводы относительно стадийности формирования рудной минерализации пород в ЗТН. Учитывая одинаковый набор породообразующих минералов

как в ЗТН, так и в обнажении за ее пределами, можно констатировать перераспределение вещества в ослабленную зону без участия внешнего источника. Предварительный минераграфический анализ позволяет проследить следующую последовательность минералообразования: 1) пирит-I → 2) пирротин → 3) пирит-II → 4) сфалерит, халькопирит, марказит

Согласно полученной минералогической эволюции в пределах отдельно взятого обнажения ходоканской свиты, выстраивается следующая последовательность:

1) Этап седиментации при синхронном обогащении отложений в результате гидротермальной деятельности в обстановке рифтогенного растяжения бассейна осадконакопления. На данном этапе формируются отложения с повышенным содержанием Au, Сорг, а также элементов сидеро-халькофильной специализации. При этом в пределах отложений ходоканской свиты отмечается значительное количество равномерно распределенного мелкозернистого пирита-I.

2) Вторым этапом развития отложений является процесс развития пирротина по пириту-I. Данный процесс в условиях температур, не превышающих зеленосланцевой фации (появление биотита в изучаемых породах) возможен как результат пирротинизации пирита-I в присутствии углеродистого вещества [77, 92]. Согласно [44, 82] данный процесс сопровождается формированием углекислого флюида, а также свободного углерода катагенной природы. При этом во флюид переходит значительное количество высвободившихся S, а также прочих элементов, первично связанных с ранним пиритом, в том числе Au, Ag, Pb, Zn, Ni.

3) В результате последовавшего позже раскрытия замкнутой системы, связанной с тектонической активизацией, полученный флюид обогащенный S, Au и полиметаллической ассоциацией элементов устремился в зону наименьших температур и давлений. В результате в ЗТН формируется пирит-II близодновременно с формированием полиметаллической сульфидной минеральной ассоциации. При этом золото укрупняясь в размерах восстанавливается на сформированном пирите-II.

Таким образом можно предложить эксгалляционную модель миграции рудообразующих растворов с учетом структурного контроля гидротермальных потоков, согласно которой разломы играли роль растворосорбирующих, дренирующих структур. Согласно работе Сафонова с соавторами [93] такой процесс дренирования происходит в результате воздействия на равномерно восходящий поток растворов вертикального высокопроницаемого разлома, проникающего в массив фильтрационно однородных пород до некоторой глубины L.

4.3. Рудная минерализация в плейстоценовых отложениях пролива Лонга (Восточно-Сибирское море)

Для разработки генетической модели формирования обогащенных благородными металлами горизонтов осадочных комплексов были проведены исследования двух горизонтов рудной минерализации в плейстоценовых донных осадках арктической пассивной континентальной окраины в Чукотском море.

Проведено минералого-геохимическое исследование позднеплейстоценовых донных отложений колонки LV 77-10, отобранной в центре пролива Лонга. Установлены два интервала, обогащенных Au, Pd, Ag, различающихся по химизму осадков. Методом сканирующей электронной микроскопии с рентгеноспектральным микроанализом в них был установлен широкий спектр рудных минералов, включая наиболее распространенный пирит-марказит, а также арсенопирит, халькопирит, халькозин, самородные Au, Ag, Pb, акантит и сложные фазы Fe–Ni–Cr, Ag–Cu–Pb–Zn.

По результатам минералогических исследований можно судить о присутствии минеральных форм рудных элементов, As и S в изученных “рудных” прослоях, что подтверждается геохимическими данными. Это сопоставимо с минеральными формами рудных элементов пермских терригенных пород Яно-Колымского орогенного пояса [95], осадочные бассейны которого имеют определенное геохимическое сходство с современным бассейном Чукотского моря [96].

Собственные минеральные формы благородных металлов и сульфидов железа достаточно обычны как в мелководных шельфовых морских отложениях, так и в глубоководной обстановке [97, 98]. Наши находки сульфидов железа среди слабо литифицированных горизонтов морских осадков, обогащенных серой, равно как и глобулярная их морфология, свидетельствуют о первично осадочном происхождении фрамбоидального пирита, известного во многих сланцевых толщах разного возраста. Мы полагаем, что исследованные осадки представляют собой дельтовые отложения палео-Колымы, современное устье которой находится не так далеко от позиции изученного разреза, а по рельефу дна палеодолина прослеживается как в Восточно-Сибирском море, так и в проливе Лонга [99]. Это предполагает возможный вынос благородных и рудных элементов рекой в форме химических соединений и осаждение их в прибрежно-морской зоне. Об этом, в частности, свидетельствуют находки сростков микрокристаллов акантита, формы срастаний которых свидетельствуют об их кристаллизации из раствора.

Результаты исследования остатков древесины также указывают на возможность разноса самородных металлов и в виде сорбированных частиц, с захоронением их вместе с крупными древесными остатками, которые в дальнейшем при полной литификации

отложений бассейна превращаются в обогащенные углеродом и благородными металлами слои.

Анализ полученных результатов проведенных исследований предполагает в арктических бассейнах современной пассивной континентальной окраины существование условий для образования горизонтов, обогащенных благородными металлами, источниками которых могут являться как крупные реки, так и зоны рассеянного рифтогенеза, установленные восточнее в котловине Чукотского моря [100]. В обоих случаях возможно формирование потенциально рудоносных осадков при их литификации и метаморфизме.

Наши исследования показали, что в изученном разрезе позднеплейстоценовых дельтовых осадков выявлены два уровня с повышенными концентрациями Fe, S, As, Au и Pd, в которых обнаружены самородные Au и Ag, фаза состава близкого к Ag_2S , пирита (марказита?), арсенопирита, фазы сложного состава (Ag–Pb–Cu–Zn, Ag–Cu). Это свидетельствует о том, что в арктических бассейнах современной пассивной континентальной окраины возможно формирование обогащенных благороднометалльной минерализацией горизонтов. Благородные металлы при их формировании могли как накапливаться в собственных минеральных формах (Au, Ag), локализованных в древесных остатках, так и образовывать сульфидные минералы (Ag) при химических реакциях растворенных форм [101].

4.4 Эволюция процессов минералообразования (Восточное Забайкалье)

С точки зрения эволюции золоторудной минерализации в процессе формирования крупных орогенных структур, рассмотрены особенности формирования золотой минерализации Средне-Голготайского месторождения Восточного Забайкалья. Показано полистадийное формирование руд от ранних золото-висмут-кварцевых ассоциаций, через турмалин-полисульфидную, к поздним сульфосолюно-карбонатным [102]. Средне-Голготайское золоторудное месторождение Восточного Забайкалья является одним из ярких представителей жильных рудных объектов гранито-генного золото-висмутового типа Востока России. Пространственно и генетически рудно-магматические системы таких месторождений генетически связаны с магматическими комплексами I-S типа, как это проявлено не только в Восточном Забайкалье и на Северо-Востоке России, но и в структурах золото-рудного пояса Тинтина восточной части Центральной Аляски.

Широко развитая в рудах месторождения висмутовая и теллуридная минерализация тесно ассоциирует с золотым оруденением. Эта минерализация представлена преимущественно минеральными системами Pb-Bi-Sb-S и Bi-Te-S, в составе которых выделяются следующие минеральные соединения: твердый раствор висмута – стибнита; сурьмяно-висмутовые сульфосоли свинца (сурьмянистый лиллианит, сурьмянистый кобеллит, сурьмянистый галеновисмутит, яскульскиит, минералы изоклейкит-гиссенитовой и тинтинаит-кобеллитовой гомологических серий, висмутовый джемсонит, висмутсодержащий буланжерит, висмутсодержащий тинтинаит, а также сульфотеллуриды висмута (жозеит-А, жозеит-В, минерал X, близкий по составу к фазе Bi_2TeS_2 , минералы переменного состава тетрадимит-ингодитового ряда).

Проявленные на месторождении ассоциации минералов Bi-Te-S и Pb-Bi-Sb-S систем отражают эволюционную направленность развития процесса рудогенеза и временную последовательность кристаллизации минералов: сульфиды висмута и сульфотеллуриды висмута → сложные Bi-Sb сульфосоли свинца → простые сульфоантимониты свинца. Формирование выделенных ассоциаций минералов обусловлено пространственной совмещенностью и временной близостью ранней Au-Bi и поздней собственно сурьмяной минерализаций в процессе эволюционного развития единой рудно-магматической системы. В качестве одного из возможных механизмов формирования Bi-Sb сульфосолей свинца предполагается заимствование Bi из руд ранней Au-Bi стадии гидротермальным флюидом, обогащенным Pb и Sb, с последующей мобилизацией и перераспределением этих элементов в частично растворенной или расплавленной форме.

Пространственное совмещение в пределах рудных тел высокотемпературных разностадийных образований с различными по составу минералами системы Pb-Bi-Sb-S является характерной особенностью не только гранитогенных жильных золоторудных месторождений Au-Bi типа, но и Cu-W скарновых рудных объектов Дальнего Востока России (Восток-2, Лермонтовское, Агылки и др.).

Рассмотрена металлогеническая специфика Монголо-Охотского складчатого пояса, построена сводная модель многомерных геохимических полей по потокам рассеяния пространственного положения золоторудных месторождений Карийского рудного узла [103, 104].

