

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

«15»

2020 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

(промежуточный)
№ 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

Руководитель проекта
Заместитель директора

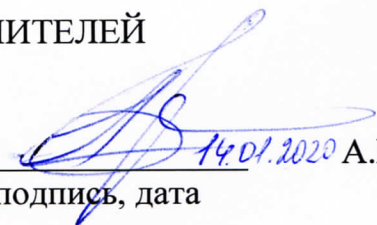

подпись, дата 14.01.20

к.г.-м.н. А.Е. Будяк

Иркутск, 2020

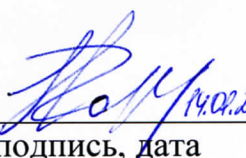
СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Научный руководитель темы, кандидат
геолого- минералогических наук

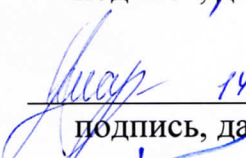

14.01.2020 А.Е. Будяк
подпись, дата

Ответственные исполнители темы:

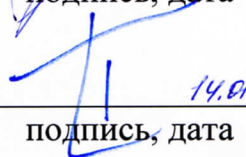
член-корреспондент РАН


14.01.2020 Н.А. Горячев
подпись, дата (разделы 1, 2)

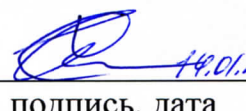
кандидат геолого-минералогических
наук


14.01.2020 Ю.И. Тарасова
подпись, дата (раздел 2)

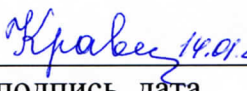
кандидат геолого-минералогических
наук


14.01.2020 А.В. Паршин
подпись, дата (раздел 3)

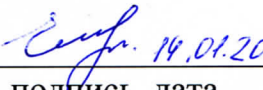
доктор геолого-минералогических наук


14.01.2020 С.В. Ефремов
подпись, дата (раздел 4)

доктор геолого- минералогических наук


14.01.2020 Р.Г. Кравцова
подпись, дата (раздел 5)

доктор химических наук


14.01.2020 Е.В. Шабанова
подпись, дата (раздел 6)

УДК 550.4:551.2

РЕФЕРАТ

Отчет включает 59 стр., 15 илл., 4 табл., 46 ист., 1 прил.

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

Основной упор сделан на изучение региональной геологии и локальное изучение золоторудных месторождений Бодайбинского района, а также усовершенствование методологии поисков месторождений золота.

Проведено изучение вариаций $^{238}\text{U}/^{235}\text{U}$ в метаосадочных породах БПП. Предположено, что основная причина вариаций – изменение окислительно-восстановительных условий в осадочном палеобассейне.

Выявлено, что рудная минерализация месторождений золота Байкало-Патомского пояса формировалась в результате схожих условий, связанных с единым процессом.

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.

Предложена усовершенствованная генетическая модель формирования золоторудных месторождений Бодайбинского региона, на базе которой получены дополнительные поисковые критерии.

Доказано преимущество комплексных беспилотных съемок, позволяющее более оперативно и с низкими затратами, создавать крупномасштабную высокоинформативную картографическую основу для последующих поисков золотого оруденения.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	6
1. Возраста редкометалльного оруденения и соответствующих типов месторождений редких металлов в процессе изменения стиля тектонических движений в истории Земли	7
Введение – методические основы анализа	7
Результаты работы	7
Предварительное заключение.	9
2. Золоторудные месторождения Бодайбинского района	11
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	22
Краткая характеристика района работ	23
Технология и методика комплексной беспилотной съемки	24
Результаты и обсуждение	28
4. Рудно-магматические системы Забайкальского сектора Монголо-Охотского орогенного пояса.	34
5. Золоторудные месторождения Северо-Востока России	41
6. Новые разработки в области микроминералогии благородных металлов	46
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	52
ПРИЛОЖЕНИЕ А_СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМАТИКЕ ПРОЕКТА.....	57

ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ И ОБОЗНАЧЕНИЙ

В настоящем отчете о НИР применяют следующие сокращения и обозначения

АОК – обстановка активных окраин континента

БПЛА – беспилотные летательные аппараты

БПП – Байкало-Патомская провинция

ВП – внутриплитные обстановки.

ГСП – обстановка границ скольжения плит

КО – коллизионная обстановка

ЛЗП – Ленская золотоносная провинция

ОД – обстановка островных дуг

РЗЭ – редкоземельные элементы

РМС – рудно-магматической системы

РСМА – рентгено-структурный микроанализ

САЭС сцинтилляционная дуговая атомно-эмиссионная спектрометрия

СО – субдукционная обстановка

ФН – формы нахождения

ФЭУ – фотоэлектронный умножитель

ЦМР – цифровая модель рельефа

HREE – heavy-group rare earth element

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

ВВЕДЕНИЕ

Целью проекта является: выявление условий изменения металлогении в геологической истории Земли.

Задачи проекта: 1) фундаментальные исследования: 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. 2) Прикладные задачи: разработка геолого-генетических моделей формирования и размещения месторождений полезных ископаемых (МПИ); усовершенствование геолого-геофизических методов поисков МПИ.

В период 2019 года в соответствии с поставленными задачами были получены следующие результаты:

- 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 синклинория.

- 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.

1 Возраста редкометалльного оруденения и соответствующих типов месторождений редких металлов в процессе изменения стиля тектонических движений в истории Земли

Введение – методические основы анализа

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. В публикациях 2017, 2018гг мы определили, что в проблеме эволюции рудообразования в истории Земли главными объектами являются промышленные месторождения, как крупные рудно-геохимические аномалии [1, 2] и показали это на примере месторождений золота и их металлогенических связей [3]. Соответственно в данном анализе эволюции редкометалльного оруденения и обстановок его формирования в истории Земли мы используем тот же подход.

Прежде всего необходимо ввести первоначальное ограничение – 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.

Во-вторых, привязываем формирование месторождений к конкретным геодинамическим обстановкам, принятым в рамках современной геотектонической парадигмы, а именно, коллизионной (КО), субдукционной активных окраин континента (АОК) и островных дуг (ОД), границ скольжения плит (ГСП) и внутриплитных (ВП).

В-третьих, 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.

Результаты работы

В текущем году был завершен анализ золотоносности разных регионов и эпох в истории Земли, который показал, что на ранних этапах развития Земли мантийную металлогению золота определяли орогенные обстановки плюм-тектоники (архей – начало раннего протерозоя), проявление плитной тектоники 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 [3].

Результаты проведенного в 2018-2019 году анализа по месторождениям редких металлов, подтверждают и развивают эти данные. 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 [4], затем известны аналогичные крупнообъемные, но низкоградные объекты мезопротерозоя Руанды и максимальная вспышка и разнообразие месторождений в фанерозое (палеозое и мезозое). Еще более контрастно преобладание фанерозойских эпох проявлено в металлогении олова, для которого известен ряд пегматитовых месторождений в Африке (2.6-2.4 млрд. лет), затем раннепротерозойские месторождения Центральной Бразилии [5], с абсолютным максимумом в мезозое, где в формировании его месторождений преобладали коллизионные и субдукционные обстановки. Для молибдена практически неизвестны месторождения древнее неопротерозоя. Максимумы проявления формирования месторождений молибдена, характерны для палеозоя и позднего мезозоя – кайнозоя, с преобладанием порфирового стиля минерализации, связанного с АОК. Для лития выделяется два периода минерализации 2.8-2.5 млрд. лет (пегматитовый) и моложе 0.5 млрд. лет [6]. Основная масса раннего «пегматитового» этапа была сформирована в фанерозое и это единственный из рассматриваемых элементов, одним из типов месторождений которого являются рассольные системы. Тем не менее, главный тип – это гранитогенные пегматиты, как в докембрии, так и в фанерозое и только в кайнозое преобладает рассольный тип. Висмут, как известно, редко образует собственные месторождения являясь попутной примесью для месторождений золота, олова и вольфрама, однако его минерализация относительно широко проявлена как в древних месторождениях золота, так и в более молодых с выделением собственного золотовисмутитового типа гранитоидных систем в фанерозое [3]. 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 особенно характерно для пегматитовых объектов (месторождения Забайкалья, Приискатель на Колыме и пр.). Собственные промышленные скопления этих элементов, наряду с редкоземельными и цирконием типичны для карбонатитовых и щелочных пород палеопротерозоя, конца мезопротерозоя и фанерозоя [7], которые в настоящее обобщение не входят. Отметим также тесные связи ниобия и тантала с трахитоидным вулканизмом и

щелочными гранитами, появляющимися 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 и на то, что в структурах Африки так же проявлены гранитогенные месторождения тантало-ниобатов (Нигерия), связанные с внутриплитной тектономагматической активизацией. В целом, в распределение тантал-ниобиевого оруденения во времени отмечено два крупнейших цикла: архейский – начала палеопротерозоя и фанерозойский [7, 8]. Бериллиевые проявления также характерны для гранитных пегматитов (около 50% мировых запасов) (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 жизни Земли. Однако есть и редкометалльные альбититы в метаморфических толщах Становика и Алдана с промышленными концентрациями бериллия, связанные с поздними процессами активизации. И, конечно, есть древнейшие пегматиты в Южной Америке и Африке. Все эти объекты возникли в обстановках коллизии, субдукции (АОК), либо ГСП.

Предварительное заключение

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 отличие 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 – [3]) 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 плюм-тектоники и начала плейт-тектоники, то на поздних фанерозойских этапах важнейшую роль стали играть субдукционные процессы активных континентальных окраин, своей энергетикой во многом способствовавшие коровому рециклингу редких элементов;

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

1. По результатам работы подготовлена и опубликована статья:

Горячев Н.А. Месторождения золота в истории Земли // Геология рудных месторождений, 2019, №6 с. 3-18.

2 Золоторудные месторождения Бодайбинского района

В рамках работ 2019 году получены результаты изучения минералогическо-петрографических и изотопных характеристик месторождений, приуроченных к черносланцевым отложениям, расположенных в пределах южного обрамления Сибирского кратона (Патомская, Бодайбинская).

Мамско-Оронский плутоно-метаморфический купол, точнее – морфологически это вал, является тектоно-металлогенической структурой первого порядка для всего Байкало-Патомского региона. Это своеобразная раннепалеозойская (силурийская, по датировкам [9]) орогенная ось данной территории. Анализ материалов 200-тысячных карт и карты миллионного масштаба последнего поколения показывает, что помимо золоторудных объектов разного масштаба [10], 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) [10] 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.

