

Федеральное агентство научных организаций

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
ИНСТИТУТ ГЕОХИМИИ ИМ. А.П. ВИНОГРАДОВА СИБИРСКОГО
ОТДЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

УДК 550.4:551.2

№ госрегистрации 01201351648

УТВЕРЖДАЮ

Директор ИГХ СО РАН

Член-корреспондент РАН

Шалкий В.С.

2016 г.



ОТЧЕТ

О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

ГЕОХИМИЯ И УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ БЛАГОРОДНОМЕТАЛЛЬНЫХ РУДНО-
МАГМАТИЧЕСКИХ СИСТЕМ В РАЗЛИЧНЫХ ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ
ОБСТАНОВКАХ АЗИИ, РАЗРАБОТКА КРИТЕРИЕВ ПРОГНОЗА И ПОИСКОВ
РУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

(заключительный)

Номер проекта в ИСГЗ ФАНО № 0350-2014-0009

Приоритетное направление VIII.72. 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 ФНИ СО РАН VIII.72.3. Геохимия процессов формирования и эволюции рудно-магматических систем в различных геодинамических обстановках Азии

Протокол Ученого совета ИГХ СО РАН
№ 7 от «21» декабря 2016 г.

Руководитель проекта
Д.Г.-М.Н.

20.12.2016

подпись, дата

А.М. Спиридонов

Иркутск 2016

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Научный руководитель темы, д-р
геолого-минералогических наук


20.12.16
подпись, дата

А.М. Спиридонов

Ответственные исполнители
темы:

д-р геолого-минералогических
наук


20.12.16
подпись, дата

А.М. Спиридонов
(раздел 1)

д-р геолого-минералогических
наук


20.12.16
подпись, дата

Р.Г. Кравцова (раздел 2)

д-р геолого-минералогических
наук


20.12.16
подпись, дата

Н.В. Вилор (раздел 3)

кандидат геолого-
минералогических наук


20.12.16
подпись, дата

А.Е. Будяк (раздел 4)

УДК 550.4:551.2

Реферат

Отчет включает 23 стр., 3 илл., 8 ист.

Ключевые слова: *геохимия, минералогия, структура минералов, флюидные включения, изотопное датирование, структура рудных полей, золоторудное месторождение, дорудные, прерудные, синрудные метасоматиты, динамокластиты, генезис месторождения, поисковые критерии и методы поисков.*

Целью исследования является изучение геохимических особенностей разнотипных рудно-магматических систем благородных металлов, формирующихся в различных геодинамических обстановках, построение их геохимических и генетических моделей и разработка комплекса геохимических методов прогноза и поисков месторождений.

Объекты исследований расположены на территориях Приколымья (Дорожное, Светлое, Наталкинское, Дегдекан, Омчак), Монголо-Охотского складчатого пояса (Карийский рудный узел), Байкальской горной области (Тонодское, Нечерское поднятие) и Кодаро-Удоканской структурно-формационной зоны.

Были получены важнейшие результаты:

- определены физико-химические условия образования пород и руд месторождений Карийского узла по данным исследования флюидных включений;

- на примере Au-Ag месторождения Дукат показано, что при формировании литохимических потоков рассеяния (ЛПР) в зонах криолитогенеза нельзя не учитывать роль химических факторов, в первую очередь хемосорбции;

- установлено, что для месторождений эпитермальной Au-Ag формации руд Охотско-Чукотского вулканогенного пояса (ОЧВП) характерно золото с высокой степенью дисперсии.

- изучен комплекс геологических и геохимических процессов, проявившихся в динамике рудообразования месторождения Погромное;

- установлено, что большинство выявленных месторождений Au и U специализацией в пределах Кодаро-Удоканской зоны генетически связаны с различными источниками: золотая минерализация вероятнее всего имеет ювенильную, тогда как источником более поздней урановой минерализации, по всей вероятности являются терригенные отложения;

- в результате геолого-геофизического изучения территории Северного Забайкалья определен наиболее рациональный комплекс работ, направленных на поиски скрытого оруденения, включающий биогеохимическое или гидрогеохимическое опробование с попутной магнитометрией в наиболее перспективных участках.