Главной целью выполненной работы является попытка проследить эволюцию рудно-магматической системы (РМС) через смену ассоциаций минералов в пределах месторождения золота Пильненское (Восточное Забайкалье), с возможностью использования полученной информации для разбивки комплексного геохимического ореола рудного узла на зоны соответствующие пространственному положению ассоциаций минералов той, или иной стадии рудного процесса.

По результатам работ выделено две группы минеральных ассоциаций отражающих существование двух этапов рудообразования, связанных с эволюции единой магматической системы.

Первый этап рудообразования является редкометалльным и контролирует рудный объект вольфрамит-молибденит-кварцевой рудной формации. В его пределах выделяются кварц-магнетитовая, кварц-вольфрамит-молибденитовая и карбонатная-сидеритовая стадии минерализации, соответствующие этапам развития РМС.

Минеральные ассоциации связанные со вторым этапом рудообразования наложены на первую. Он также является редкометалльным и контролирует объект золото-редкометалльной рудной формации. В его пределах выделяются кварц-пирит-турмалиновая, кварц-молибденит-шеелитовая, пирит-халькопирит-сульфоарсенидная, золото-висмутотеллуридная стадии минералообразования соответствующие этапам развития РМС. Отнесение объекта к золото-редкометалльной рудной формации значительно повышает перспективы Пильненского месторождения и Карийского рудного узла в целом в отношении золоторудной минерализации.

Золотая минерализация свойственна только рудному объекту связанному со вторым этапом рудообразования. Она появляется вместе с В, фиксирующим поступление вещества из-за пределов магматической камеры. Наиболее вероятным источником Au и В

является мантийный домен, образовавшийся при взаимодействии адакитовых магм с перидотитами верхней мантии.

Геохимическая характеристика руд и минералов позволяет выделить ассоциации химических элементов характеризующих этапы эволюции РМС и использовать эту информацию для выделения локальных зон комплексного геохимического ореола.

Полученные материалы были использованы для апробации нового методического подхода по расшифровке эволюции рудно-магматических систем (РМС). 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 Карийского рудного узла (Восточное Забайкалье).

Выполненный анализ особенностей состава и последовательности выделения геохимических полей позволил более детально взглянуть на эволюцию Карийской РМС. Было установлено, что мы имеем дело с сильно эродированной редкометалльной РМС, сформированной в два этапа рудообразования. Первый этап рудообразования связан с эволюцией верхней магматической камеры (апикальной части Кара-Чачинского массива). Главным полезным компонентом этой РМС был Мо.

Второй этап развития РМС связан с эволюцией нижней магматической камеры. Эта минерализация также являлась редкометалльной, ее профилирующими элементами были W и Мо, однако главным полезным компонентом является Au.

Было установлено, что Au мобильно на двух этапах эволюции поздней РМС и накапливается при наложении одной стадии минерализации на другую.

В качестве источника Au могут рассматриваться гранитоиды Кара-Чачинского массива. Не менее вероятной является гипотеза о поступлении его вместе с В, с нижних уровней магматической системы, либо в составе трансмагматических флюидов из-за ее пределов.

Охарактеризованы метасоматические породы золотоносного медно-порфирового месторождения Их-Салаа (Монгольский сектор Монголо-Охотского орогенного пояса). Выявлена зональность метасоматических изменений, отражающая общую зональность оруденения, в соответствие с классической схемой, присущей порфировым системам. Показана четкая приуроченность медной минерализации к серицит-кварцевым метасоматитам, а благороднометалльного оруденения к алунит-кварцевым и аргиллизитовым метасоматитам.

4.5 Геохимические особенности цирконов Ангаро-Витимского супербатолита и Яно-Колымского орогенного пояса

Проведено исследование гранитоидов двух регионов – палеозойского Ангаро-Витимского супербатолита и позднемезозойского Яно-Колымского орогенного пояса. В первом случае исследованы цирконы раннепалеозойских гранитоидов ареала Ангаро-Витимского батолита. Проведенный анализ состава по редким элементам циркона из раннепалеозойских известково-щелочных гранитов на территории АВБ позволил выделить две разновидности этого минерала – магматическую и преобразованную, возможно гидротермального генезиса. Несмотря на то, что обе выделенные разновидности циркона имеют геохимические характеристики состава, свойственные циркону магматического генезиса, однако, между ними наблюдаются устойчивые различия в распределении ряда редких и редкоземельных элементов.

“Магматический” тип распределения REE в полной мере присущ центральным областям циркона, которые имеют однородное строение в обратно-рассеянных электронах (BSE) и умеренное содержание элементов-примесей. Краевые участки и измененные зоны циркона отличаются от них практически горизонтальными спектрами в области легких и средних REE за счет повышенного содержания этих элементов. Эта разновидность циркона, кроме того, отличается повышенным содержанием U, Th, Ca, Sr и Ba, положительно коррелирующих друг с другом. Такая особенность состава циркона может быть обусловлена привнесением флюида, вызвавшего метасоматическое изменение гранитов в процессе их калишпатизации. Повышенное содержание U в измененных зонах (до 4000 ppm), наряду с возросшим содержанием неформульных элементов (в первую очередь, кальция), должно приводить к росту метамиктности и, как следствие, появлению дискордантности и искажению значений U-Pb возраста циркона вплоть до невозможности их интерпретации [105]. Полученные результаты требуют корректного применения локальных методов датирования циркона, сопровождающегося минералогическим геохимическим изучением отличающихся по составу разновидностей циркона. Наложённые изменения, обнаруженные авторами в цирконах раннепалеозойских известково-щелочных гранитов, необходимо учитывать при датировании всех известково-щелочных гранитоидов БСО. Возможно, это поможет надежно разделить петротипы ранне- и позднепалеозойских этапов магматизма на данной территории [106].

В структурах осевой части Яно-Колымского складчатого пояса изучен ряд потенциально золотоносных интрузивов гранитоидов. Приведены новые данные по изотопному возрасту и изотопной геохимии ряда гранитоидных массивов. Рассмотрены вопросы эволюции гранитоидного магматизма и оруденения Яно-Колымского орогенного

пояса [107]. Получены новые изотопно-геохимические данные по ряду известных массивов S гранитов (Больших Порогов, Трубный, Чьорго), а также по трем небольшим плутонам (Делянكير, Мянунджа, Мазур) I типа, с которыми ассоциирует золоторудная минерализация. U-Pb датировки с применением лазерной абляции показали для массива Большие Пороги дату 152.9 ± 3.4 млн лет, близкую, полученной ранее методом SHRIMP (155 ± 2.4 млн лет – [108]). В то же время I-граниты небольшого плутона Мазур, локализованного рядом с Чай-Юрьинским разломом, оказались несколько моложе (149.5 ± 7.2 млн лет), но в пределах ошибки значимо не различаются, и они практически идентичны гранодиоритам, расположенного восточнее Салгынтарского массива, а также ильменитовым гранитоидам басугуньинского комплекса I-типа [108-110]. Изученные гранитоиды оказались весьма близкими по распределению редких, рассеянных и редкоземельных элементов, а также по параметрам Sm-Nd изотопной системы. Так по ϵ_{Nd} гранитоиды S типа = $-3.06 \div -15.01$ и I типа = $-1.96 \div -9.69$ практически идентичны, а по Sr0 – S тип $0.70803-0.70974$ и I тип $0.071158-0.71213$ несколько различаются, но относятся к типично коровым образованиям с модельным возрастом протолита T(DM-2) 2.2-1.1 млрд лет, близким к датам (около 1.8 млрд лет) унаследованных доменов в цирконах массивов Чьорго, Малый Анначаг и Труд. Полученные результаты дополняют представления о генетическом единстве разнотипных гранитоидов Главного Колымского батолитового пояса как составных частей крупной изверженной провинции.

4.6 Формирование полного комплекса геофизических методов на базе низковысотных БПЛА

В рамках работ по геофизическому направлению с применением беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) рассмотрены проблемы их использования в геофизических и геологических целях. Выделены этапы их применения для решения геологических задач в реальных случаях. На первом этапе геологического изучения эффективен комплекс БПЛА-магнитных, гамма- и ОНЧ-съемок. После выявления перспективных участков предложено использовать БПЛА-ТДЭМ, с которым, при необходимости, можно совместить гамма-спектрометрию. Дальнейшее совершенствование обеих систем ЭМ лежит в технической плоскости (например, в настоящее время разрабатывается новый АЦП для БПЛА-TDEM с частотой дискретизации около 800 кГц, что позволит нам получить гораздо лучшие кривые зондирования и улучшить качество инверсия), и не представляет для нас никаких сложных научных проблем. Важно отметить, что конструкция подвески приемного датчика имеет решающее значение для получения качественных данных электромагнитных зондирований. Если приостановка не подходит, никакая программная обработка не позволит получить пригодные для использования данные. Однако, решив в целом проблему сбора электромагнитных данных, являющихся поистине «большими геоданными», мы сразу же столкнулись с проблемой их быстрой обработки. Актуальной задачей следующего этапа развития БПЛА-ЭМ является создание программ для быстрой обработки и 3D-инверсии тысяч точек измерения, поскольку только этот вариант обработки позволяет в полной мере реализовать преимущества технологий беспилотной ЭМ-съемки. Тем не менее, мы считаем, что создание технологии UAV-TDEM представляет собой новую веху в развитии низковысотной геофизики на базе БПЛА, что в ближайшем будущем повлияет на изменение рынка геофизических исследований в России. Усовершенствованный вариант БПЛА-ТДЭМ планируется использовать при поисках урановых месторождений, а уже в этом - в задачах инженерной геофизики [111].