По результатам работ подготовлена и опубликована статья:

Н.А. Горячев, А.В. Игнатъев, Т.А. Веливецкая, А.Е. Будяк, Ю.И. Тарасова // Доклады Академии наук. – 2019. – Т. 484. - № 4. – С. 460–463. DOI: 10.31857/S0869-56524844460-463

Проведено сопоставление минералогических особенностей месторождений разных стратиграфических уровней протерозойского времени (Чертово Корято) и неопротерозойского (Красный).

Месторождение Чертово Корято, расположенного в пределах Кевактинского рудного узла, приуроченного к Тонодскому поднятию и представляющего собой крупный интенсивно тектонически нарушенный блок, заключенный между Кевактинским и Амандракским массивами гранитоидов. Рудная зона месторождения мощностью 150 м и протяженностью 1.5 км, приурочена к висячему боку складчато-разломной области, оперяющей Амандракский глубинный разлом. Рудовмещающей является вторая пачка верхней подсветы михайловской свиты (PR₁ mh₂²).

Специальное минералогическое картирование с помощью аппаратного комплекса QemScan показало, что кварцевые прожилки сопровождаются ореолом кварц-мусковитового (серицитового) метасоматоза в околожильном пространстве. В составе метасоматитов отмечается постоянное присутствие альбита, карбонатов (анкерита и сидерита) и хлорита. При этом в ореоле метасоматитов установлено постоянное присутствие фтор-апатита (до 7.5% фтора) и тиссонита (оксифторида церия-лантана) в тесной ассоциации с кварцем, серицитом и альбитом, а также карбонатов легких РЗЭ (преимущественно церий-лантан-неодима) и оксида церия, образующих мельчайшие изометрические включения в матрице метасоматитов, в соответствии с рисунком 1.

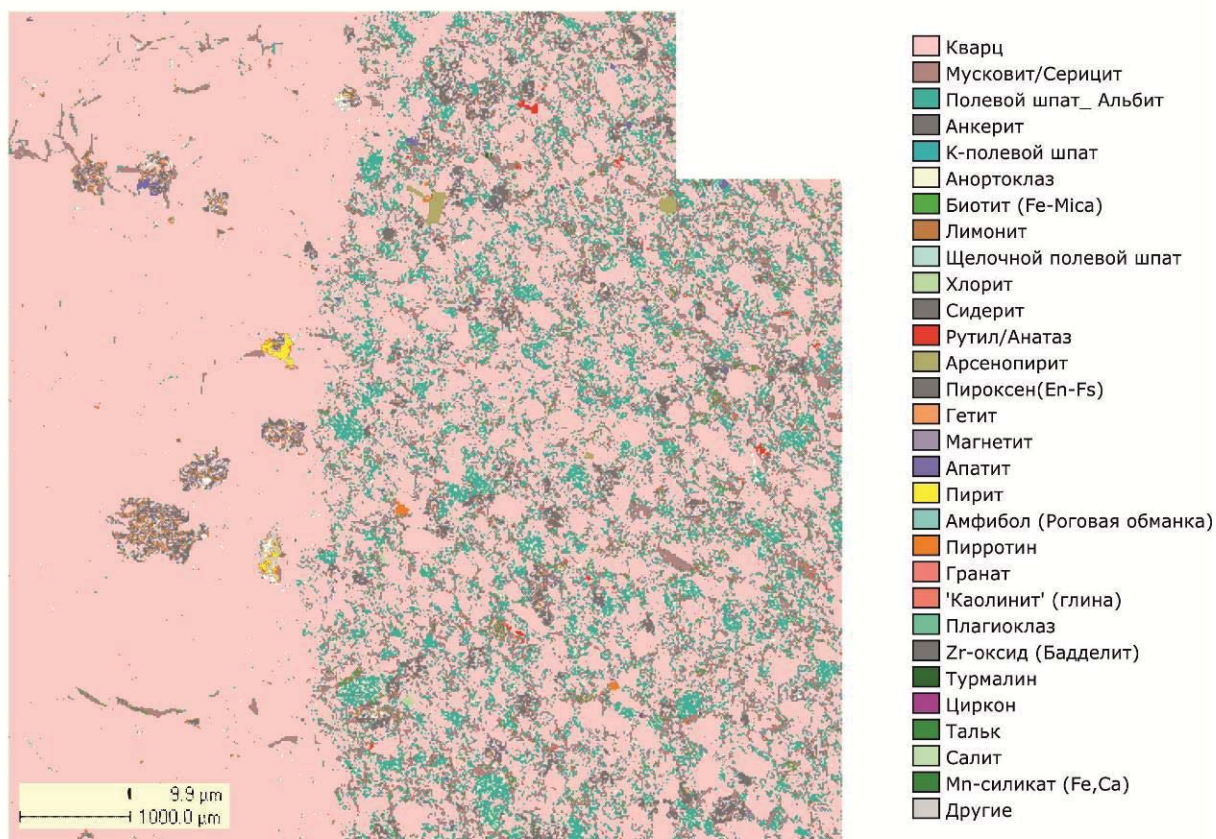


Рисунок 1 – Фото минералогического картирования аппаратным комплексом QemScan

-Золоторудные кварцевые прожилки в пределах рудной зоны сопровождаются ореолом кварц-мусковитового (серицитового) метасоматоза в околожильном пространстве.

Собственно рудная минерализация носит наложенный характер и развивается по зонам метасоматически преобразованных пород. Главным рудным минералом является арсенопирит; широко распространены пирротин и пирит, в меньшей степени - галенит, халькопирит и сфалерит.

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 пирротин-1 и пирит-1 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 [10, 11], который, по мнению В.К. Немерова с соавторами [12] связан с катагенетическим преобразованием рудопродуктивных углеродистых толщ на этапе низкотемпературного метаморфизма Байкальского этапа складчатости [13].

3. Собственно рудный этап формирования месторождения, представленный ассоциацией арсенопирита с пиритом-II и пирротинем-II, связан с наложенными более поздними гидротермально-метасоматическими процессами. Сами минералы отличаются от сульфидов предрудной 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.

На основании минералого-петрографических исследований руд месторождения Красный построена принципиальная схема формирования золотоносной минерализации Бодайбинского района. Месторождение Красный локализовано в породах аунакитской свиты жуинской группы. Выше по разрезу породы аунакитской свиты перекрываются

углеродсодержащими (C_{org} до 10 масс. %) кварц-серицитовыми сланцами с маломощными прослоями углеродистых кварцевых песчаников вачской свиты.

Полученные данные позволяют сделать вывод о том, что формирования рудных тел происходило в результате наложения минеральных ассоциаций, отвечающих различным P-T условиям. На раннем этапе в осадочной толще развивался фрамбоидальный пирит-I, характеризующийся примесью Ni и присутствием микрочастиц самородного Au на поверхности зерен, в соответствии с рисунком 2. Далее, при некотором увеличении P-T параметров (вероятно условия катагенетических трансформаций: $P \sim 1 - 2$ кбар, $T \sim <200^\circ\text{C}$ [26]), развиваются мелкие идиоморфные кристаллы пирита-II, так же содержащего микроразмерное золото на поверхности кристалла.

Minerals	I	II ($T < 200$) ($P \sim 1-2$ Kbars)	III ($T = 300-380$) ($P \sim 5-6$ Kbars)	IV ($T = 270-320$) ($P \sim 0,5$ Kbars)	V ($T < 180$) ($P < 0,5$ Kbars)	VI
Calcite						
Siderite, ankerite						
Quartz regeneration						
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 2 – Схема последовательности формирования рудной минерализации месторождении Красный

Позже, формировалась относительно высокотемпературная ассоциация ($\sim 380^\circ\text{C}$) содержащая пирротин-I, арсенопирит-I. Морфология пирротина-I, близкая по форме с

пиритом-I позволяет предположить, процесс пирротинизации диагенетического пирита-I. Аналогичные формы выделения пирротина установлены на месторождении Сухой Лог [11]. Синхронно с образованием метаагрегатов пирита-III с выделением самородного золота, развивалась наложенная полиметаллическая ассоциация с пирротином-II, содержащая кадмистый сфалерит. В процессе метасоматоза происходило замещение безжелезистых диагенетических карбонатов (кальцит) анкеритом, позже – сидеритом, с синхронным окварцеванием пород и формированием вытянутых в субширотном направлении прожилково-жилвных зон. Пострудный этап представлен развитием крупных кристаллов идиоморфного пирита-IV в кварц-карбонатной оторочке.

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.

Можно отметить и ряд индивидуальных черт, характерных для месторождения Красный. 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 Красный сходно с месторождениями Вернинское и Невское, которые также расположены в метаосадочных породах аунакитской свиты.

По результатам работ подготовлена и отправлена статья

1) **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 (принята к печати)

2) **Будяк А.Е.,** Иванов А.В, и др. «Об источнике рудного компонента и возрасте формирования рудной минерализации месторождения Чертово Корыто» (в работе ...)

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.) [14-16]. Возраст отложений горизонта ~610–635 млн лет [17, 18] 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 [15, 19-21].

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 [22, 15].

Таким образом, была обоснована вероятность эшелонированного оруденения для месторождений указанных стратоуровней. В результате проведенной работы, 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 3, Голец Высочайший, в соответствии с рисунком 4, 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.