Содержание

Введение	5
Раздел 1. Изучение физико-химических параметров флюидных и расплавных включений формирования золото-кварцевых и золото-сульфидно-кварцевых руд месторождений Амурская дайка, Новинка, Погромное (Восточное Забайкалье). Проведение изотопно-геохронологических исследований рудопродуцирующих гранитоидов Кара-Чачинского массива (Карийский рудный узел)	6
Раздел 2. Изучение форм нахождения Au и Ag в рудах, эндогенных и экзогенных геохимических полях Au-Ag рудно-магматических систем (РМС) разной формационной принадлежности Северного Приохотья	10
Раздел 3. Построение многофакторных (геохимических, физико-химических, генетических) моделей РМС. Изучение сульфоарсенидной рудоносной гидротермальной системы при формировании крупных золоторудных месторождений в зонах смятия (Апрелковско-Пешковский рудный узел, Восточное Забайкалье)	13
Раздел 4. Разработка комплекса геофизических и геохимических методов поисков не вскрытых эрозией рудных тел и месторождений в черносланцевых формациях Бодайбинского района и Кодаро-Удоканской структурно-формационной зоны	16
Заключение	19
Основные результаты проведенного исследования	19
Список использованных источников	20
Приложение. Перечень статей, опубликованных по тематике проекта в соответствии с государственным заданием.	22

Введение

Огромный фактический материал, накопленный опыт, оценка роли геохимии в изучении процессов рудоконцентрирования, расширение спектра аналитических, экспериментальных и расчетных данных, базирующихся на геохимической основе, широкий спектр применяемых геохимических методов в проведении поисковых и разведочных работ, безусловно, способствуют решению обозначенных проблем. И в то же время увеличивают ряд вопросов перед исследователями в области теории и практики геохимии эндогенного рудообразования. Решение этих задач должно базироваться на комплексных исследованиях в области изучения процессов рудообразования. Наиболее актуальными остаются вопросы источников рудного вещества, рудной нагрузки и происхождения металлоносных флюидов. Таким образом, необходимость фундаментальных исследований, направленных на решение широкого круга задач в области геохимии эндогенного рудообразования и прикладное значение таких разработок являются достаточно очевидными.

Целью исследований в рамках проекта является изучение геохимических особенностей разнотипных рудно-магматических систем благородных металлов, формирующихся в различных геодинамических обстановках, построение их геохимических и генетических моделей и разработка комплекса геохимических методов прогноза и поисков месторождений.

Настоящий отчет является заключительным по теме «Геохимия и условия формирования благороднометалльных рудно-магматических систем в различных геодинамических обстановках Азии, разработка критериев прогноза и поисков рудных месторождений», по которой были представлены отчеты по этапам 2013, 2014, 2015 годов.

Раздел 1. Изучение физико-химических параметров флюидных и расплавных включений формирования золото-кварцевых и золото-сульфидно-кварцевых руд месторождений Амурская дайка, Новинка, погромное (Восточное Забайкалье). Проведение изотопно-геохронологических исследований рудопродуцирующих гранитоидов Кара-Чачинского массива (Карийский рудный узел).

В 2016 году проведены исследования на месторождениях Амурская дайка и Новинка Карийского рудного узла и на месторождении Погромное Апрельковской рудно-магматической системы (РМС).

Ключевым магматическим объектом, с которым связывается образование золотого оруденения Карийского рудного узла, является Кара-Чачинский массив гигантопорфировых гранитоидов амуджикано-сретенского комплекса (J_3-K_1) с системой сопряженных с ним разнообразных субвулканических и жильных образований, включая щелочные жильные породы грорудиты. Дайковые тела грорудитов играют особую роль в истории геологического развития золотоносной Карийской рудно-магматической системы – с ними связывается золотая минерализация.

По химическому составу грорудиты характеризуются высоким содержанием кремнезема (76 мас.%) и низким глинозема (10 мас.%), преобладанием К над Na. В этих породах отмечаются аномально низкие содержания F, Li, Rb, Ba, Sr при повышенных концентрациях В и большей части рудообразующих элементов, в частности Au и W.