На примере перспективного участка черносланцевого золоторудного оруденения, рассмотрены метод комплексной геофизической съемки БПЛА и его интерпретация, включающие аэромагнитную съемку, гамма-радиометрию и мультиспектральную съемку с акцентом на важность качественной интерпретации геофизических данных для последних. Аэрофотосъемка с помощью БПЛА необходима для выявления техногенных участков местности и оценки распределения растительности в ней, что позволяет корректировать графики гамма-фона. Показано, что использование комплексных

низковысотных съемок с БПЛА позволяет быстро и дешево идентифицировать потенциальные золотоносные участки по набору косвенных признаков [112].

4.7 Основные результаты проведённого в 2020 г. исследования

Полученные результаты в целом отражают выполнение плана работ по теме на 2020 год. К числу важнейших результатов института следует отнести материалы статьи опубликованной коллективом авторов во главе со старшим научным сотрудником Ю.И.Тарасовой [14] в журнале первого квартиля WOS. Всего было опубликовано 5 статей в журналах WOS и 4 статьи в SCOPUS, 2 статьи в журналах ВАК и 1 статья в материалах конференции в РИНЦ. Эти публикации также отражают и результаты нашей научных связей с исследователями Москвы, Санкт-Петербурга, Владивостока и Магадана.

1. Проведено сопоставление минералогических особенностей месторождений разных стратиграфических уровней протерозойского времени (Чертово Корыто) и неопротерозойского (Красный). Полученные результаты подтверждают представление, что рудная минерализация месторождений золота Байкало-Патомского пояса формировалась при температурах близких к температурам зеленосланцевой фации метаморфизма (200–400° С), что позволяет отнести их к месторождениям мезотермального типа. В целом последовательность образования минеральных ассоциаций на месторождениях «сухоложского» типа близка, что свидетельствует о сходном развитии рудообразующих процессов. Однако следует отметить, что каждое месторождение имеет ряд индивидуальных черт, связанных со спецификой вмещающей толщи и степенью проявленности метаморфизма.

2. Установленные вариации изотопных характеристик серы в сульфидах месторождений Бодайбинского района позволяют предполагать возникновение изотопной гомогенизации серы сульфидов в ходе крупного термально-флюидного события, связанного с формированием куполов зонального метаморфизма в окружении Бодайбинского синклинория (Мамско-Оронский плутоно-метаморфический пояс).

3. По результатам комплексной геофизической и мультиспектральной съемки доказано преимущество комплексных беспилотных съемок, позволяющее более оперативно и с низкими затратами, создавать крупномасштабную высокоинформативную картографическую основу для последующих поисков золотого оруденения. При выполнении БПЛА-геофизических работ в пределах Бодайбинского синклинория следует всегда выполнять комплексную съемку, где гамма-съемка картирует перспективные вещественно-структурные комплексы, а магнитная позволяет выделять в их пределах зоны концентрации сульфидной минерализации. Роль мультиспектральной фотосъемки в таком случае заключается в возможности создания высокодетальных моделей рельефа для полетов на сверхнизких высотах, и в обеспечении корректной интерпретации данных

гамма-съемок в условиях повсеместного распространения участков ландшафтов, техногенно нарушенных в результате геологоразведки или эксплуатации.

4. Последовательность формирования рудной минерализации Средне-Голготайского месторождения показывает, что гидротермальный процесс на рассматриваемом месторождении был многоактным, а растворы, генерирующие золото-висмутовое оруденение на ранних стадиях рудного процесса, имели не только мышьяковую специализацию, но и борную. При этом следует отметить двойственное поведение бора в формировании Средне-Голготайского месторождения

5 ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ПРОВЕДЁННЫХ В 2017-2020 ГГ. ИССЛЕДОВАНИЙ

1. Полученные результаты подтверждают представление, что рудная минерализация месторождений золота Байкало-Патомского пояса формировалась при температурах близких к температурам зеленосланцевой фации метаморфизма (200–400° С), что позволяет отнести их к месторождениям мезотермального типа. В целом последовательность образования минеральных ассоциаций на месторождениях «сухоложского» типа близка, что свидетельствует о сходном развитии рудообразующих процессов. Однако следует отметить, что каждое месторождение имеет ряд индивидуальных черт, связанных со спецификой вмещающей толщи и степенью проявленности метаморфизма.

2. Установленные вариации изотопных характеристик серы в сульфидах месторождений Бодайбинского района позволяют предполагать возникновение изотопной гомогенизации серы сульфидов в ходе крупного термально-флюидного события, связанного с формированием куполов зонального метаморфизма в окружении Бодайбинского синклиория (Мамско-Оронский плутоно-метаморфический пояс).

3. Изучение вариаций изотопной системы $^{238}\text{U}/^{235}\text{U}$ в метаосадочных породах Байкало-Патомского прогиба, позволило восстановить изменение окислительно-восстановительных условий в осадочном палеобассейне на этапе осадконакопления. Обоснованно, что возможная исходная неоднородность по изотопному составу U пород-источников кластогенного материала, по-видимому, не вносила значимый вклад в вариации изотопного $^{238}\text{U}/^{235}\text{U}$ в осадочных толщах БПП.

4. По результатам комплексной геофизической и мультиспектральной съемки доказано преимущество комплексных беспилотных съемок, позволяющее более оперативно и с низкими затратами, создавать крупномасштабную высокоинформативную картографическую основу для последующих поисков золотого оруденения. При выполнении БПЛА-геофизических работ в пределах Бодайбинского синклиория следует всегда выполнять комплексную съемку, где гамма-съемка картирует перспективные вещественно-структурные комплексы, а магнитная позволяет выделять в их пределах зоны концентрации сульфидной минерализации. Роль мультиспектральной фотосъемки в таком случае заключается в возможности создания высокодетальных моделей рельефа для полетов на сверхнизких высотах, и в обеспечении корректной интерпретации данных гамма-съемок в условиях повсеместного распространения участков ландшафтов, техногенно нарушенных в результате геологоразведки или эксплуатации.

5. Последовательность формирования рудной минерализации Средне-Голготайского месторождения показывает, что гидротермальный процесс на рассматриваемом месторождении был многоактным, а растворы, генерирующие золото-висмутовое оруденение на ранних стадиях рудного процесса, имели не только мышьяковую специализацию, но и борную. При этом следует отметить двойственное поведение бора в формировании Средне-Голготайского месторождения

Представлены новые разработки в области микроминералогии благородных металлов (БМ) с использованием сцинтилляционной дуговой атомно-эмиссионной спектрометрии (САЭС). За счет корректного выбора аналитических линий, записываемых в сцинтилляционном режиме, в порошковых пробах выполняется одновременное определение валовых содержаний всех БМ – Au, Ag, Pt, Pd, Ir, Os, Rh, Ru на уровне 1-50 ppb, а также элементов-спутников золоторудных месторождений.

6 ЗАКЛЮЧЕНИЕ

За прошедший период по основным направлениям работ получены новые результаты, в разной степени освещенные в публикациях сотрудников лаборатории. Они содержат новые оригинальные данные и результаты обобщений по хронологии развития процессов магматизма и рудообразования в пределах основных золоторудных провинций Сибири (Байкало-Патом, Забайкалье), Дальнего Востока (Яно-Колымский пояс) и Монголии, с рассмотрением металлогенической специфики Монголо-Охотского складчатого пояса на примере ряда его районов. Одним из аспектов результатов текущих работ было проведение оценки условий формирования золотого оруденения сухоложского типа с выходом на генетические особенности и продуктивность минерализации, а также рассмотрение специфики эволюции минерального состава золотого оруденения на примере Средне-Голготайского месторождения и Карийского рудного узла Забайкалья и Их-Салинского месторождения Монголии. Была также проведена комплексная обработка и интерпретация данных, полученных разными геохимическими и геофизическими методами с помощью беспилотного летательного аппарата (БПЛА). Даны критерии прогноза рудной золотоносности в Юго-Западном Прибайкалье.