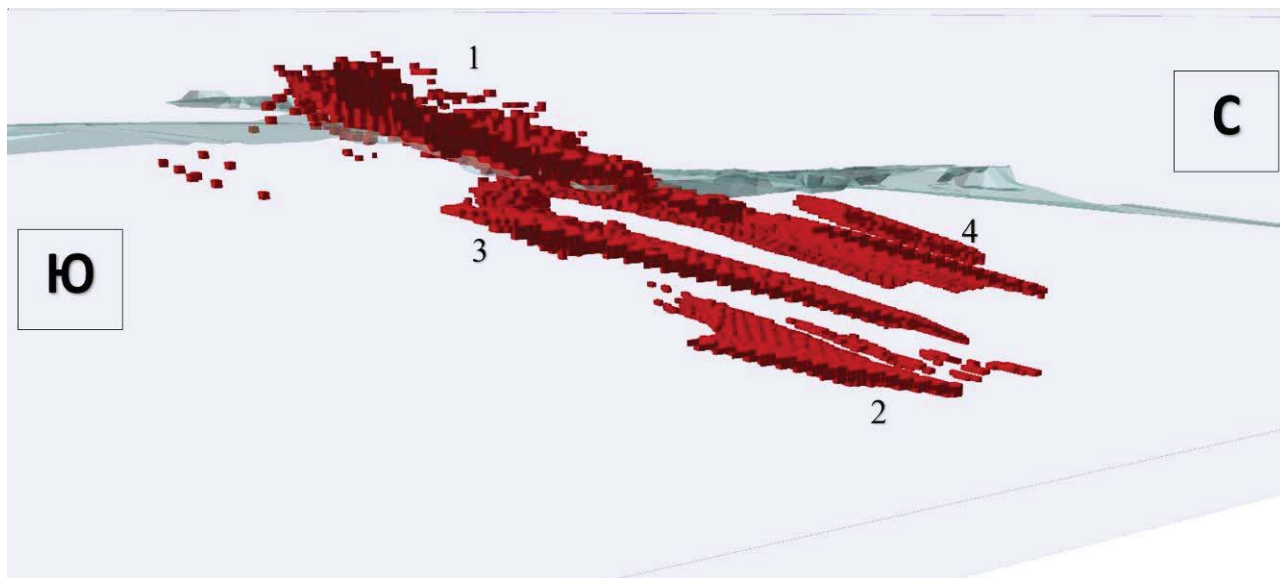


Рисунок 3 – Каскадное строение рудных тел месторождения Угахан
– 1, 2 – выявленные на стадии разведки рудные тела; 3,4 – новые слепые тела (М 1:300)

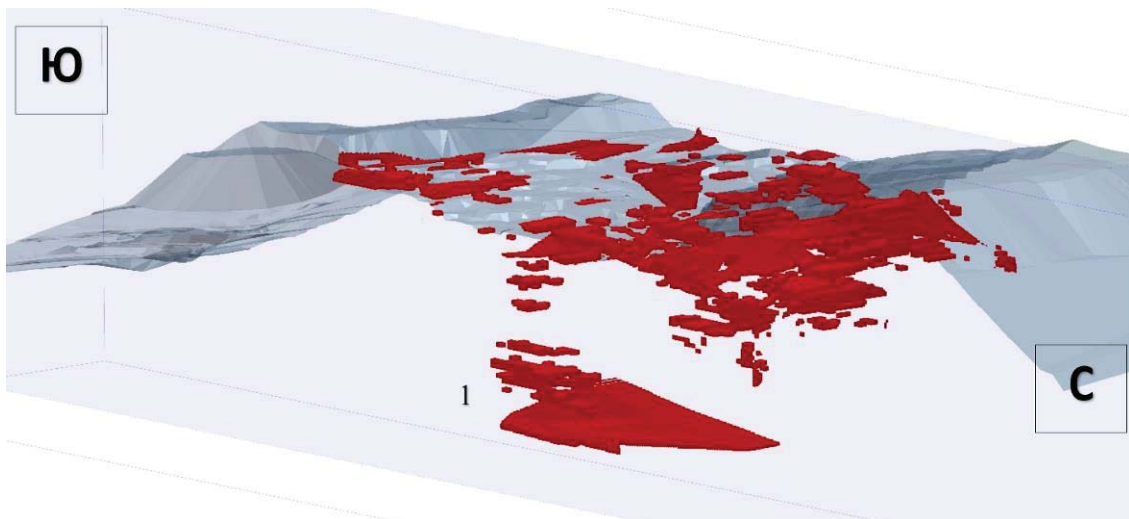


Рисунок 4 – Геологический разрез по месторождению Голец Высочайший – юго-запад – северо-восток. Данные 2018 года
–1 - Нижний эшелон оруденения) (М 1:300)

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);

По результатам работ подготовлена и отправлена статья

1 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 2020. (принята к печати)

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.

Возникновение вариаций $^{238}\text{U}/^{235}\text{U}$ в различных природных объектах связывают с процессом редукции $\text{U(VI)} \rightarrow \text{U(IV)}$, который сопровождается фракционированием ^{238}U , ^{235}U [23]. При этом восстановленный U обогащается тяжёлым изотопом ^{238}U . Таким образом, $^{238}\text{U}/^{235}\text{U}$ — чувствительный геохимический индикатор, отражающий

изменение окислительно-восстановительных условий в осадочных палеобассейнах. В свою очередь, изучение вариаций изотопного состава U осадочных пород дает возможность оценить вклад Мирового океана как одного из глобальных геохимических резервуаров в общий масштаб природных вариаций $^{238}\text{U}/^{235}\text{U}$ в геологических объектах Земли. 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.).

Изучение изотопного состава U проведено по валовым пробам метаосадочных пород. Применённый метод многоколлекторной масс-спектрометрии с ионизацией вещества в индуктивно связанной плазме (MC-ICP-MS) включал использование двойного изотопного ^{233}U – ^{236}U -трассера [24] для учёта фракционирования изотопов U в процедурах анализа. Высокоточные измерения $^{238}\text{U}/^{235}\text{U}$ в моноэлементных препаратах U выполняли масс-спектрометре NEPTUNE PLUS, оснащённом J-интерфейсом. Вариации $^{238}\text{U}/^{235}\text{U}$ в метаосадочных породах БПП изучены по 15 образцам, которые преимущественно относятся к терригенным породам. Проанализированные образцы характеризуют отложения всех основных стратиграфических серий Патомской (6 проб) и Бодайбинской зон (9 проб) БПП.

Вариации $^{238}\text{U}/^{235}\text{U}$ в породах разрезов Патомской и Бодайбинской зон весьма близки: для Патомской зоны $^{238}\text{U}/^{235}\text{U}$ от -0,37 до -0,13; для пород Бодайбинской зоны —от -0,31 до -0,11‰. По диапазону величин $\delta^{238}\text{U}$ в пределах от -0,37 до -0,11‰ (при среднем значении $\delta^{238}\text{U} = -0,25 \pm 0,08\%$, SD) неопротерозойские метаосадочные породы БПП близки к раннедокембрийским (~2,5 млрд лет) чёрным сланцам бассейна Хамерсли (Западная Австралия), для которых $\delta^{238}\text{U}$ от -0,39 до -0,02‰ (при среднем $\delta^{238}\text{U} = -0,24 \pm 0,1\%$). По величинам $\delta^{238}\text{U}$ U изученных нами пород тяжелее U морской воды ($\delta^{238}\text{U} = -0,41 \pm 0,03\%$) и отвечает области значений современных осадков ($\delta^{238}\text{U} = -0,28 \pm 0,19\%$), формирование которых происходит в открытых морских бассейнах на континентальных склонах в слабо окислительных условиях.

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

Как известно, отложения балаганахской 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”. Предполагаются, что в позднеэдиакарское время сформировался достаточно изолированный бассейн с застойными условиями и анаэробной обстановкой в зонах осадконакопления [15]. 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. 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, в соответствии с рисунком 5.

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 [25]. 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, балаганахской серий.

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. Учитывая это, а также объективный тренд на роботизацию и цифровизацию всех сфер человеческой деятельности, становится объяснимой высокая востребованность и стремительное развитие появившихся технологий низковысотных дистанционных зондирований Земли, основанных на геофизических методах поисков. 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 [26-28]. В последние годы особенно широкое распространение в мире получили технологии низковысотной магниторазведки, выполняемой с помощью мультироторных БПЛА [29-31], которые в некоторых регионах уже фактически заменили традиционный наземный вариант съемок. Существенно меньшее распространение в области геологических поисков получили технологии БПЛА-гамма-съемок [32, 33], хотя они уже несколько лет успешно применяются в области радиоэкологии [27, 34, 35].

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. Это обусловлено самой ролью беспилотной аэрогеологии как инструмента, особенно необходимого на первых стадиях геологической разведки. Важнейшее преимущество низковысотных съемок беспилотными системами заключается в возможности оперативного получения малозатратных и высокоинформативных данных о слабо изученных площадях с неясными ресурсными перспективами, когда целесообразность значительных инвестиций не очевидна. Поддержка принятия решений в результате получения объективных и детальных геоданных на первых, наиболее рискованных стадиях геологоразведки, имеет определяющее значение, а наличие нескольких видов информации, фиксирующих

различные производные от геологической ситуации, позволяет судить о ней значительно более обоснованно. Причем если высокая геологическая эффективность беспилотных съёмок может быть достигнута и за счет последовательного выполнения работ беспилотными системами, несущими только один вид полезной нагрузки, то кратное повышение производительности и экономической эффективности требует реализации одновременно нескольких съемок на одном БПЛА. Это технически и методически более сложно как по причинам различных скоростей и режимов измерений различных геофизических методов, или возможном влиянии помех от одного измерительного оборудования на другое, так и по банальной причине повышения массы полезной нагрузки БПЛА.

Проблему формирования научно-методических основ эффективного применения беспилотных систем можно решать путем выделения и анализа типичных кейсов их применения. Одной из задач, в которых применение беспилотных систем может быть наиболее эффективным, является оценка перспективности слабоизученных площадей, прилегающих к известным лицензиям, поскольку при выполнении геофизических работ на переходе с хозяйственно освоенного объекта на малоизученные площади возникают проблемы наличия техногенных аномалий и необходимости их учета при интерпретации данных.

Краткая характеристика района работ

Работы проводились на флангах месторождения Угахан в Бодайбинском районе Иркутской области. Геологическое строение и золотоносность Бодайбинского синклинория детально описаны в литературе [15, 16, 36]. Район характеризуется среднегорным рельефом с перепадом высот между водотоками и водоразделами в несколько сотен метров, пешеходные геофизические работы затруднены из-за заболоченности низин, каменных осыпей на склонах и повсеместно распространенных густых зарослей карликового кедра [28].

Как было описано выше, 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. 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, обусловленной местным перераспределением обогащенного калием и ураном флюида на этапе формирования рудных тел. 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.

Технология и методика комплексной беспилотной съемки

Для выполнения геофизической съемки применялся мультироторный вариант развиваемого авторами на протяжении последних пяти лет комплекса SibGIS [28 - 30]. Современный базовый вариант этого комплекса, в отличие от первых «монометодных» вариантов 2014-2017 гг., предназначен для выполнения одновременной съемки двумя наиболее геологически универсальными геофизическими методами – магниторазведки и гамма-съемки. Соответственно базовыми сенсорами являются оверхаузероский магнитометр, основным преимуществом которого являются высокоточные абсолютные измерения модуля полного вектора напряженности магнитного поля, и легкий компактный радиометр с более эффективным и температурно стабильным по сравнению с традиционным йодидом натрия сцинтиллятором CsI(Tl) и нечувствительными к перепадам температуры и электромагнитным помехам кремниевым ФЭУ. Арсенал доступных полезных нагрузок включает также гамма-спектрометры с различными типами кристаллов, мультиспектральные фотокамеры, электроразведочную систему и экспериментальный твердотельный лидарный сканер. Характеристики полезных нагрузок приведены в таблице 1, а комплекс в базовом варианте, в соответствии с рисунком 6.