С целью выяснения физико-химических условий образования грорудитов, их генезиса и роли в гидротермальном золоторудном процессе в 2016 году изучены флюидные включения (ФВ) в кварце этих пород. В работе использована наиболее представительная коллекция грорудитов месторождения Новинка, где рудная минерализация представлена кварц-актинолит-магнетитовым составом, как наиболее перспективная в отношении промышленных скоплений золота. Грорудиты здесь находятся в тесной ассоциации с рудными жилами и минерализованными зонами.

По совокупным данным микрокриотермометрического анализа и рамановского сканирования в первичных ФВ присутствует преимущественно N_2 , а в более поздних первично-вторичных ФВ основным компонентом является CO_2 и подчиненными N_2 и CH_4 .

По данным ISP-MS-LA основными компонентами в составе флюида являются Na и K, прослеживаются также значимые концентрации As, Mo, Sb, Cs, W, Hg, то есть газовая магматическая фракция в грорудитах концентрирует элементы-спутники золотого

оруденения. Такая закономерность указывает на то, что щелочные жильные породы – грорудиты, получившие широкое развитие на площади исследований, имеют прямую генетическую связь с процессом золотого рудообразования.

На месторождении Амурская дайка изучены флюидные включения в кварце двух типов: раннем, связанным с кварц-турмалин-сульфидной стадией минерализации, и позднем, связанным с золото-сульфидно-кварцевой стадией минерализации. Выделены первичные (тип 1), первично-вторичные (тип 2) и вторичные (тип 3) флюидные включения. К первичным отнесены ФВ, равномерно распределенные в объеме минерала-хозяина или приуроченные к зонам роста, а к вторичным – приуроченные к секущим минерал-хозяина трещинам. Первично-вторичные ФВ находятся в трещинах внутри кристаллов и зерен, не достигающим внешних границ, а по фазовому наполнению они аналогичны первичным включениям.

По данным изучения индивидуальных флюидных включений температуры гомогенизации первичных ФВ типа 1 в раннем кварце составляют 423-425° С. Концентрация солей в растворе флюидных включений этого типа 3.0-4.5 мас. %-экв. NaCl. Концентрация углекислоты в рудообразующем флюиде достигала 4.6-4.7 моль/кг р-ра, а метана 0.7-0.8 моль/кг р-ра. Плотность углекислотно-водного флюида 0.91-0.92 г/см³. Судя по величине температуры эвтектики (от –30 до –34 °С), в рудообразующих флюидах среди солей преобладали хлориды натрия и магния.

Гомогенизация углекислоты во флюидных включениях типа 2 происходит в жидкую фазу при температурах от +13.3 до +30.0 °С. Плавление углекислоты происходит при –57.0 °С, т. е. немного ниже температуры плавления чистой углекислоты (–56.6 °С), что может быть связано с небольшой (менее 3 мол. %) примесью метана или азота. Плотность газовой фазы достаточно велика и изменяется от 0.60 до 0.84 г/см³.

Давление флюида, оцененное для ассоциаций флюидных включений типов 1 и 2 в раннем кварце месторождения Амурская дайка, захватывавшихся в периоды гетерогенизации флюида, изменяется от 1450 до 2580 бар при изменении температур от 423 до 425 °С.

Температура гомогенизации флюидных включений типа 3 в позднем кварце изменяется от 204 до 375 °С. Концентрация солей в растворе ФВ этого типа 4.2 мас. %-экв. NaCl. Судя по величине температуры эвтектики (от –24 до –37 °С), во флюидах среди

солей преобладали хлориды Na, Mg и Fe. Давление, определенное для случаев кипения флюида, составило 180-210 бар для температур 360-375°C.

Две генерации кварца, выявленные на месторождении Амурская дайка, свидетельствуют о разном флюидном режиме их формирования и должны были формироваться на разных глубинах. Возможно, они отличаются возрастом. Поздний кварц по параметрам флюида соответствует месторождениям эпитепмального типа.