Полученные результаты в целом отражают выполнение плана работ по теме на 2020 год. К числу важнейших результатов института следует отнести материалы статьи опубликованной коллективом авторов во главе со старшим научным сотрудником Ю.И.Тарасовой [14] в журнале первого квартиля WOS. Всего было опубликовано 5 статей в журналах WOS и 4 статьи в SCOPUS, 2 статьи в журналах ВАК и 1 статья в материалах конференции в РИНЦ. Эти публикации также отражают и результаты нашей научных связей с исследователями Москвы, Санкт-Петербурга, Владивостока и Магадана.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Будяк А.Е., Горячев Н.А., Скузоватов С.Ю. Геодинамические предпосылки формирования масштабного оруденения южного обрамления Сибирского кратона в протерозое // Доклады академии наук. - 2016. - Т. 470. - № 5. - С. 562–565.
2. Кряжев С.Г. Изотопно-геохимические и генетические модели золоторудных месторождений в углеродисто-терригенных толщах // Отечественная геология. - 2017. - № 1. - С. 28-38.
3. Ханчук А.И. Тимофеев В.Ю., Казанский А.Ю., Ардюков Д.Г., Метелкин Д.В., Горнов П.Ю., Шестаков Н.В., Бойко Е.В., Тимофеев А.В., Гильманова Г.З. О параметрах вращения Сибирского домена и его восточного обрамления в различные геологические эпохи // Тихоокеанская геология. - 2011. - Т. 30. - № 4. - С. 21-31.
4. Goryachev N.A., Pirajno F. Gold deposits and gold metallogeny of Far East Russia // Ore Geology Reviews. - 2014. - V. 59. - P. 123-151.
5. Parshin A., Morozov V., Blinov A., Kosterev A., Budyak A. Low-altitude geophysical magnetic prospecting based on multirotor UAV as a promising replacement for traditional ground survey (2017) // Geo-spatial Information science DOI 10.1080/10095020.2017.1420508 а
6. Паршин А.В. Комплекс для беспилотной аэромагниторазведки. Патент РФ №172078
7. Паршин А.В., Цирель В.С., Анцев В.Г. Настоящее и будущее беспилотной аэрогеофизики в России // Разведка и охрана недр. - 2017. - № 8. - С. 33-38.
8. Паршин А.В., Гребенкин Н.А., Морозов В.А., Ржевская А.К., Шикаленко Ф.Н. Первые результаты методических работ по применению беспилотных аэрогеофизических технологий на стадии поисков месторождений урана//Разведка и охрана недр. – 2017. - №11. - С.59-64.
9. Parshin A., Morozov V., Blinov A., Kosterev A., Mikhailiov A., Matitsyn V. GIS-based unmanned aerial remote sensing system and its application for geological mapping and estimation of mineral prospectivity of areas with complex landscape conditions of East Siberia // Mineral Prospectivity, current approaches and future innovations – Orléans, France, 24-26 October 2017, p.98-99 б.
10. Паршин А.В., Блинов А.В., Михалев А.О., Матыцин В.А., Просекин С.Н. Низковысотные дистанционные зондирования земли с БПЛА комплексом мультиспектральных и геофизических методов – новая методология поисков

- полезных ископаемых // Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли: материалы IV Междунар. науч. конф., Красноярск, 2017, с. 57-61 б
11. Морозов В.А., Паршин А.В. О высших секретах летного мастерства при решении геологических задач с помощью БПЛА в сложных ландшафтных условиях // Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли: материалы IV Междунар. науч. конф., Красноярск, 2017, с. 52-56
 12. Инструкция по магниторазведке. Наземная съемка, аэромагнитная съемка, гидромагнитная съемка. Ленинград: Недра, 1981. - 264 с.
 13. Tauson V.L., Kravtsova R.G., Makshakov A.S., Lipko S.V., Arsent'ev K.Yu. Contrasting Surficial Composition of Native Gold from Two Different Types of Gold Ore Deposits // Minerals. – 2017. - V. 7. - № 8. - P. 1-16
 14. Tauson V.L., Kravtsova R.G., Makshakov A.S., Lipko S.V., Arsent'ev K.Yu. Contrasting Surficial Composition of Native Gold from Two Different Types of Gold Ore Deposits // Minerals, 2017, v. 7, No 8, P. 1-16.
 15. Таусон В.Л., Кравцова Р.Г. Типохимизм поверхности минералов: особенности состава поверхности (на примере золотоносного пирита эпитермального месторождения) // Геология и геофизика. - 2004. - Т. 45. - № 2. - С. 222.
 16. Кравцова Р.Г., Макшаков А.С., Павлова Л.А. Минералогия и состав, закономерности распределения и особенности формирования рудной минерализации золото-серебряного месторождения Роговик (Северо-Восток России). // Геология и геофизика. -2015. - Т. 56. - № 10. - С.1739-1759.
 17. Кравцова Р.Г., Макшаков А.С., Тарасова Ю.И., Куликова З.И. Минералогическо-геохимические особенности вмещающих пород и руд золото-серебряного месторождения «Роговик» (Северо-Восток России) // Геология и геофизика. – 2012. - № 2(14). - С.11-22.
 18. Кравцова Р.Г., Макшаков А.С. Оценка Уровня Эрозионного Среза Золото-Серебряных Зон Эпитермального месторождения Роговик по геохимическим данным (Северо-Восток России) // Геология рудных месторождений. - 2016. - Т. 58. - № 6. - С. 544-558.
 19. Шпикерман В.И., Горячев Н.А. Металлогения складчатых систем с позиций тектоники плит. Екатеринбург: Наука, 1996. - 132 с.
 20. Ханчук А.И. Геодинамика, магматизм и металлогения Востока России. Дальнаука, Владивосток, 2006. - 527 с.

21. Неймарк Л.А., Ларин А.М., Яковлева С.З., Срывцев Н.А., Булдыгеров В.В. Новые данные о возрасте пород акитканской серии Байкало-Патомской складчатой области по результатам U-Pb датирования цирконов // Доклады Академии наук СССР. - 1991. - Т. 320. - № 1. - С. 182.
22. Powerman V., Shatsillo A., Chumakov N. // Precambrian. Res. - 2015. - V. 267. - № 1. P. 39–71.
23. Чумаков Н. М., Капитонов И. Н., Семихатов М. А. и др. // Стратиграфия. Геологическая корреляция. - 2011. - Т. 19. - № 2. - С. 115–119
24. Станевич А.М., Чатта Е.Н., Корнилова Т.А., Немеров В.К. условия обитания и вероятная природа акритарх из ченчинской свиты позднего рифея // Палеонтологический журнал. - 2007. - № 1. - С. 83-89.
25. Чугаев А. В., Будяк А. Е., Чернышев И. В. и др. // Геохимия. - 2017. - № 1.- С. 17–25.
26. Chugaev A. V., Budyak A. E., Chernyshev I. V., et.al. // Petrology. - V. 26. - № 3. - P. 213–245
27. Цыганков А.А. Магматическая эволюция Байкало-Муйского вулканоплутонического пояса в позднем докембрии. отв. ред. М. И. Кузьмин; Рос. акад. наук, Сиб. отд-ние, Геол. ин-т. Новосибирск, 2005. – 60 с.
28. Горячев Н.А. Месторождения золота в истории Земли // Геология рудных месторождений. – 2019. - №6. - С. 3-18
29. Апельцин Ф.Р., Лугов С.Ф., Покалов В.Т., Фролов А.А. Локальное прогнозирование плутоногенных месторождений молибдена, вольфрама и олова. Москва, Недра, 1984. - 243 с.
30. Kinnard J.A., Nex P.A.M., Milani L. Tin in Africa // Episodes. - 2016. - V.39. - № 2. – P. 361-380
31. Botelho N.F., Mauro M.A. Granite-ore deposit relationships in Central Brazil // Journal of South American Earth Sciences. - 1998. - V. 11. - № 5. - P. 427-438
32. Родионов С.М. Металлогения олова Востока Азии. Москва, Наука. - 2006
33. Kerrich R., Goldfarb R.J., Richards J.P. Metallogenic Provinces in an Evolving Geodynamic Framework // Society of Economic Geologists. – 2005. - P. 1097-1136
34. Huston D.L., Blewett R.S., Champion D.C. Australia through time: a summary of its tectonic and metallogenic evolution // Episodes. - 2012. - V. 35. - №. 1. – P. 23-43
35. Lydon J.W. An Overview of the Economic and Geological Contexts of Canada’s Major Mineral Deposit Types // Mineral Deposits of Canada. A Synthesis of Major Deposit

- Types, District Metallogeny, the Evolution of Geological Provinces and Exploration Methods. Geological Association of Canada Mineral Deposits Division Special Publication. - № 5. - 2007. - P. 3-48
36. Bleeker W., Hall B. The Slave craton: Geological and Metallogenic Evolution // Mineral Deposits of Canada. A Synthesis of Major Deposit Types, District Metallogeny, the Evolution of Geological Provinces and Exploration Methods. Geological Association of Canada Mineral Deposits Division Special Publication. № 5. – 2007. – P. 849-880
37. Percival J.A. Geology and Metallogeny of Superior Province, Canada // Mineral Deposits of Canada. A Synthesis of Major Deposit Types, District Metallogeny, the Evolution of Geological Provinces and Exploration Methods. Geological Association of Canada Mineral Deposits Division Special Publication. № 5. – 2007. - P. 903-928.
38. Ткачев А.В., Рундквист Д.В., Вишневская Н.А. Главные геоисторические особенности металлогении лития // Доклады Академии наук. – 2019. - Т. 487. - № 1. –С. 60–64
39. Tkachev, A. V., Rundqvist D. V., and Vishnevskaya N. A. (2018), Metallogeny of lithium through geological time, Russ. J. Earth. Sci., 18, ES6002, doi:10.2205/2018ES000635.
40. Ткачев А.В., Рундквист Д.В., Вишневская Н.А. Особенности суперконтинентальных циклов в металлогении тантала // Доклады Академии наук. – 2019. - Т. 486. - № 1. - С. 69–73.
41. Зорин Ю. А., Мазукабзов А. М., Гладкочуб Д. П., Донская Т. В., Пресняков С. Л., Сергеев С. А. // ДАН. - 2008. - Т. 423. - № 2. - С. 228–233.
42. Goryachev N. A., Budyak A. E. // SEG. 2017. Absts. P. 135.
43. Дистлер В.В., Митрофанов Г.Л., Немеров В.К. Формы нахождения металлов платиновой группы и их генезис в золоторудном месторождении Сухой Лог (Россия) // Геология рудных месторождений. - 1996. - Т. 38. - № 6. - С. 467-484.
44. Large R.R., Maslennikov V.V., Robert F., Danyushevsky L., Chang Z. 2007. Multi-stage sedimentary and metamorphic origin of pyrite and gold in the giant Sukhoi Log deposit. Lena Goldfield. Russia. Economic Geology. - 10 (2). – P. 1233–1267.
45. Немеров В.К., Спиридонов А.М., Развозжаева Э.А., Матерь Н.Л., Будяк А.Е. Основные факторы онтогенеза месторождений благородных металлов Сухоложского типа // Отечественная геология. - 2004. - № 3. - С.17-25.
46. Юдовская М.А., Дистлер В.В., Родионова Н.В., Мохов А.В., Антонов А.В., Сергеев А.В. Соотношение процессов метаморфизма и рудообразования на золотом