Рисунок 6 – 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 63х63, (D) экспериментальный лидарный сканер твердотельного типа

Суммарная масса магнитометра и радиометра с выносным подвесом составляет 2.3 кг, что обеспечивает эффективную продолжительность полетных заданий в среднегорных условиях до 10 км. Это позволяет с каждой точки взлета выполнять съемку на площади порядка 10-15 квадратных километров (если полеты выполняются в обе стороны). Дополнительно нужно отметить, что за последние годы крейсерская скорость полета возросла до 10 м/с, а предварительные полеты для проверки корректности полетных миссий с 2016 года больше не выполнялись, поскольку практика показала отсутствие в них необходимости в связи с увеличением количества точек в полетных контроллерах, появлению более точных спутниковых ЦМР [35] и развитию технологий фотограмметрической обработки данных.

Таблица 1 – Характеристики полезных нагрузок

Payload	Характеристика	Масса, кг	Sampling rate, Hz
Magnetometer	Протонный оверхаузеровский, Абсолютная погрешность не более 1 нТл	1,60	от 1 до 4
Gamma-radiometer	2 блока детектирования CsI(Tl) 8x100mm с кремниевыми фотодетекторами Погрешность по интегральному потоку не более 15%	0.3	0.5
Gamma-spectrometers	Кристаллы CsI(Tl) 40x80, 63x63; CsI(Na) 30x150, вакуумные ФЭУ	0.8 - 2.1	0.5 (радиометрия), 0.1 - 0.02 (полный спектр)
Multispectral cameras	Блок из двух камер Разрешение 12 Mpix Five spectral channels: Visible Light RGB + Yellow 615nm and NIR 820nm	0.2 без GPS-модуля	0.2 – 0.5
LiDAR (experimental prototype)	Based on one or two 16-segments solid-state M16-LSR modules (Ground Sampling Distance ~1.8 meters/pixel at flight height 80 m) Длина волны NIR 905 nm Погрешность определения расстояния в пределах 5 см	0.7	от 10 до 20

Кратко обозначим основные позиции методики комплексной геофизической съемки:

1. Предварительное создание цифровой модели рельефа необходимой точности (методом мультиспектральной фотограмметрии, лидарной съемки, либо же на основе топокарт предшественников, или спутниковых моделей рельефа). Точность и детальность ЦМР должна соответствовать требованиям «Методических рекомендаций по маловысотной аэромагнитной съемке, 2018» [33] для конкретного масштаба и класса точности геофизической съемки – например, для работ в масштабе 1:10000 рядовой точности (расстояние между профилями 100 метров), допускается использование спутниковых ЦМР SRTM и Alos DEM, а высокоточные работы масштаба 1:5000 требуют уже кондиционных топографических масштаба не ниже 1:10000.

2. Непосредственно по прибытии полевой группы на точку съемки, с помощью модуля SibGIS Flight Planner производится создание массивов точек полетных миссий таким образом, чтобы точность обтекания рельефа удовлетворяла требованиям

вышеупомянутого регламента, который устанавливает пределы плановой и вертикальной погрешности позиционирования БПЛА относительно земли в зависимости от масштаба и класса точности съемки.

3. Загрузка полетной миссии в полетный контроллер. Взлет и посадка БПЛА обычно осуществляется в ручном режиме, полет проходит на автопилоте. Геофизические измерения производятся с указанной в таблице 1 частотой, результаты записываются в память регистратора вместе с точным спутниковым временем. Магнитометрические измерения сопровождаются вариационными наблюдениями.

После завершения миссии осуществляется замена батареи БПЛА и действия п. 3 повторяются.

4. Экспорт данных и их обработка – учет вариаций, сопоставление результатов измерений с координатами, полученными с полетного контроллера (который может быть оснащен системой RTK и лазерным высотомером), производятся с помощью специализированных модулей, которые как и модуль SibGIS Flight Planner реализованы как плагины для открытой геоинформационной системы QuantumGIS. Данные, полученные с помощью беспилотного комплекса SibGIS UAS, не требуют каких-либо дополнительных программных увязок или фильтрации - уже в первых работах [33] было показано, что в связи с высокой точностью измерений и полным устранением электромагнитных помех от носителя, данные сразу пригодны для картографирования и анализа. Представленные в данной работе схемы полей получены интерполяцией методом simple kriging с радиусом 120 метров для магнитной съемки, и методом локальной полиномиальной интерполяции полиномом 5-го порядка и радиусом 300 метров – для гамма-съемки.

Мультиспектральная аэрофотосъемка обычно выполняется с помощью того же БПЛА, с которого затем выполняется геофизическая съемка, но в связи с меньшей массой полезной нагрузки, время полета, а соответственно и продолжительность полетных задний, может быть в два-три раза больше, а скорость полета достигать 12 м/с. Фотограмметрическая обработка материалов мультиспектральной аэрофотосъемки и создание цифровых моделей местности и рельефа выполняется с помощью открытого программного обеспечения OpenDroneMap, а расчет мультиспектральных индексов, полезных для анализа геологической или ландшафтно-морфологической обстановки, таких как Iron Oxide Index, WorldView Soil Index и других – с помощью растрового калькулятора QuantimGIS.

Результаты и обсуждение

Для оценки качества получаемых данных на рисунке 7 приведены первичные данные измерений, пропуск в данных обусловлен наличием техногенных отвалов, съемка поверх которых не велась. В таблице 2 дан пример оценки точности съемки по нескольким точкам с контрольных профилей, находящимся в различных частях участка. Среднеквадратическая погрешность магнитной съемки составляет менее 1.5 нТл, гамма-съемки – менее 8%.

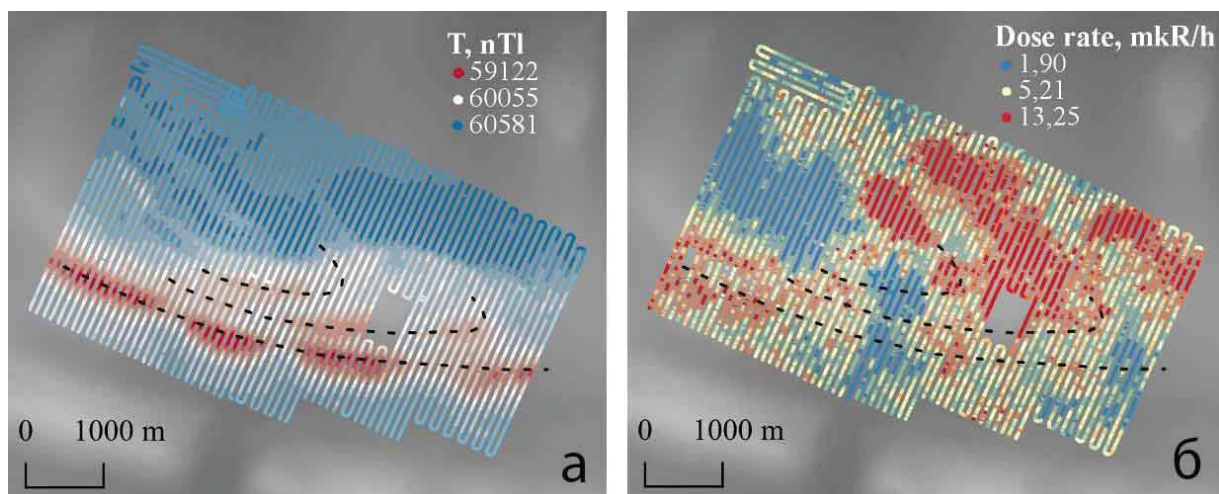


Рисунок 7 – Первичные данные съемки: а – магнитная съемка (с учетом вариаций) – Пунктиром обозначены предполагаемые рудные пачки в пределах бужуйхтинской свиты; б – первичные данные гамма-съемки

Таблица 2 – Оценка погрешности геофизической съемки по рядовым и контрольным маршрутам

Magnetic Survey, nTl		Gamma Survey, mkR/h	
Ordinary measurement	Control measurement	Ordinary measurement	Control measurement
60380,9	60381,1	4,82	5
60140,7	60141,1	3,51	3,09
60069,4	60070	4,28	3,77
59903,2	59906,1	8	8,33
60003,2	60004,6	10,54	9,7
60398,1	60396,1	5,06	4,79
60398,2	60399,1	9,83	9,58
60402,2	60401,2	8,65	8,23
600095,7	600096,2	6,79	6,16
60375,2	60374,7	7,86	7,65
Standard error	1,38 nTl	Standard error	7,68%

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 [37], 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 [28, 33]. Кроме того, поскольку часть участка подвержена техногенным изменениям, для правильной интерпретации результатов гамма-съемки было необходимо получить дополнительные информационные материалы, картирующие эти изменения.

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. Такой канал с длиной волны 820 нм имеется и в составе мультиспектральных камер комплекса SibGIS UAS, данные показаны в таблице 1.

На рисунке 8 представлены полученные результаты съемок – магнитной, гамма, и мультиспектральной в виде индекса NDVI, с вынесенными на них элементами интерпретации, обсуждаемыми далее.

Полученную схему магнитного поля, представленную на рисунке 7, 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. В данный момент в эксплуатацию карьером вовлечено

оруденение в лежащем крыле. 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 рисунками 7 и 8 пунктиром. Действительно, в соответствии с описанной выше моделью, предполагалось, что между рудными горизонтами наличествуют карбонатные толщи, являющиеся покрывкой и не дающие рассеяться рудному флюиду на предрудном этапе, когда катагенный флюид концентрируется в антиклинальных ловушках. 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 7. Рудные столбы, расположенные в пачке bz_2^1 в настоящее время отрабатывается карьером. Пачка bz_2^5 характеризуется аномалией максимальной контрастности, к ней приурочено второе разведанное на месторождении тело.