На месторождении Погромное методами микрокриотермометрии, рамановской спектроскопии, масс-спектрометрии индукционно-связанной плазмы с лазерным испарением изучены флюидные включения в углеродсодержащем микросланце серицит-кварцевого состава с кварцевым прожилком. в кварцевой жиле с лимонитом по сульфидам и с реликтами углеродсодержащих микросланцев кварц-серицитового состава, в кварцевом альбитофире с вкрапленностью сульфидов и прожилками кварцевого, карбонат-кварцевого с сульфидами состава. Выявлено два вида двухфазовых включений: одни гомогенизируются в жидкость при $T_{\text{гом}}$ 235-250⁰ и 285-296⁰С, другие в газ при $T_{\text{гом}}$ 235-240⁰ и 292-295⁰С. Давление флюида изменяется в интервале от 1,2 до 2,6 кбар, а его плотность от 0,63 до 0,8 г/см³. Температуры и характер гомогенизации свидетельствуют о захвате включений из кипящего раствора, т.е. полученные температуры гомогенизации являются истинными температурами минералообразования, а давления, рассчитанные по ним, соответствуют давлению флюидов в период консервации включения. Газовая составляющая во флюиде имеет различную плотность и содержит как основной компонент СО₂, в подчиненном количестве N₂ и СН₄, не исключается присутствие Н₂S на уровне чувствительности анализа (КР-спектроскопии). Основными компонентами в составе флюида являются Na и К, также присутствуют Mg, Al и Са; прослеживаются следовые концентрации Zn, В, Sb, Rb, Ва, Ni, Mn, Fe, Pb, Те, As и Au.

В отчетный период изучены также Rb-Sr геохронология гранитоидов Кара-Чачинского массива и изотопный состав свинца в пиритах одного из наиболее перспективных золоторудных месторождений Карийской РМС Амурская дайка.

Возраст Кара-Чачинского массива по полученным Rb-Sr изотопным данным составляет 132±12МА (СКВО=0,061, I(0)Sr=0,70839±19), что соответствует раннему мелу и рифтогенному этапу развития забайкальской части Монголо-Охотского складчатого пояса [Зорин и др., 1998].

На диаграмме в координатах $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} - ^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ фигуративные точки изотопного состава свинца пиритов месторождения Амурская дайка лежат между трендами изотопной эволюции свинца в истощенной мантии (DM) и средним составом континентальной коры, группируясь в области изотопной эволюции свинца островодужных образований и пород трахибазальтовой серии Восточного Забайкалья. Таким образом, в качестве «корового» источника свинца руд Карийской РМС могут выступать породы аккреционного клина Монголо-Охотского пояса, служившие важной составной частью протолита для выплавления гранитоидов амуджикано-сретенского комплекса. В качестве «мантийного» источника Pb могут быть базальтоиды трахибазальтовой серии Восточного Забайкалья (J₃-K₁), получившие развитие в пределах Карийской РМС.

В результате проведенных исследований по проекту в 2013-2015 гг. получены следующие основные выводы:

– золотое оруденение месторождения Погромное представлено двумя морфологическими типами руд: штокверковым кварц-карбонат-арсенопирит-пиритовым в метасоматически измененных эффузивах (залежь-1) и прожилково- жильным кварцевым (с вкраплениями сульфидов) в измененных углеродсодержащих сланцах (залежь-10).

– золотоносными на месторождении также являются метасоматиты предрудного и синрудного этапов по вулканитам с сульфидной минерализацией и содержанием золота от 0,2 до 11,9 г/т и по измененным углеродистым сланцам; степень золотоносности находится в полном соответствии с проявлением окварцевания, насыщенностью кварц-сульфидными и сульфидными микропрожилками, тонкой вкрапленностью сульфидов

– возраст начала формирования штокверковой системы рудовмещающих трещин и метасоматитов, возникших на предрудном этапе, оценивается $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ изотопным методом в $139,5 \pm 1,8$ млн лет; полученные результаты свидетельствуют о том, что месторождение Погромное сформировано в раннемеловое время на рифтогенном этапе развития региона и локализовано в динамокластической толще в зоне Монголо-Охотской сутуры; во вмещающих углеродисто-терригенных породах месторождения установлено присутствие сульфидов с мантийным изотопным составом серы.