- черносланцевом месторождении Сухой Лог по данным U-Th-Pb-изотопного SRIMP-датирования акцессорных минералов // Геология рудных месторождений. - 2011. - Т. 53. - № 1. - С. 32-64.
47. Станевич А. М., Немеров В. К., Чатта Е. Н. Микрофоссилии протерозоя Саяно-Байкальской складчатой области. Обстановки обитания, природа и классификация. Новосибирск: Гео, 2006. - 204 с.
48. 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.
49. Иванов А. И. Золото Байкало-Патома (геология, оруденение, перспективы). М.: ФГУП ЦНИГРИ, 2014. - 215 с.
50. Буряк В.А. Метаморфизм и рудообразование. – М.: Недра, 1982. - 256 с.
51. Schauble E. A. // *Geochim. et Cosmochim. Acta.* - 2007. - V. 71. - P. 2170–2189
52. Чугаев А. В., Будяк А. Е., Чернышев И. В. и др. // *Петрология.* - 2018. - Т. 26. - № 3. - С. 213–244.
53. Rolison, J. M., Stirling, C. H., Middag, R., Rijkenberg, M. J. // *Geochim. et Cosmochim. Acta.* - 2017. - V. 203. - P. 69–88
54. Kendall B., Brennecka G. A., Weyer S., Anbar A. D. // *Chem. Geol.* - 2013. - V. 362. - P. 105–114.
55. Phan T. T., Gardiner J. B., Capo R. C., Stewart B. W. // *Geochim. et Cosmochim. Acta.* - 2018. - V. 222. - P. 187–211.
56. Паршин А.В., Будяк А.Е., Блинов А.В., Костерев А.Н., Морозов В.А., Михалев А.О., Просекин С.Н., Тарасова Ю.И., Спиридонов А.М. Низковисотная беспилотная аэромагниторазведка в решении задач крупномасштабного структурно-геологического картирования и поисков рудных месторождений в сложных ландшафтных условиях. Часть 2. // *География и природные ресурсы.* - 2016. - № 6. - С. 150-155.
57. Parshin A, Grebenkin N, Morozov V and Shikalenko F. // *Geophysical Prospecting.* - 2018 – V. 66. – P. 1433-1438.
58. Cunningham M, Samson C, Wood A and Cook I. Aeromagnetic Surveying with a Rotary-Wing Unmanned Aircraft System: A Case Study from a Zinc Deposit in Nash Creek, New Brunswick, Canada *Pure and Applied Geophysics.* – 2018.- V. 175. - P 3145-3158

59. Malehmir A, Dynesius L, Paulusson K, Paulusson A, Johansson H, Bastani B, Wedmark M and Marsden P. The potential of rotary-wing UAV-based magnetic surveys for mineral exploration: A case study from central Sweden *The Leading Edge*. – 2017. - V. 36. - P 552-557
60. Parshin A, Tsirel V, Rzhevskaya A 2018 Guidelines for low-altitude aeromagnetic surveys (Russian Federal Agency for Subsoil Use, 2018) - the main points and the authors' comments 5th International conference Geobaikal. - 2018 (Irkutsk: EAGE Publications).
61. Parshin A, Tsirel V, Rzhevskaya A 2018 Guidelines for low-altitude aeromagnetic surveys (Russian Federal Agency for Subsoil Use, 2018) - the main points and the authors' comments 5th International conference Geobaikal. - 2018 (Irkutsk: EAGE Publications).
62. Parshin A, Tsirel V, Rzhevskaya A 2018 Guidelines for low-altitude aeromagnetic surveys (Russian Federal Agency for Subsoil Use, 2018) - the main points and the authors' comments 5th International conference Geobaikal. - 2018 (Irkutsk: EAGE Publications).
63. Будяк А.Е., Скузоватов С.Ю., Тарасова Ю.И., Ванг (Кuo-Lung Wang) К.-Л., Горячев Н.А. Единая неопротерозой-раннепалеозойская эволюция рудоносных осадочных комплексов юга Сибирского Кратона // Доклады академии наук. - 2019. - Т. 484. - № 3. - С. 80–84.
64. Saleka O, Matolina M and Gryc L. *Journal of Environmental Radioactivity*. – 2017. – V. 182. – P. 101–107.
65. Martin P, Payton O, Fardoulis J, Richards D and Scott T. *Journal of Environmental Radioactivity*. – 2015. - V. 143. - P. 135-140.
66. Забулонов Ю.Л., Буртняк В.М., Золкин И.О. Аэрогамма-спектрометрическое обследование в Чернобыльской зоне отчуждения на базе БПЛА // Вопросы атомной науки и техники. - 2015. - № 5. - С. 163.
67. Takaku L. and Tadono T. Quality updates of AW3D global DSM generated from ALOS PRISM Proc. IGARSS2017 (Fort Worth: IEEE). - 2017. pp 5666-5669.
68. Martin H., Smithies R.H., Rapp R., Moyen J.-F., Champion D. An overview of adakite, tonalite–trondhjemite–granodiorite(TTG), and sanukitoid: relationships and some implications for crustal evolution // *Lithos*. – 2005 - V. 79. - P. 1–24.
69. Geochemical Earth Reference Model // <http://earthref.org/GERM>

70. Plank T. Constraints from Thorium/Lanthanum on Sediment Recycling at Subduction Zones and the Evolution of the Continents // *Journal of Petrology*. – 2005. - V. 46. - P.921–944.
71. Ефремов С.В. Раннепалеозойские адакиты Восточного Саяна. геохимические особенности и источники вещества // *Геохимия*. - 2010. - № 11. - С. 1185-1201
72. Wyman D.A.; Ayer J.A., Devaney J.R. Niobium-enriched basalts from the Wabigoon subprovince, Canada: evidence for adakitic metasomatism above an Archean subduction zone // *EPSL*. – 2000. - V. 179. - P.21-30.
73. Hollings Pete Archean Nb-enriched basalts in the northern Superior Province // *Lithos*. - 2002. - V. 64. - P.1-14.
74. Sajona F.G., Mauri R.C., Bellon H., Cotten J., Defant M. High field strenght element enrichment of Pliocene-Pleistocene island arc basalts, Zambaanga Peninsula, Western Mindango (Philippines) // *J.Petrol*. – 1996. - V. 37. - № 3. - P. 693-726.
75. Антипин В.С. Петрология и геохимия гранитоидов Пришилкинской зоны (Восточное Забайкалье): Автореферат диссертации кандидата геол.-мин. наук. Иркутск: ИГХ СО АН СССР. – 1969. - 20 с.
76. Кузьмин М.И. Две генетические группы мезозойских внегеосинклинальных гранитоидов западной части Монголо-Охотского пояса // *Геохимические критерии потенциальной рудоносности гранитоидов*. Иркутск, 1971. - С.163-166.
77. 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 ($\delta^{13}C$, $\delta^{34}S$ 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 Geology Reviews*. - 2020. – V. 119. - P. 118-136 DOI 10.1016/j.oregeorev.2020.103365
78. Шер С.Д. Металлогения золота. -М.: Недра, 1974. - 256 с.
79. Буряк В.А., Бакулин Ю.И. МЕТАЛЛОГЕНИЯ ЗОЛОТА // *Комаровские чтения*, 1998. - С. 403.
80. Дубинина Е.О., Чугаев А.В., Иконникова Т.А., Авдеенко А.С., Якушев А.И. (2014) 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.
81. Чернышев И.В., Чугаев А.В., Сафонов Ю.Г., Сароян М.В., Юдовская М.А., Еремина А.В. Изотопный состав свинца по данным высокоточного MC-ICP-MS-