Гамма-поле, в соответствии с рисунком 8, фиксирует несколько аномалий различной интенсивности. Анализируя одновременно рисунки 8б и 8в становится понятно, что аномалии максимальной интенсивности соответствуют техногенно нарушенным участкам. В то же время в юго-западной части изученной площади фиксируется еще одна протяжённая аномалия повышенных значений гамма-фона субмеридианального простирания. Ее можно считать породной, поскольку техногенных объектов по данным мультиспектральной съемки здесь не фиксируется. 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.

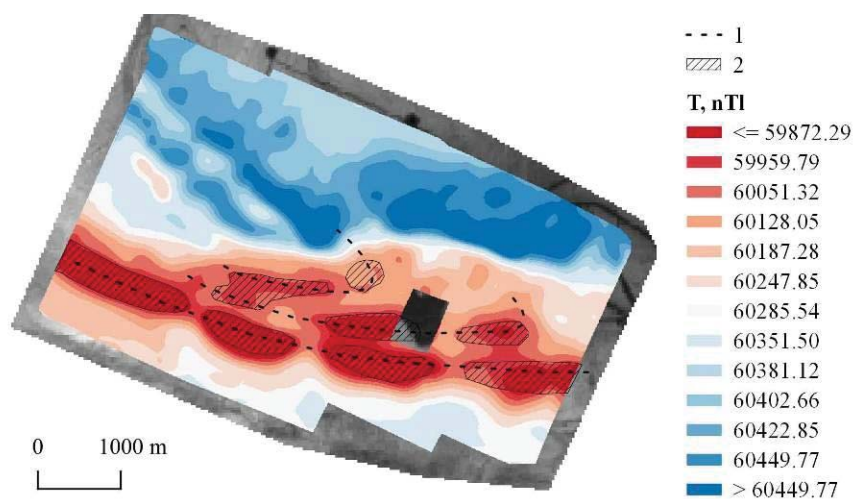


Рисунок 8 а – Схема магнитного поля участка (классификация квантилями)
 – 1 - предполагаемые рудные пачки в пределах бужуйхтинской свиты; 2 – перспективные по комплексу признаков участки в висячем крыле складки

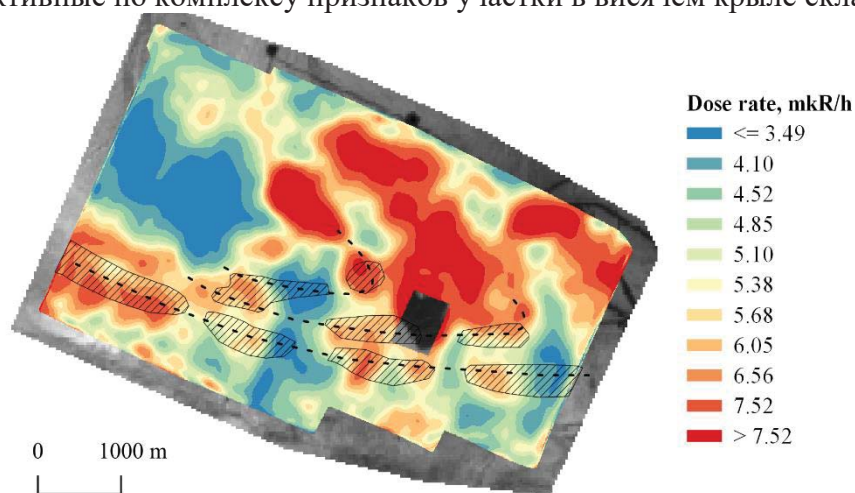


Рисунок 8 б – Схема гамма-поля участка (классификация квантилями)

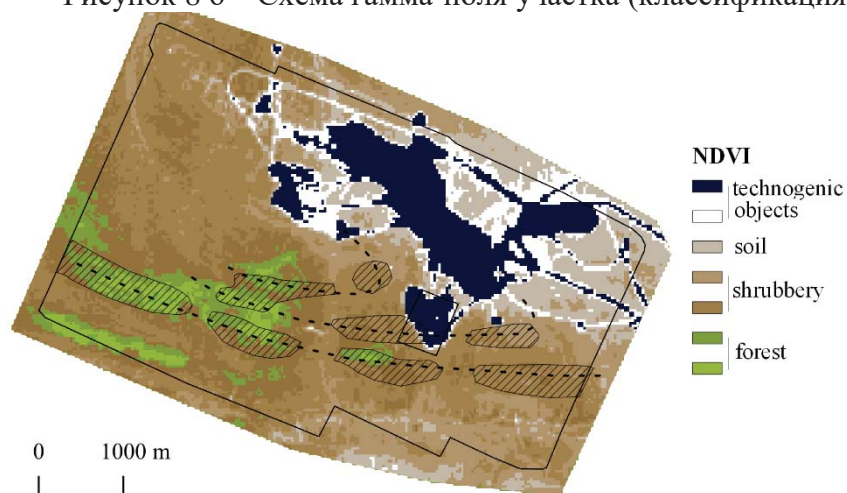


Рисунок 8 в – Индекс биомассы растительности, рассчитанный по данным мультиспектральной съемки

Сопоставляя результаты магнитной и гамма-съемки, фиксируем совпадение двух поисковых критериев – отрицательных аномалий магнитного поля, вызванных пирротинном, в совокупности с повышенной радиоактивностью отложений бужуихтинской свиты на юго-западном краю площади и юго-западном участке. Эти участки были выделены как наиболее перспективные для поискового бурения.

Что касается северного крыла складки, в настоящее время уже вовлеченного в эксплуатацию, то весьма вероятно, что оно проявлялась в гамма-поле аномалиями повышенной радиоактивности аналогично лежащему крылу и до начала хозяйственной деятельности, а нарушение растительного покрова и почвы на этом участке просто повысило контрастность аномалий. Но ряд других аномалий повышенной радиоактивности в северо-восточной части участка съемки безусловно имеют техногенный характер, который характеризуется повышенной радиоактивностью.

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.

Таким образом важным преимуществом комплексных беспилотных съемок в данном кейсе является возможность более оперативно и с низкими затратами, основываясь на понимании генезиса золоторудных объектов, создавать крупномасштабную высокоинформативную картографическую основу для последующих поисков золотого оруденения. Необходимо отметить, что отдельно магниторазведка без гамма-съемки не позволяет решать задачи прогноза, поскольку аналогично проявляющаяся сульфидная минерализация в данном регионе встречается повсеместно и в пределах совершенно неперспективных на золото вещественно-структурных подразделений, а геологические карты, созданные предшественниками в конце 20 столетия, относятся к масштабным уровням 1:200000, в лучшем случае 1:50000, и геологические границы на них недостаточно точны. Таким образом 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.

По результатам работ подготовлены и отправлены следующие статьи:

1) **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. V. 188. P. 271-276.

2) **A. Parshin, A. Budyak**, I. Chebokchinov, V. Sapunov, A. Bulnayeve 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.

3) 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 (Scopus)

Подготовлена:

4) **A. Parshin, A. Budyak, V. Babyak** (2020) Methodological features of the interpretation of the results of complex unmanned airborne geophysical surveys: case “additional prospecting of sites near a known ore deposit” IOP Earth. Env. Sci (принята к печати)

4 Рудно-магматические системы Забайкальского сектора Монголо-Охотского орогенного пояса

В 2019 г. 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, P.

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.), В (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 [38]. 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 [38]. Проиллюстрировать это можно с помощью диаграммы Th/La – Sm/La, приведенной на рисунке 9.

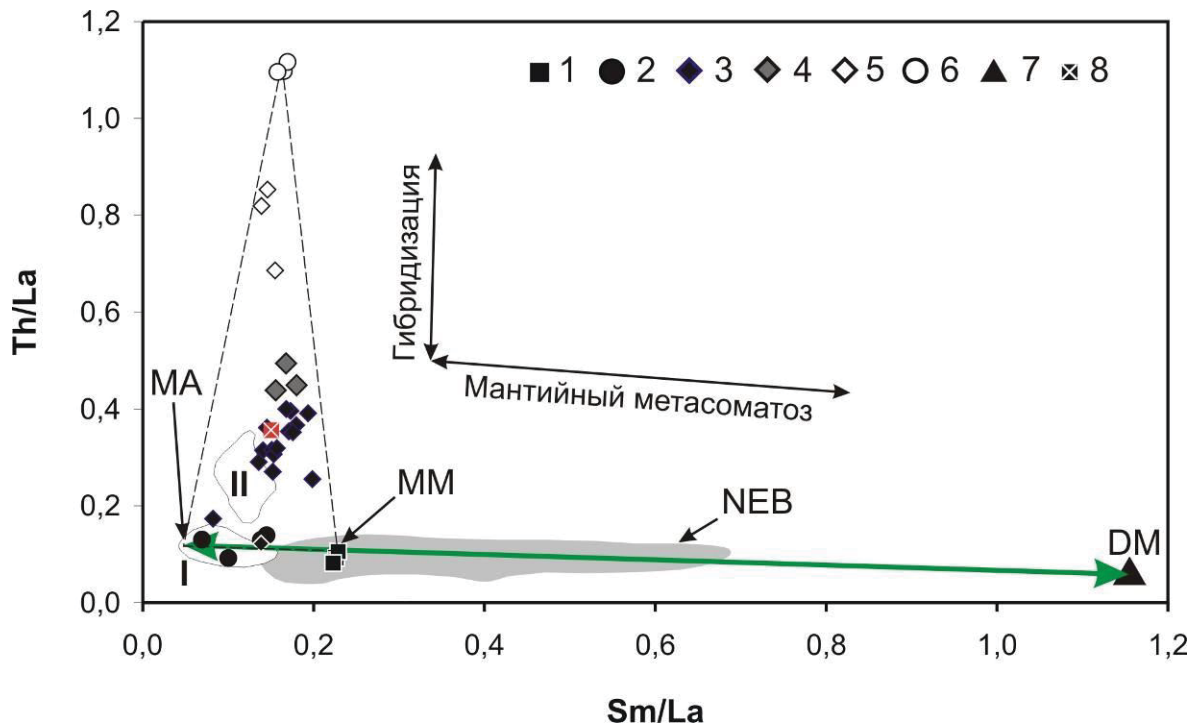


Рисунок 9 – Диаграмма Sm/La – Th/La для производных средних и кислых магм амуджикано-сретинского комплекса

– 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 [44]. MA – метасоматизирующий агент. MM – метасоматизированная мантия. NEB – поле составов высокониобиевых 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 [39].