– руды Карийской РМС сформировались в два этапа: ранний представлен кварц-актинолит-магнетитовыми рудами (месторождение Новинка) и кварц-турмалин-сульфидными рудами (месторождение Дмитриевское), поздний – золотоносными сульфидно-кварцевыми и кварцевыми с карбонатными прожилками (месторождение Амурская дайка).

Раздел 2. Изучение форм нахождения Au и Ag в рудах, эндогенных и экзогенных геохимических полях Au-Ag рудно-магматических систем (РМС) разной формационной принадлежности Северного Приохотья.

В 2016 г. с целью изучения многоуровневого геохимического поля рудных объектов и разработки на этой основе геохимических критериев их поисков и оценки обобщены данные по составу и строению эндогенных (первичные ореолы) и экзогенных (вторичные ореолы, потоки рассеяния) аномальных геохимических полей (АГХП) Au-Ag рудообразующих систем. На примере Au-Ag месторождения Дукат были изучены особенности распределения и формы нахождения (ФН) Au, Ag и сопутствующих компонентов (Hg, Sb, As, Cu, Pb, Zn и др.) в сопряженной системе руда + первичный ореол → литохимический поток рассеяния ЛПП). Установлено, что ФН рудных элементов в аллювиальных отложениях водотоков, дренирующих Au-Ag зоны месторождения, теснейшим образом связаны с особенностями состава руд. Показано, что при формировании ЛПП в зонах криолитогенеза, где процессы физического выветривания считаются главными, нельзя не учитывать роль химических факторов, в первую очередь хемосорбции. В практическом отношении ФН элементов-индикаторов Au-Ag оруденения во вторичных средах, так же как в первичных, служат эффективным критерием оценки геохимических аномалий и могут успешно применяться на всех стадиях изучения рудоносных площадей.

Получены новые данные по типоморфизму самородных Au и Ag. Установлено, что для месторождений эпитермальной Au-Ag формации руд Охотско-Чукотского вулканогенного пояса (ОЧВП) характерно золото с высокой степенью дисперсии: кюстелит – электрум – низкопробное самородное золото. Преобладают зональные структуры, осложненные разными неоднородностями, что обычно при полихронном характере развития оруденения. Золотины в основном мелкие (< 70 мкм), значительная часть представлена тонкодисперсными частицами (10 мкм и менее). Встречаются золотины, в основном, в ассоциации с самородным серебром, акантитом, пруститом, пираргиритом, полибазитом, науманнитом и пиритом. Из примесей в значительном количестве установлены Hg (0.38 мас.%), Sb(0.24 мас.%), Te (0.42 мас.%), Cu (0.20 мас.%), Bi (0.65 мас.%).

Найденные в рудах месторождения Роговик амальгамы Ag (**рис. 1**) нетипичны и для Au-Ag минерализации Омсукчанского прогиба, и для Au-Ag руд ОЧВП в целом.

Появление высокортутистого самородного Ag с одной стороны можно объяснить характером развития рифтогенного Омсукчанского прогиба, уникального по своей металлогенической специализации на серебро, к северному замыканию которого это месторождение приурочено. С другой, предположить, что проявление ртутной минерализации связано с наложением продуктов более молодого Догдо-Эрикитского ртутоносного пояса, сформировавшегося в тылу мелового ОЧВП, на Омсукчанский сереброносный прогиб. Полученные данные позволяют по-новому взглянуть на условия формирования благороднометалльных рудообразующих систем в структурах активной континентальной окраины Северо-Востока России.

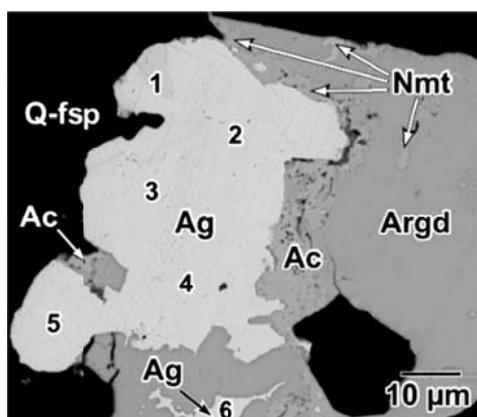


Рис. 1. Месторождение Роговик. Ксеноморфный агрегат, состоящий из самородного серебра (Ag), аргиродита (Argd), науманнита (Nmt) и акантита (Ac) в кварц-полевошпатовом (адуляр, ортоклаз) агрегате (Q-fsp). Изображение дано в обратно рассеянных электронах.