- метода и источники вещества крупномасштабного благороднометаллического месторождения Сухой Лог (Россия)// Геология рудных месторождений. - 2009. - Т. 51. - № 6. - С. 550–559.
82. Буряк В. А., Хмелевская Н.М. Сухой Лог – одно из крупнейших золоторудных месторождений мира (генезис, закономерности размещения оруденения, критерии прогнозирования). - Владивосток: Дальнаука, 1997. - 156 с.
83. Русинов В.Л., Русинова О.В., Кряжев С.Г., Щегольков Ю.В., Алышева Э.И., Борисовский С.Е. Околорудный метасоматизм терригенных углеродистых пород в Ленском золоторудном районе. Геология рудных месторождений. - 2008. - Т. 50. - № 1. - С. 3-46.
84. 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. - V. – 72. - P. 2377–2391.
85. Блинов А.В., Тарасова Ю.И. Минералого-петрографическая характеристика месторождения Угахан. Науки о Земле и недропользование. - 2020. - Т. 43. - № 2. - С. 160–176. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2020-43-2-160-176>
86. Тарасова Ю.И., Будяк А.Е., Иванов А.В., Радомская Т.А., Горячев Н.А. Типоморфизм, типохимизм и изотопные характеристики пирита месторождения Голец Высочайший (Восточная Сибирь) // EAGE, ГеоБайкал'20. 6-я международная конференция 5-9 октября 2020.
87. Тарасова Ю.И., Будяк А.Е., Иванов А.В., Горячев Н.А., Игнатъев 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. - №1 (в печати).
88. Будяк А.Е., Тарасова Ю.И. Модель формирования и критерии поисков золоторудных объектов, приуроченных к палеопротерозойским черносланцевым толщам в пределах Нечерского поднятия (Иркутская область) // ГеоБайкал'20. 6-я международная конференция EAGE 5-9 октября 2020.
89. Petrov Lev L., Kornakov Yuri N., Korotaeva Irina Ia. et al. Multi-Element Reference Samples of Black Shale // *Geostandards and geoanalytical research.* - 2004. - V. 28. - № 1. -P. 89-102.

90. Будяк А. Е., Паршин А. В., Спиридонов А. М., Реутский В. Н., Дамдинов Б. Б., Волкова М. Г., Тарасова Ю. И., Абрамова В. А., Брюханова Н. Н., Зарубина О. В. Геохимические особенности формирования Au-U месторождений типа «несогласия» (Северное Забайкалье) // Геохимия. - 2017. № 2 С. 149-160.
91. Федоровский В.С. Стратиграфия нижнего протерозоя хребтов Кодар и Удокан (Восточная Сибирь), М.: Наука, 1972. - 130 с.
92. Дамдинов Б.Б., Дамдинова Л.Б., Жмодик С.М., Миронов А.Г. Состав и условия формирования золотоносных пирротиновых руд Восточного Саяна (на примере рудопроявления Ольгинское) // Геология и геофизика. - 2019. - Т. 60. - № 5. - С. 666-687.
93. Сафонов Ю.Г. Золоторудные и золотосодержащие месторождения мира – генезис и металлогенетический потенциал. // Геология рудных месторождений. – 2003. - Т 45. - № 4. – С. 305 – 320.
94. Соцкая О.Т. Минералогические и геохимические особенности месторождений золото-сульфидно-вкрапленного типа в южной части Яно-Колымского пояса // Автореф. дисс... канд. геол.-мин. наук. Магадан, 2017. 23 с.
95. Соцкая О.Т. Минералогические и геохимические особенности месторождений золото-сульфидно-вкрапленного типа в южной части Яно-Колымского пояса // Автореф. дисс... канд. геол.-мин. наук. Магадан, 2017. 23 с.
96. Астахов А.С., Горячев Н.А., Михалицына Т.И. Обусловия формирования обогащенных золотом горизонтов рудовмещающих черносланцевых толщ (на примере пермских и современных морских отложений Северо-Востока Азии) // ДАН. - 2010. - Т. 430. - № 2. - С. 212–217.
97. Коноплева Е.В., Батулин Г.Н., Голева Р.В., и др. Формы золота и платины в железомарганцевых корках Магеллановых гор (Тихий океан) // ДАН. - 2004. - Т. 397. - № 2. - С. 253–257.
98. Rudmin M., Banerjee S., Mazurov A. Compositional Variation of Glauconites in Upper Cretaceous-Paleogene Sedimentary Iron-ore Deposits in South-eastern Western Siberia // Sedimentary Geology. - 2017. - V. - 355. - P. 20–30.
99. Дударев О.В., Чаркин А.Н., Шахова Н.Е. и др. Современный литоморфогенез на восточно-арктическом шельфе России. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2016. - 192 с.
100. Астахов А.С., Горячев Н.А., Михалицына Т.И. Обусловия формирования обогащенных золотом горизонтов рудовмещающих черносланцевых толщ (на

- примере пермских и современных морских отложений Северо-Востока Азии) // ДАН. - 2010. - Т. 430. - № 2. - С. 212–217
101. Горячев Н. А., Соцкая О. Т., Астахов А. С., Ши Сюефа, Михалицына Т. И., Аксентов К. И., Бердников Н. В. Рудная минерализация в плейстоценовых отложениях пролива Лонга (Восточно-Сибирское море) // ДАН. – 2020. – Т. 491. - № 2 - С. 37–41.
102. Гвоздев В.И., Гребенникова А.А., Вах А.С., Горячев Н.А., Федосеев Д.Г. Эволюция процессов минералообразования при формировании золото-редкометалльных руд Средне-Голготайского месторождения (Восточное Забайкалье) // Тихоокеанская геология. – 2020. – Т. 39. - № 1. - С. 70–91
103. Ефремов С.В., Горячев Н.А., Будяк А.Е., Щербаков Ю.Д., Брянский Н.В. Последовательность минералообразования и редкоэлементный состав руд Пильненского месторождения золота (Карийский рудный узел Восточное Забайкалье) // Геология рудных месторождений. – 2020 (стадия рецензирования).
104. Ефремов С.В., Спиридонов А.М., Горячев Н.А., Будяк А.Е. Эволюция Карийской рудно-магматической системы (В.Забайкалье., Россия): Опыт применения мелкомасштабной геохимической съемки // Геология рудных месторождений. - 2021 (принята в печать).
105. Geisler T., Schleicher H. (2000) Improved U-Th-total Pb dating of zircons by electron microprobe using a simple new background modeling procedure and Ca as a chemical criterion of fluid-induced U-Th-Pb discordance in zircon // Chem. Geol. – V. 163. – P. 269-285.
106. Левашова Е. В., Носков Д. А., Скублов С. Г. Особенности геохимии редких элементов в цирконах из раннепалеозойских гранитов на территории Ангаро-Витимского батолита // Геохимия. - 2020. - Т. 65. - № 2. - С. 185-194
107. Цыганков А.А., Горячев Н.А., Хубанов В.Б., Бурмакина Г.Н. Новые изотопно-геохимические данные по гранитоидам юго-восточного фланга главного Колымского батолитового пояса // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Северо-Востока России: материалы X Всероссийской научно-практической конференции с международным участием / отв. ред. В.Ю. Фридовский; Якутск: Издательский дом СВФУ, 2020.– С. 301-303 ISBN978-5-7513-2970-9.
108. Кузнецов А.Б., Овчинникова Г.В., Семихатов М.А., Горохов И.М., Каурова О.К., Крупенин М.Т., Васильева И.М., Гороховский Б.М., Маслов А.В. SR Изотопная характеристика и Pb-Pb возраст карбонатных пород саткинской свиты,

- нижнерифейская бурзянская серия Южного Урала // Стратиграфия. Геологическая корреляция. - 2008. - Т. 16. - № 2. - С. 16-34.
109. Акинин В.В., Прокопьев А.В., Торо Х., Миллер Э.Л., Вуден Дж., Горячев Н.А., Альшевский А.В., Бахарев А.Г., Трунилина В.А. U-Pb-SHRIMP-возраст гранитоидов главного батолитового пояса (Северо-Восток Азии) // Доклады Академии наук. - 2009. - Т. 426. - № 2. - С. 216-221.
110. Шпикерман В.И., Горячев Н.А., Раткин В.В., Чугаев А.В. Геология изотопов рудного свинца юга Омудевского террейна (циркумалазейский металлогенический пояс) // в сборнике: геологические процессы в обстановках субдукции, коллизии и скольжения литосферных плит. Материалы Третьей Всероссийской конференции с международным участием. 2016. - С. 386-389.
111. Parshin A., Davidenko Y.A. Two UAV-based electromagnetic systems for the formation of the complete set of low-altitude UAS-geophysical methods // Second EAGE Workshop on Unmanned Aerial Vehicles 15-17 November 2020, Muscat, Oman
112. Parshin A.V., Budyak A.E., Babyak V.N. Interpretation of Integrated Aerial Geophysical Surveys by Unmanned Aerial Vehicles in Mining: a Case of Additional Flank Exploration // 2020 IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 459 052079

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Перечень публикаций по тематике проекта в 2020-2018 г.г.