Для иллюстрации процесса формирования геохимически специализированного субконтинентального литосферного источника на диаграмму нанесены поля составов базитов NEB, адакитов LSA и санукитоидов, взятых из работ [40-43, 45]. Мы видим, что все эти поля группируются вдоль линии смещения 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 [46]. 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 [38], 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 [45, 46].

По результатам работ подготовлена и опубликована статья:

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, No 6, с. 772—788.

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 10.

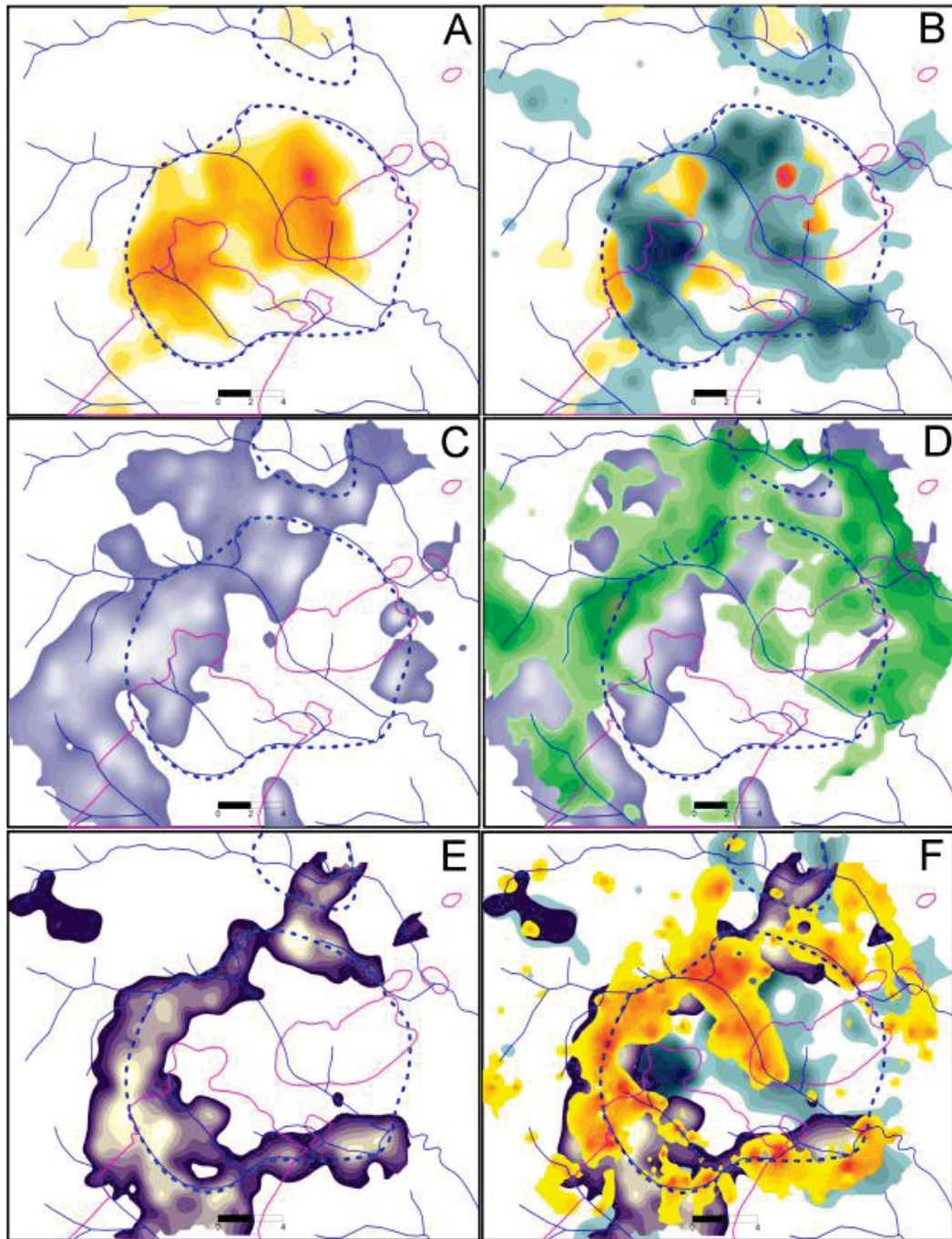


Рисунок 10 – Геохимические поля различных стадий минерализации Карийской рудно-магматической системы

– 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.

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 позднеорогенный 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.

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.

По результатам работ подготовлена статья:

Ефремов С.В., Спиридонов А.М., Горячев Н.А., Будяк А.Е. Использование мелкомасштабных геохимических съемок для расшифровки эволюции Карийской рудно-магматической системы (В. Забайкалье) // Геология рудных месторождений, направлена в редакцию, этап рецензирования.

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.

По результатам работ опубликована статья

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)

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.

По результатам работ опубликована статья

Юргенсон Г.А., **Горячев Н.А.**, Посохов В.А. // Вестник Забайкальского государственного университета. 2019. Вып. 25, № 9. С. 33–41. DOI: 10.21209/2227924520192593341.

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-Vi минерализации.

По результатам работ подготовлена и отправлена статья:

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

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 кварцадуляровых 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 11.

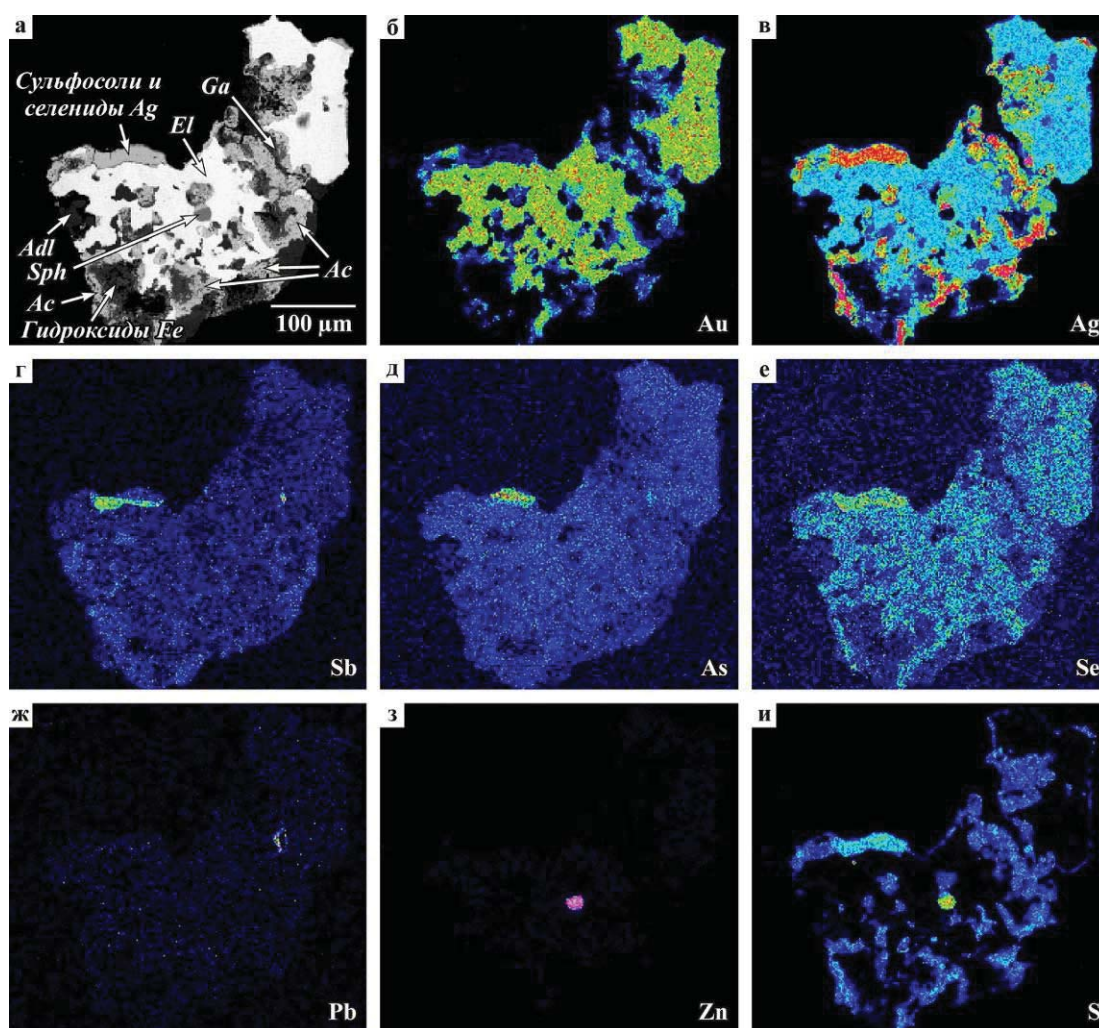


Рисунок 11 – Зерно электрума (*El*) в сростании с акантитом (*Ac*), сульфосолями и селенидами Ag, сфалеритом (*Sph*), галенитом (*Ga*), адуляром (*Adl*) и гидроксидами Fe – Изображения даны: а – в обратно-рассеянных электронах; б(Au), в(Ag), г(Sb), д(As), е(Se), ж(Pb), з(Zn), и(S) – в рентгеновских лучах (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, в соответствии с рисунками 12 и 13.