Среди результатов 2013-2015 гг. особое внимание следует уделить следующим:

- установлено, что рудная минерализация месторождения Роговик сформировалась в два этапа. С ранним вулканогенным этапом связано формирование собственно Au-Ag руд. С более поздним этапом, обусловленным процессами гранитоидного магматизма, связано формирование «преимущественно серебряных» руд.

- в рудах месторождения Роговик установлено порядка 40 новых минералов. Для практических целей является важным факт распространенности в рудах физически сорбированной (ФС) формы Hg. При проведении съемок по вторичным ореолам на закрытых территориях обнаружение повышенных содержаний ФС Hg – это единственный метод выявления аномалий, связанных с рудной минерализацией.

- в пиритах всех изученных месторождений методом СВАДМ независимо от их генетического типа, времени и условий формирования, установлено существование двух основных форм нахождения равномерно распределенного Au – структурной и поверхностно-связанной, причем последняя обычно преобладает. Химический состав поверхности пиритов позволяет установить явные отличия процессов рудообразования на месторождениях разных генетических типов.

Тот факт, что арсенопириты являются концентраторами Au, Pt и Pd, подтверждается данными атомно-абсорбционного анализа этих элементов в монофракциях арсенопирита, отобранных из руд месторождения Наталкинское. Максимальные концентрации Au (до 1383 г/т) отмечаются в мелкой фракции (< 0.25 мм), подтверждая данные о преобладании в ассоциации с арсенопиритом тонкодисперсного и мелкого золота (< 10 мкм и 10-70 мкм, соответственно), которым эти фракции, как правило, резко обогащены. Относительно равномерное распределение концентраций Pt (23.0 г/т - 62.4 г/т) и Pd (2.3 г/т - 9.5 г/т) в разных фракциях арсенопирита (< 1 мм, 0.25-0.5 мм и < 0.25 мм), возможно, объясняется неминеральной формой нахождения Pt и Pd в арсенопирите. Это важный момент, который необходимо учитывать и в практическом отношении, например, при обогащении руд. Реальным становится извлечение упорного Au без разрушения структуры минерала.

Необходимо особо подчеркнуть, что две формы нахождения равномерно распределенных Au, Pt и Pd в арсенопиритах – структурная и поверхностно-связанная установлены впервые.

Для месторождения Роговик впервые по геохимическим данным проведена оценка уровня эрозионного среза Au-Ag рудных зон. Установлено, что наименее эродированной является центральная часть объекта, где широкое распространение и наибольшую контрастность имеют АГХП Au, Ag, Hg, Sb и As, тесно связанные с рудоносными горизонтами месторождения. Показано, что с глубиной контрастность этих полей постепенно снижается. Появляются низкоконтрастные АГХП Cu, Pb и Zn, характерные для подрудных интервалов и флангов Au-Ag зон месторождения. Наиболее эродирована северная часть площади, где контрастность геохимических полей Ag, Hg, Sb и As резко снижается, а с глубиной широкое развитие получают АГХП Cu, Pb и Zn. Относительно контрастные поля аномальных концентраций Au здесь проявлены крайне локально и лишь вблизи поверхности. Сделан вывод, что наиболее перспективной в плане проведения дальнейших поисково-оценочных работ и выявления рудной минерализации, вероятнее всего, является еще не разведанная южная часть площади месторождения Роговик.

Раздел 3. Построение многофакторных (геохимических, физико-химических, генетических) моделей РМС. Изучение сульфоарсенидной рудоносной гидротермальной системы при формировании крупных золоторудных месторождений в зонах смятия (Апрелковско-Пешковский рудный узел, Восточное Забайкалье)

Изучен комплекс геологических и геохимических процессов, проявившихся в динамике рудообразования на месторождении Погромное с участием сульфоарсенидной гидротермальной системы при воздействии многофакторной геологической эволюции во вмещающей зоне смятия. Проведен анализ зональности и рудоносности метасоматитов с учетом объемного эффекта их образования, рассчитаны минеральные геотермометры и участие золотоносных сульфидно-мышьяковистых гидротермальных растворов при образовании промышленных руд.