Статьи

1. Кравцова Р.Г., Таусон В.Л., Пальянова Г.А., Макшаков А.С., Павлова Л.А. Особенности состава самородного серебра золото-серебряного месторождения Роговик (Северо-Восток России) // Геология рудных месторождений, 2017, т. 59, № 5, с. 385–400.
2. Макшаков А.С., Кравцова Р.Г., Горячев Н.А., Пальянова Г.А., Павлова Л.А. Первая находка высокортутистого серебра в рудах золото-серебряного месторождения Роговик (Северо-Восток России) // ДАН, 2017, т. 476, № 3, с. 327–331.
3. Паршин А.В., Цирель В.С., Анцев В.Г. Настоящее и будущее беспилотной аэрогеофизики в России // Разведка и охрана недр. 2017. № 8. С. 33-38.
4. Паршин А.В., Гребенкин Н.А., Морозов В.А., Ржевская А.К., Шикаленко Ф.Н. Первые результаты методических работ по применению беспилотных аэрогеофизических технологий на стадии поисков месторождений урана // Разведка и охрана недр, 2017, №11, с.59-64
5. Будяк А.Е., Паршин А.В., Спиридонов А.М., Реутский В.Н., Дамдинов Б.Б., Волкова М.Г., Тарасова Ю.И., Абрамова В.А., Брюханова Н.Н., Зарубина О.В. Геохимические особенности формирования Au–U месторождений типа «Несогласия» (Северное Забайкалье) // Геохимия, 2017, Т. 55, № 2, с. 149-160 (ИФ = 0,622)
6. Паршин А.В., Аузина Л.И., Просекин С.Н., Блинов А.В., Костерев А.Н., Лоншаков Г.С., Усманова А.М., Шестаков С.А., Давыденко Ю.А. Геоинформационный подход к оценке ресурсной перспективности площадей (на примере месторождений подземных вод Восточной Сибири) // Геоинформатика, 2017, № 1, С. 11-20.
7. Татаринов В.В., Финкельштейн А.Л., Кравцова Р.Г., Павлова Л.А. Определение состава микровключений самородного золота в матрице сульфидного минерала при рентгеноспектральном электронно-зондовом микроанализе // Аналитика и контроль, 2017, Т. 21, № 3, С. 208-215. DOI: 10.15826/analitika.2017.21.3.006
8. Чугаев А.В., Будяк А.Е., Чернышев И.В., Шатагин К.Н., Олейникова Т.И., Тарасова Ю.И., Скузоватов С.Ю. Источники обломочного материала неопротерозойских метаосадочных пород Байкало-Патомского пояса (Северное Забайкалье) по Sm-Nd изотопным данным // Геохимия, 2017, Т. 55, № 1, с. 17-25
9. Абрамова В.А., Паршин А.В., Будяк А.Е., Птицын А.Б. Геоинформационное моделирование процессов криогенного выветривания сульфидов в зоне Удоканского рудного месторождения // Физико-технические проблемы разработки полезных

ископаемых, 2017, № 3, С. 182-189.

10. Parshin A., Grebenkin N., Morozov V., Shikalenko F. Research Note: First results of a low-altitude unmanned aircraft system gamma survey by comparison with the terrestrial and aerial gamma survey data // *Geophysical prospecting*. - 2018. - V. 66. - № 7. - P. 1433-1438 DOI: 10.1111/1365-2478.12650

11. Parshin A.V., Morozov V.A., Blinov A.V., Kosterev A.N., Budyak A.E. Low-altitude geophysical magnetic prospecting based on multicopter UAV as a promising replacement for traditional ground survey // *Geo-spatial Information Science*. - 2018. - V. 21. - № 1. - P. 67-74. DOI: 10.1080/10095020.2017.1420508

12. Вах А.С., Гвоздев В.И., Горячев Н.А., Карабцов А.А., Федосеев Д.Г., Вах Е.А. Висмутовый джемсонит (сахароваит) в рудах Средне-Голготайского золоторудного месторождения (Восточное Забайкалье, Россия) // *Записки Российского минералогического общества*. - 2018. - Т. 147. - № 4. - С. 68-84.

13. Дамдинов Б.Б., Жмодик С.М., Травин А.В., Юдин Д.С., Горячев Н.А. Новые данные о возрасте золотого оруденения юго-восточной части Восточного Саяна // *Доклады Академии наук*. - 2018. - Т. 479. - № 5. - С. 532-535 DOI: 10.7868/S0869565218110129 (англ. DOI: 10.1134/S1028334X18040116)

14. Ефремов С.В., Спиридонов А.М., Горячев Н.А. Слэбовый расплав как потенциальный источник профилирующих элементов месторождений золота и тяжёлых металлов // *Доклады Академии наук*. - 2018. - Т. 479. - № 5. - С. 551-555. DOI: 10.7868/S0869565218110166 (англ. DOI: 10.1134/S1028334X1804013X)

15. Таусон В.Л., Кравцова Р.Г., Акимов В.В., Липко С.В., Спиридонов 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. DOI: 10.7868/S0869565218020214 (англ. DOI: 10.1134/S1028334X18010191)

16. Чугаев А.В., Будяк А.Е., Чернышев И.В., Дубинина Е.О., Гареев Б.И., Шатагин К.Н., Тарасова 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. DOI: 10.7868/S0869590318030019 (англ. DOI: 10.1134/S0869591118030025)

17. Васильева И.Е., Шабанова Е.В., Горячева Е.М., Соцкая О.Т., Лабусов В.А., Неклюдов О.А., Дзюба А.А. Благородные металлы в образцах черных сланцев золоторудного месторождения Сухой Лог (Восточная Сибирь) по данным метода сцинтилляционной дуговой атомно-эмиссионной спектрометрии // Геология и геофизика. - 2018. - Т. 59. - № 8. - С. 1238-1253 DOI: 10.15372/GiG20180808 – DOI: 10.1016/j.rgg.2018.07.019)
18. Васильева И.Е., Шабанова Е.В., Горячева Е.М., Соцкая О.Т., Лабусов В.А., Неклюдов О.А., Дзюба А.А. Определение благородных металлов в геологических пробах четырех золоторудных месторождений Северо-Востока России // Журнал аналитической химии. - 2018. - Т. 73. - № 6. - С. 433-445 DOI: 10.7868/S004445021806004X (англ. DOI: 10.1134/S1061934818040123)
19. Dzyuba A.A., Labusov V.A., Vasil'eva I.E., Shabanova E.V. Optical efficiency and spectral resolution of the Grand, Grand-1500, and STE-1 Spectrometers // Inorganic materials. - 2018. - V. 54. - № 14. - P. 94-98. (англ. DOI: 10.1134/S0020168518140091)
20. А.Е. Будяк, С.Ю. Скузоватов, Ю.И. Тарасова, К.Л. Ванг, Н.А. Горячев. Единая неопротерозойская-раннепалеозойская эволюция рудоносных осадочных комплексов юга Сибирского кратона // Доклады Академии наук. - 2019. - Т. 484. - № 3. - С. 335–339. DOI: 10.31857/S0869-56524843335-339).
21. Горячев Н.А. Месторождения золота в истории Земли // Геология рудных месторождений. - 2019. - №. – 6. - С. 3-18.
22. Горячев Н.А., Игнатьев А.В., Веливецкая Т.А., Будяк А.Е., Тарасова Ю.И. Опыт применения локального анализа изотопного состава серы сульфидов руд крупнейших месторождений Бодайбинского синклиория (Восточная Сибирь) // Доклады Академии наук. - 2019. - Т. 484. - № 4. - С. 460–463. DOI: 10.31857/S0869-56524844460-463).
23. Parshin A, Savin A, Morozov V and Badmaev M-J (2019) Development of low-cost unmanned aerogeophysical system based on light VTOL aircraft as an analogue of traditional airborne geophysics // AER-Advances in Engineering Research 2019.
24. A. Parshin, A. Budyak, I. Chebokchinov, V. Sapunov, A. Bulnayev and V. Morozov (2019) Complex UAS-Geophysical Surveys at the First Stages of Geological Prospecting: Case in the Western Sayan (Russia) // EAGE EarthDOC DOI:10.3997/2214-4609.201903321.
25. Ефремов С.В., Дриль С.И., Горячев Н.А., Левицкий И.В. Потенциальная рудопродуктивность гранитоидов Гарганской глыбы (Восточный Саян) // Геология

рудных месторождений. - 2019. - Т. 61. - № 4. - С. 61–71. DOI: 10.31857/S0016-777061461-71).

26. Ефремов С.В., Спиридонов А.М., Травин А.В. Новые данные о возрасте, генезисе и источниках вещества гранитоидов Карийского золоторудного узла (Восточное Забайкалье) // Геология и геофизика. - 2019. - Т. 60. - № 6. - С. 772—788.

27. Вах А.С., Авченко О.В., Гвоздев В.И., Горячев Н.А., Карабцев А.А., Вах Е.А. Минералы Pb-As-Sb-S и Cu-Pb-As-Sb-S систем в рудах золото-полиметаллического месторождения Березитовое (Верхнее Приамурье, Россия) // Геология рудных месторождений. - 2019. - Т. 61. - № 3. - С. 64–84. DOI: 10.31857/S0016-777061364-84.

28. Чугаев А.В., Чернышев И.В., Будяк А.Е., Манджиева Г.В., Садасюк А.С., Гареев Б.И. Вариации изотопного отношения $^{238}\text{U}/^{235}\text{U}$ в метаосадочных породах и свидетельство изменения условий осадконакопления в неопротерозое в эдиакарское время // Доклады академии наук. - 2019. – Т. 484. - № 4. - С.472 – 477.

29. Bobarika I. and Parshin A. (2019) Lightweight UAV Variant of Unconventional Design as a Carrier for Performing Complex Airborne Geophysical Surveying // EAGE EarthDOC DOI: 10.3997/2214-4609.201903326

30. Е.Ф. Синякова, В.И. Косяков, Н.А. Горячев. Образование каплевидных включений на основе Pt, Pd, Au, Ag, Bi, Sb, Te, As при кристаллизации промежуточного твердого раствора в системе Cu-Fe-Ni-S // Доклады РАН. - 2019. – Т. 489. - № 1.