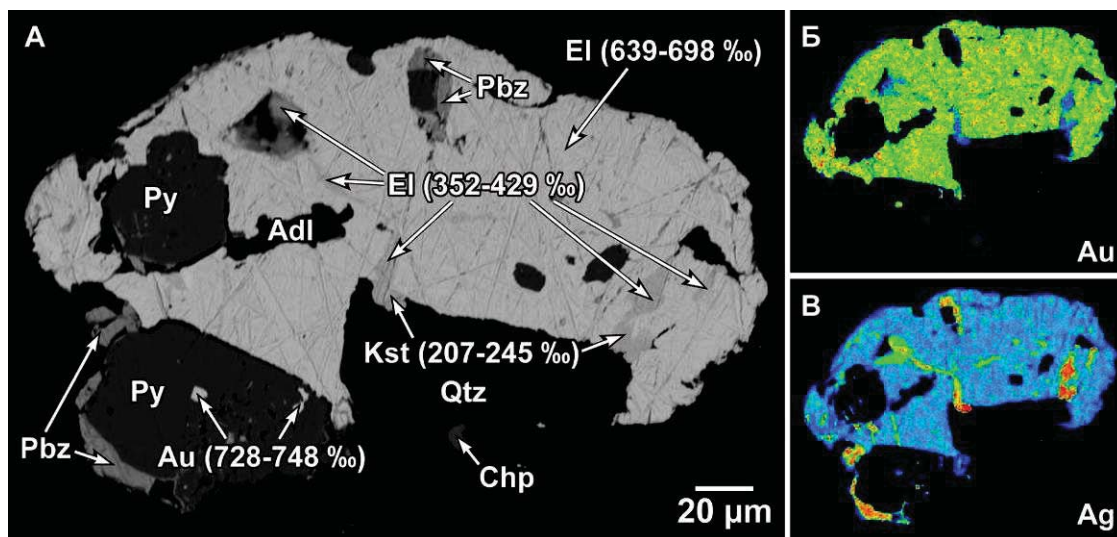


Рисунок 12 – Частица самородного золота неоднородного состава – Au – низкопробное самородное золото, EI – электрум, Kst – кюстелит, Pbz – полибазит, Py – пирит, Chp – халькопирит, Qtz – кварц, Adl – адуляр. Изображения даны: А – в обратно-рассеянных электронах, Б, В – в рентгеновских лучах (данные РСМА). Месторождение Дальнее

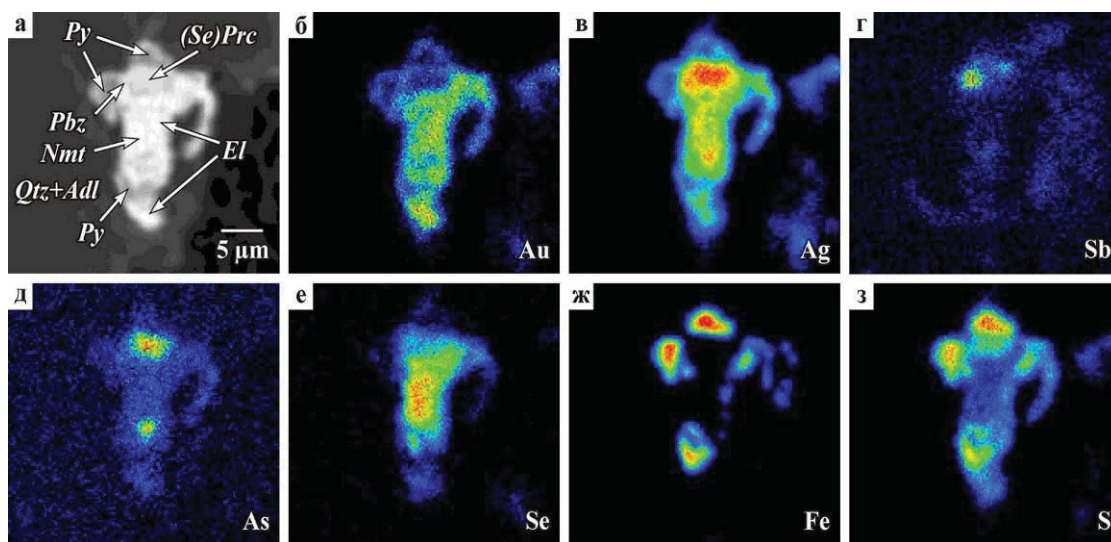


Рисунок 13 – Включение, состоящее из тонкодисперсного электрума (EI) в сростании с науманнитом (Nmt), Se-пирсеитом ((Se)Prc), полибазитом (Pbz) и пиритом (Py) в кварц-адуляровой массе (Qtz+Adl) – Изображения даны: а – в обратно-рассеянных электронах; б(Au), в(Ag), г(Sb), д(As), е(Se), ж(Fe), з(S) – в рентгеновских лучах (данные РСМА). Месторождение Кварцевая Сопка

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, в соответствии с таблицей 3.

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-Эриkitский ртутноносный 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.

Таблица 3 – Состав (мас. %) самородного золота (по данным РСМА). Месторождение Роговик

n		Au	Ag	Hg	Fe	Se	Cu	Сумма
1	Зерно 1	25.14	61.63	12.60	<0.08	<0.08	<0.08	99.37
2		19.11	59.76	18.03	1.23	0.72	<	98.84
3		13.31	71.99	14.06	<0.08	0.22	<	99.58
4	Зерно 2	59.66	29.39	10.43	<	<0.08	0.41	99.89
5		95.17	1.27	1.93	0.14	<	<0.08	98.51
6		85.35	11.61	2.58	<0.08	<	<	99.54
7		91.89	6.99	0.90	<	<	<	99.78
8	Зерно 3	70.03	28.29	0.16	<	1.40	<	99.88
9		70.00	27.33	2.28	<	<0.08	0.25	99.86
10	Зерно 4	31.80	55.47	11.92	<	<	0.09	99.31
11		31.86	50.50	16.88	0.65	<	<0.08	99.89
12		28.82	52.30	18.89	0.12	<	<	100.12
13	Зерно 5	59.22	29.58	10.62	<	<	<	99.42
14	Зерно 6	16.25	65.65	17.03	0.23	<	<	99.16

Примечание. Sb, As, Pb, Zn, Ni, Co, Mo, W, Sn, Bi, Ge, Te, S, – не обнаружены.

По результатам работ готовится статья

Кравцова Р.Г., Макшаков А.С., Павлова Л.А. Самородное золото эпитермальных золото-серебряных месторождений Северного Приохотья

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 рисунками 14, 15, из неминеральных ФН – примесное Au в сильно разрушенном пирите, серебро в галените, сфалерите и их вторичных образованиях. Установлено, что вещественный состав аллювия, хорошо согласуется с составом и ФН этих элементов в рудах.

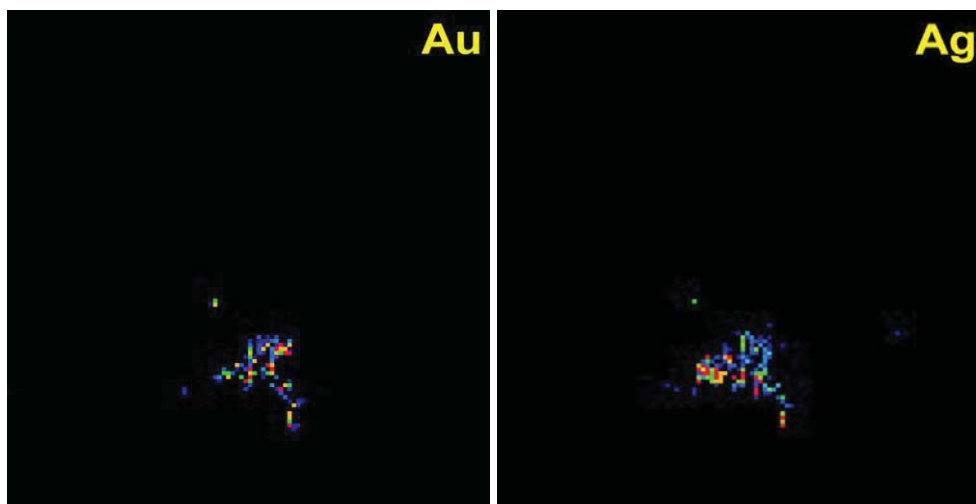


Рисунок 14 – Тонкодисперсные (6-8 мкм) частицы электрума (Au) и сульфосолей серебра (Ag) в аллювиальных отложениях водотоков, дренирующих Au-Ag зоны Дукатского месторождения

– Изображение дано в рентгеновских лучах (данные РСМА)

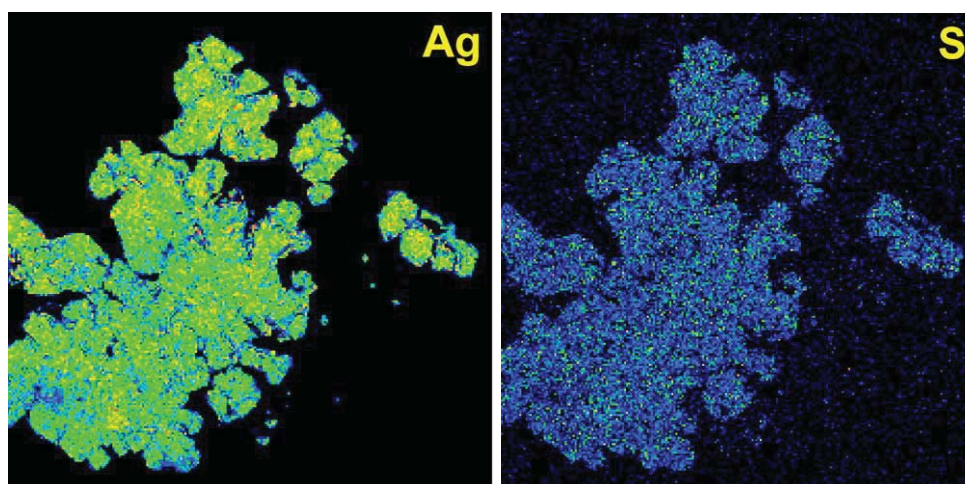


Рисунок 15 – Мелкие (50x60 мкм) корродированные зерна акантита в аллювиальных отложениях водотоков, дренирующих Au-Ag зоны Дукатского месторождения

– 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.

По результатам работ опубликованы статьи:

1. Makshakov A.S., **Kravtsova R.G.**, Tatarinov V.V. Lithochemical stream sediments of the Dukat gold-silver ore-forming system (North-East of Russia) // Minerals, декабрь 2019, V. 9, №12, Номер статьи 789, DOI: 10.3390/min9120789.

2. Макшаков А.С., **Кравцова Р.Г.**, Татаринов В.В. Потоки 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 (25-29 ноября 2019 г., Москва). Сборник материалов - М.: ИГЕМ РАН, 2019, с. 237-240.

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 4.

Таблица 4 – 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

Разработанная последовательность этапов обработки спектральной информации позволяет описать элементные и минеральные ассоциации БМ, размеры частиц

интерметаллидов всех БМ, а также распределений по крупности частиц самородных Au, Ag, Pt, Pd.

На основе экспериментальных исследований проб золоторудных месторождений в черных сланцах сформулированы предложения по совершенствованию метода САЭС и разработке технологии автоматизированной микроминералогии на основе метода САЭС, которая включает:

1) получение по определённой схеме (в заданных оптимизированных условиях) большого количества измерений аналитических сигналов от различных элементов в атомно-эмиссионных спектрах пробы;

2) компьютерную обработку полученных многомерных массивов данных с использованием набора алгоритмов.