Место сульфидно-мышьяковых рудных систем весьма заметно при формировании месторождений золота черносланцевой формации. На крупнейших рудных объектах данной формации концентраторами золота являются мелко- и тонкозернистые генерации арсенопирита, пирита и мышьяковистого пирита при участии поздней продуктивной полиметаллической и золото-сурьмяной минерализации. Для них характерна прямая корреляция содержаний золота и мышьяка в рудах, а также высокая золотоносность кристаллов и агрегатов тонкоигольчатого арсенопирита. В рудных арсенопиритах золото представлено металлической и структурной формами. В мышьяковистых пиритах линия массовых отношений $Au/As \sim 0.02$ разделяет области распределения металла в виде наночастиц Au^0 при больших отношениях и позиций Au^{+1} в структуре матрицы минерала - концентратора при меньших отношениях. Целью исследований является установление состава сульфоарсенидных комплексов золота при компьютерном анализе результатов экспериментального изучения растворимости Au в присутствии аурипигмента.

В проведенных термодинамических расчетах по моделированию данных экспериментов с привлечением программного комплекса (ПК) СЕЛЕКТОР при решении обратных задач физико-химического моделирования (ФХМ) использованы как базы исходных данных ПК, так и уточненные термодинамические характеристики комплексов As, Fe и сосуществующих с ними твердых фаз – сульфидов, оксидов этих элементов

Состав возможного сульфоарсенидного комплекса определялся по структурному подобию с гетерополиядерными золото-сурьмянистыми комплексами в гидротермальных растворах, содержащих Sb, наряду с гидросульфидными комплексами золота. В изучаемой

системе рассчитаны содержания сульфоарсенидных комплексов Au, сосуществующих с гидросульфидными частицами и обеспечивающих его валовую растворимость.

В сернисто-мышьяковистых металлоносных гидротермальных растворах возможно образование сульфоарсенидных комплексов золота. Сульфоарсенидные комплексы золота количественно преобладают в кислотных и близнеutrальных растворах в присутствии As. С повышением щелочности их концентрации ниже, чем у сосуществующих гидросульфидных комплексов золота. В кислотных сернисто-мышьяковистых гидротермальных растворах устойчивость сульфоарсенидных комплексов зависит от концентрации мышьяка, с увеличением которой валовая растворимость золота уменьшается. Соотношение сульфоарсенидных и гидросульфидных комплексов золота также зависит от концентрации мышьяка в растворе. В рудообразующих гидротермальных системах с As при участии сульфоарсенидов золота отлагаются металлоносные генерации арсенопирита (АПИ) и мышьяковистого пирита.

При увеличении содержания в АПИ мышьяк занимает в структуре как катионные, так и анионные позиции. Из примесей с концентрациями более 0.001 вес. % отмечаются главным образом нерегулярные повышения Co до 0.16 вес. % в IV группе. Эта группа относится к АПИ II генерации. С ее появлением связано образование краевых диффузионных зон-кайм на метакристаллах I генерации. Зональные кристаллы редки. В неконтрастных зонах их внутренних частей содержится 44.6÷46.22, а во внешних краевых - до 49.75÷50.29 вес.% As. Краевые высокомышьяковистые каймы с шириной до 27 мкм иногда совершенно не выражены на некоторых кристаллических гранях.