31. А. С. Вах, О. В. Авченко, В. И. Гвоздев, Н. А. Горячев, А. А. Карабцев, Е. А. Вах. Минералы Pb-As-Sb-S и Cu-Pb-As-Sb-S систем в рудах золото-полиметаллического месторождения Березитовое (Верхнее Приамурье, Россия) // Геология рудных месторождений. - 2019. - Т. 61. - № 3. - С. 64–84. DOI: 10.31857/S0016-777061364-84);

32. В.Н. Бабяк, А.В. Блинов, Ю.И. Тарасова, А.Е. Будяк «Новые данные о геолого-структурных особенностях золоторудных месторождений «Ожерелье», «Ыканское», «Угахан» и «Голец Высочайший» // Науки о Земле и недропользование. - 2019. - Т. 42. - № 4

33. Юргенсон Г.А., Горячев Н.А., Посохов В.А. // Вестник Забайкальского государственного университета. - 2019. - Вып. 25. - № 9. - С. 33–41. DOI: 10.21209/2227924520192593341. Yurgenson G., Goryachev N., Posokhov V. First data on the isotopes of quartz oxygen of the Baley ore field // Transbaikalian State University Journal, 2019, vol. 25, no. 9, pp. 33–41. DOI: 10.21209/2227924520192593341.

34. Горячев Н.А., Соцкая О.Т., Астахов А.С., Ши Сюефа, Михалицына Т.И., Аксентов К.И., Бердников Н.В. Рудная минерализация в плейстоценовых отложениях

пролива Лонга (Восточно-Сибирское море) // Доклады Российской академии наук. Науки о земле. – 2020. том 491. - № 2. - С. 37–41

35. 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 Geology Reviews. 2020. - Volume 119. - P. 118-136. DOI 10.1016/j.oregeorev.2020.103365

36. Гвоздев В.И., Гребенникова А.А., Вах А.С., Горячев Н.А., Федосеев Д.Г. Эволюция процессов минералообразования при формировании золото-редкометалльных руд Средне-Голготайского месторождения (Восточное Забайкалье) // Тихоокеанская геология. 2020. - том 39. - № 1. - С. 70–91

37. Левашова Е. В., Носков Д. А., Скублов С. Г. Особенности геохимии редких элементов в цирконах из раннепалеозойских гранитов на территории Ангаро-Витимского батолита // Геохимия. - 2020. - Т. 65. - № 2. - С. 185-194

38. Кравцова Р. Г., Таусон В. Л., Горячев Н. А., Макшаков А. С., Арсентьев К. Ю., Липко С. В. Изучение поверхности арсенопирита и пирита золоторудного месторождения Наталкинское (Северо-Восток России) методом сканирующей электронной микроскопии // Геохимия, 2020, Т. 65. - № 5. - С. 464-472

39. Тарасова Ю.И., Будяк А.Е., Иванов А.В., Горячев Н.А., Игнатъев 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. - №1 (в печати).

40. Ефремов С.В., Горячев Н.А., Будяк А.Е., Щербаков Ю.Д., Брянский Н.В. Последовательность минералообразования и редкоэлементный состав руд Пильненского месторождения золота (Карийский рудный узел Восточное Забайкалье) // Геология рудных месторождений. – 2020. (стадия рецензирования).

41. Ефремов С.В., Спиридонов А.М., Горячев Н.А., Будяк А.Е. Эволюция Карийской рудно-магматической системы (В.Забайкалье., Россия): Опыт применения мелкомасштабной геохимической съемки // Геология рудных месторождений. – 2021 (в печати).

42. Блинов А.В., Тарасова Ю.И. Минералого-петрографическая характеристика месторождения Угахан // Науки о Земле и недропользование. - 2020. - Т. 43. - № 2. - С. 160–176.

43. Брюханова Н.Н., Бычинский В.А., Будяк А.Е., Чудненко К.В. Физико-химическое моделирование рудообразующего флюида месторождения Сухой Лог (Иркутская область, Россия) // Геосферные исследования. – 2020. - № 4. - С. 25-32.

44. Михеева Е.А., Демонтерова Е.И., Хубанов В.Б., Иванов А.В., Аржанникова А.В., Аржанников С.Г., Блинов А.В. Возраст угленакопления в Иркутском бассейне по данным датирования акцессорных цирконов из тонштейна Азейского месторождения (LA-ICP-MS) // Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле. – 2020. - Т. 65. - № 3. – С. 420-433.

45.

Тезисы и материалы в сборниках

1. Васильева И.Е., Шабанова Е.В., Лабусов В.А. Современное состояние и перспективы развития сцинтилляционной атомно-эмиссионной микроминералогии благородных металлов // Сб. тез. XXII Междунар. Черняевской конф. по химии, аналитике и технологии платиновых металлов. С. 26 (устный доклад)

2. Зеленкова А.В., Прокопьева С.В., Васильева И.Е. Совершенствование АЭС-ИСП анализа золотосодержащих руд с учетом их типизации // Сб. тез. XXII Междунар. Черняевской конф. по химии, аналитике и технологии платиновых металлов. С. 76 (стендовый доклад).

3. Макшаков А.С., Кравцова Р.Г., Татаринов В.В. Потoki рассеяния Дукатской золото-серебряной рудообразующей системы: состав и строение аномальных геохимических полей, критерии поисков и оценки (Северо-Восток России) // Новое в познании процессов рудообразования: IX Российская молодёжная научно-практическая Школа с международным участием. Сборник материалов - М.: ИГЕМ РАН, 2019, с. 237-240.

4. Будяк А.Е., Тарасова Ю.И. Модель формирования и критерии поисков золоторудных объектов, приуроченных к палеопротерозойским черносланцевым толщам в пределах Нечерского поднятия (Иркутская область) // ГеоБайкал'20. 6-я международная конференция EAGE 5-9 октября 2020, Иркутск, Россия

5. Тарасова Ю.И., Будяк А.Е., Иванов А.В., Радомская Т.А., Горячев Н.А. Типоморфизм, типохимизм и изотопные характеристики пирита месторождения Голец

Высочайший (Восточная Сибирь) // EAGE, ГеоБайкал'20. 6-я международная конференция 5-9 октября 2020, Иркутск, Россия

6. Parshin A.V., Budyak A.E., Babyak V.N. Interpretation of Integrated Aerial Geophysical Surveys by Unmanned Aerial Vehicles in Mining: a Case of Additional Flank Exploration // 2020 IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 459 052079

7. Parshin A., Davidenko Y.A. Two UAV-based electromagnetic systems for the formation of the complete set of low-altitude UAS-geophysical methods // Second EAGE Workshop on Unmanned Aerial Vehicles 15-17 November 2020, Muscat, Oman

8. Цыганков А.А., Горячев Н.А., Хубанов В.Б., Бурмакина Г.Н. Новые изотопно-геохимические данные по гранитоидам юго-восточного фланга главного Колымского батолитового пояса // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Северо-Востока России: материалы X Всероссийской научно-практической конференции с международным участием / [Отв. ред. В.Ю. Фридовский]. –Якутск: Издательский дом СВФУ, 2020. – С. 301-303 ISBN978-5-7513-2970-9.

9. Bryuhanova N. N., Bychinskij V. A., Budyak A.E., Chudnenko K. V. The specifics of the formation of ore-forming fluid of the Sukhoi Log gold deposit. In book: Water-rock interaction: geological evolution. 2020. p.324-326. DOI: 10.31554/978-5-7925-0584-1-2020-324-326.

Монографии

1. Шабанова Е.В., Васильева И.Е. Сцинтилляционная атомно-эмиссионная спектрометрия для определения благородных металлов: современное состояние и перспективы. Глава 1.3. С. 79-121 / Аналитический контроль благородных металлов. Коллективная монография под ред. Ю.А. Карпова, В.Б. Барановской, Л.П. Житенко. М.: ТЕХНОСФЕРА, 2019. 400 с. ISBN: 978-5-94836-554-1

2. Китаев Н.А., Спиридонов А.М., Зорина Л.Д. Золоторудные формации Восточного Забайкалья и Приамурья: условия рудообразования, состав и строение геохимических полей. – Новосибирск: Академическое изд-во ГЕО, 2018. – 229 с.

Объекты интеллектуальной собственности

1. Паршин А.В. Комплекс для беспилотной аэромагниторазведки. Патент на полезную модель РФ №172078

2. СТП ИГХ-020-2019. Методика измерений массовых долей элементов в порошках органоминеральных проб методом атомно-эмиссионной спектрометрии с

непрерывным введением вещества в плазму дугового разряда и интегральной регистрацией спектров фотодиодными линейками / Отв. исп. Е.В. Шабанова, И.Е. Васильева. ИГХ СО РАН, 2019. 42 с. Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии (Росстандарт). Свидетельство об аттестации методики (метода) измерений № 253.0234/RA.RU.311866/2019 от 15.11.2019.

3. Программное обеспечение стенда для тестирования двигателей БПЛА (SibGIS Motor Stend) // А.В. Паршин, В.А. Морозов

4. Патент на изобретение № 2673505. Способ аэрогаммаспектрометрической съемки геологического назначения. Паршин А.В.