Метод САЭС является относительно новыми, поэтому первоначальная настройка спектрометров для выполнения анализа включает такие этапы, как:

– выбор условий получения и регистрации сцинтилляционных дуговых атомно-эмиссионных спектров;

– выбор наилучших аналитических линий определяемых БМ, элементов-спутников и элементов, характеризующих интересующие минеральные ассоциации;

– коррекция измеряемой интенсивности спектральных линий и фона на влияние макросостава, спектральных помех, приборных шумов и др.;

– градуировка по элементному составу и экспериментальная оценка пределов обнаружения;

– градуировка измеренных аналитических сигналов по размерам частиц;

– контроль качества результатов измерений состава и размеров.

– минералогический анализ на основе результатов корреляционного анализа данных;

– составление протокола результатов САЭС минералогического анализа

– сравнение с результатами, полученными с использованием других методов исследования микро-минеральных фаз БМ.

3) Задачи современного САЭС:

– выбрать оптимальную конфигурацию спектрометра для САЭС по светосиле, спектральному и временному разрешению (сочетания оптической и регистрирующей систем);

– унифицировать способы градуирования САЭС по содержанию и размеру в зависимости от интенсивности аналитических сигналов БМ (выбор аналитических линий,

СО для градуировок по содержанию и размерам для моно- и бинарных и более сложных индивидуальных минеральных фаз-носителей БМ).

– создать новые и/или доисследовать существующие стандартные образцы (природные, техногенные и искусственные) и аттестовать их на валовые содержания всех БМ, на присутствие числа и составов и размеров хотя бы наиболее распространенных минеральных фаз БМ. Такие стандартные образцы необходимы для разработки способов учета влияния макросостава пробы и гранулометрии частиц БМ на интенсивность аналитических линий БМ, т.е. на точность результатов САЭС;

– научиться представлять огромный объем информации по элементному и фазовому составу, получаемый методом САЭС-микроминералогии, в формате интуитивно понятном пользователям – геологам и технологам, минералогам и аналитикам.

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-просьпки 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.

По результатам работ опубликованы:

1. **Шабанова Е.В.**, Васильева И.Е. Сцинтилляционная атомно-эмиссионная спектromетрия 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. СТП ИГХ-020-2019. Методика измерений массовых долей элементов в порошках органоминеральных проб методом атомно-эмиссионной спектromетрии 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. **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)

4. 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).

Основные результаты проведённого 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-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.

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.

Список использованных источников

1. Кузьмин М.И., Горячев Н.А., Эволюция Земли, процессы, определяющие ее геодинамику, магматизм, металлогению // Геосферные исследования. – 2017. – № 4. – С. 36—50.
2. Кузьмин М.И., Ярмолюк В.В., Котов А.А., Горячев Н.А. Магматизм и металлогения ранних этапов развития Земли как отражение ее геологической эволюции // Геология и геофизика. – 2018. – Т. 59. – № 12. – С.1924-1940.
3. Горячев Н.А. Месторождения золота в истории Земли // Геология рудных месторождений. – 2019. – №6. – С. 3-18.
4. 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.
5. Botelho N.F., Mauro M.A. Granite-ore deposit relationships in Central Brazil // Journal of South American Earth Sciences. – 1998. – Vol. 11. – No. 5. – P. 427-438.
6. Родионов С.М. Металлогения олова Востока Азии. Москва, Наука. 2006.
7. Ткачев А.В., Рундквист Д.В., Вишневская Н.А. Главные геоисторические особенности металлогении лития // Доклады Академии наук. 2019. – Т. 487. – № 1. – С. 60–64.
8. 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.
9. Зорин Ю.А., Мазукабзов А.М., Гладкочуб Д.П., Донская Т.В., Пресняков С.Л., Сергеев С.А. Силурийский возраст главных складчатых деформаций рифейских отложений Байкало-Патомской зоны // ДАН. – 2008. – Т. 423. – № 2. – С. 228–233.
10. 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.
11. 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. – V10 (2). – P. 1233–1267.
12. 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. – 2005. – №3. – С.17-25.
13. 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.

14. 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.

15. 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.

16. Иванов А. И. Золото Байкало-Патома (геология, оруденение, перспективы). - М.: ФГУП ЦНИГРИ, 2014. - 215 с.

17. Powerman, V., Shatsillo, A., and Chumakov, N., Interaction between the central Asian orogenic belt (CAOB) and the Siberian craton as recorded by detrital zircon suites from Transbaikalia // Precambrian Researches. – 2015. – V. 267. – N. 1. – P. 39–71.

18. Чумаков Н. М., Капитонов И. Н., Семихатов М. А., Леонов М.В., Рудько С.В. Вендский возраст верхней части Патомского комплекса средней Сибири: U-Pb ^{147}Sm - ^{235}U датировки обломочных цирконов никольской и жербинской свит // Стратиграфия. Геологическая корреляция. – 2011. – Т. 19. – № 2. – С. 115–119.

19. 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.

20. 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. – № 1. – С. 17–25.

21. 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.

22. Буряк В.А. Метаморфизм и рудообразование. – М.: Недра, 1982. - 256 с.

23. Schauble E.A. Role of nuclear volume in driving equilibrium stable isotope fractionation of mercury, thallium, and other very heavy elements // Geochim. Cosmochim. Acta. – 2007. – V. 71. – P. 2170–2189.

24. Stirling C.H., Anderson M.B., Potter E.K., Halliday A.N. Low temperature isotopic fractionation of uranium // *Earth Planet. Sci. Lett.* – 2007. – V. 264. – P. 208–225.
25. Чернышев И.В., Голубев В.Н., Чугаев А.В., Баранова А.Н. Вариации изотопного отношения $^{238}\text{U}/^{235}\text{U}$ в минералах гидротермальных урановых месторождений // *Геохимия.* – 2014. – № 12. – С. 1059–1078.
26. Weyer S., Anbar A. D., Gerdes A., Gordon G.W., Algeo T.J., Boyle E.A. Natural fractionation of $^{238}\text{U}/^{235}\text{U}$ // *Geochim. Et Cosmochim. Acta.* – 2008. – V. 72. – Iss. 2. – P. 345–359.
27. Kendall B., Brennecka G. A., Weyer S., Anbar A. D. Uranium isotope fractionation suggests oxidative uranium mobilization at 2.50 Ga Original // *Chem. Geol.* – 2013. – V. 362. – P. 105–114.
28. 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. Низковысотная 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.
29. 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.
30. Parshin A, Morozov A, Blinov A, Kosterev A and Budyak A 2018 Low-altitude geophysical magnetic prospecting based on multirotor UAV as a promising replacement for traditional ground survey // *Geo-Spatial Information Science.* – № 21. – P. – 67-74.
31. Cunningham M, Samson C, Wood A and Cook I 2018 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.* – № 175. – P. 3145-3158.
32. Malehmir A, Dynesius L, Paulusson K, Paulusson A, Johansson H, Bastani B, Wedmark M and Marsden P 2017 The potential of rotary-wing UAV-based magnetic surveys for mineral exploration: A case study from central Sweden // *The Leading Edge.* – № 36. – P. 552-557.
33. Parshin A, Tsirel V, Rzhetskaya 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).

34. Martin P, Payton O, Fardoulis J, Richards D and Scott T The use of unmanned aerial systems for the mapping of legacy uranium mine // *Journal of Environmental Radioactivity*. – 2015. – № 143. – P. 135-140.
35. 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.
36. Будяк А.Е., Скузоватов С.Ю., Тарасова Ю.И., Ванг (Kuo-Lung Wang) К.-Л., Горячев Н.А. Единая неопротерозой-раннепалеозойская эволюция рудоносных осадочных комплексов юга Сибирского Кратона // *Доклады академии наук*. – 2019. – Том 484. – № 3. – С. 80–84.
37. Takaku L and Tadono T 2017 Quality updates of AW3D global DSM generated from ALOS PRISM Proc. IGARSS2017 (Fort Worth: IEEE) P. 5666-5669.
38. 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.
39. 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.
40. Ефремов С.В. Раннепалеозойские адакиты Восточного Саяна. Геохимические особенности и источники вещества // *Геохимия*. – 2010. – № 11. – С. 1185-1201.
41. 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.
42. Hollings Pete Archean Nb-enriched basalts in the northern Superior Province // *Lithos*. – 2002. – V.64. – P.1-14.
43. Sajona F.G., Mauri R.C., Bellon H., Cotten J., Defant M. High field strength element enrichment of Pliocene-Pleistocene island arc basalts, Zambaanga Peninsula, Western Mindango (Philippines) // *J.Petrol*. – 1996. – V.37. – № 3. – P. 693-726.
44. Geochemical Earth Reference Model // <http://earthref.org/GERM>
45. 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.

46. Кузьмин М.И. Две генетические группы мезозойских внегеосинклинальных гранитоидов западной части Монголо-Охотского пояса // Геохимические критерии потенциальной рудоносности гранитоидов. Иркутск, 1971. С.163-166.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Список публикаций по тематике проекта

1. **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).
2. **Горячев Н.А.** Месторождения золота в истории Земли // Геология рудных месторождений, 2019, №6 с. 3-18.
3. **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).
4. **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 (in print).
5. **A. Parshin, A. Budyak, I. Chebokchinov, V. Sapunov, A. Bulnayeve 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.
6. **Makshakov A.S., Kravtsova R.G., Tatarinov V.V.** Lithochemical stream sediments of the Dukat gold-silver ore-forming system (North-East of Russia) // Minerals. – 2019. – V. 9. – №12. – 789. DOI: 10.3390/min9120789.
7. **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).
8. **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
9. **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 (Scopus)

10. 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.

11. **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. – С. 388 - 412

Коллективная монография

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.

Доклады на конференциях

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.

Интеллектуальная собственность

1. 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.

2. Программное обеспечение стенда для тестирования двигателей БПЛА (SibGIS Motor Stend) // А.В. Паршин, В.А. Морозов. Номер регистрации (свидетельства): 2019667014

Приняты к печати

1. **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 –принята к печати

2. Левашова Е.В., **Носков Д.А.**, Скублов С.Г. Особенности геохимии редких элементов в цирконах из раннепалеозойских гранитов на территории Анагаро-Витимского батолита // Геохимия, 2020, № 2.

3. Ефремов С.В., **Спиридонов А.М., Горячев Н.А., Будяк А.Е.** Использование мелкомасштабных геохимических съемок для расшифровки эволюции Карийской рудно-магматической системы (В.Забайкалье) // Геология рудных месторождений, направлена в редакцию, этап рецензирования.

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