Метасоматические преобразования от кварц-альбит-мусковитового парагенезиса эйситов с рассеянными кристаллами ранних сульфидов до кварц-карбонатно-слюдистых фракций с тонкозернистой сульфидной вкрапленностью в штокверках по результатам расчета минеральных геотермометров и экспериментальным определениям свойств газожидких включений (ГЖВ) в рудных кварцах [Волков и др., 2011] соответствуют интервалу от 570 до 280 °C:

В топохимических реакциях на поверхности кристаллов образование зональности лимитируется диффузией As от поверхности раздела фаз в кристаллы ПИ или АПИ. Ширина возникающей диффузной каймы зависит от коэффициента диффузии мышьяка. Рассчитанный коэффициент диффузии $D_{As\text{пирит}}$ применяется на примере определения продолжительности формирования дислокационной каймы с локальным образованием As-

Пи в пиритовых метакристаллах на месторождении El Callao, Venezuela [Velasques et al., 2014]. Содержание As на поверхности дислокации $C_0 = 2.4$ вес. % при ширине диффузной зоны, $h = 32.13$ мкм. Появление высокомышьяковистых кайм на АПИ связывается в [Velasques et al., 2014] с изменением температуры и состава минералообразующего раствора.

При температуре оруденения 200-250 °С интервал образования мышьяковистых диффузионных зон-кайм в монокристаллах рудных сульфидов охватывает десятки тысяч лет, соответственно масштабу геологического времени. Арсенопирит и пирит, содержащие золото, образуются при содержаниях серы и мышьяка в гидротермальном растворе более 0.01 и 0.005 m соответственно. Перенос золота, значимый для рудообразования, возможен при концентрации $S \geq 0.001$ и $As \geq 0.0005$ m в составе комплексных частиц – тιοарсенитов $AuAsS_2^0$ и $H_2AuAsS_3^0$, концентрация которых уменьшается при температуре менее 250 °С. Ниже 150 °С с ним сосуществует гидросульфид $AuHS^0$.

Раздел 4. Разработка комплекса геофизических и геохимических методов поисков не вскрытых эрозией рудных тел и месторождений в черносланцевых формациях Бодайбинского района и Кодаро-Удоканской структурно-формационной зоны (СФЗ).

В 2016 г. изучалась зона Хадаткандского разлома, Верхнесюльбанского рудного узла Кодаро-Удоканской зоны и локализованное в его пределах золото-урановое месторождение Хадатканда.

В результате проведенной работы, сделано предположение о влиянии вмещающих отложений кодарской и чинейской серий, имеющих лито-халькофильную специализацию, на формирование урановой минерализации непосредственно изучаемого месторождения.

Установлена разная природа золотого и уранового оруденения в пределах рассматриваемой территории. Золотое оруденение отчетливо коррелирует с зонами окварцевания, серицитизации и сульфидизации (березитовая ассоциация), тогда как урановая минерализация увязывается с наложенной пропилитизацией пород. Установлено, что, по крайней мере, часть золота отлагалась на ранней стадии рудного процесса и имела ювенильный источник, о чем свидетельствует ассоциация Au с кобальт-никелистым пирротинном, который замещается более поздним пиритом, и присутствием более высокотемпературных алтаита и шеелита (**рис. 2а**). Обозначенная ассоциация, в свою очередь, корродируется агрегатами оксидов урана (уранинит, коффенит, настуран) (**рис. 2б**).

Соответственно, радиоактивные элементы (U, Th) связаны с более поздним геодинамическим событием, (возможно этапом внедрения позднепалеозойского ингамакитского интрузивного комплекса, широко проявленным в пределах исследуемого рудного поля). Источником радиоактивных элементов вероятнее всего служили нижележащие отложения кодарской и низов чинейской серий, имеющих лито-халькофильную специализацию.

Выявленные геохимические и минералогические особенности нашли подтверждение и при исследовании изотопных характеристик серы. Так, для метасоматически изменённых пород с повышенными содержаниями Au значения $\delta^{34}\text{S}$ составили +2 – +4‰ CDT, а в пробах с рудными содержаниями U (+6 – +8‰ CDT). Такие значения (сдвинутые к мантийным меткам) свидетельствуют о том, что золоторудная ассоциация в пределах месторождения образована при участии флюидов, генерированных в глубинных очагах. Повышенные значения $\delta^{34}\text{S}$ в образцах с рудными содержаниями торий-урановой составляющей могут являться свидетельством заимствования тяжёлого изотопа серы из вмещающих осадочных пород кодарской серии при фильтрации сквозь них рудоносных растворов.

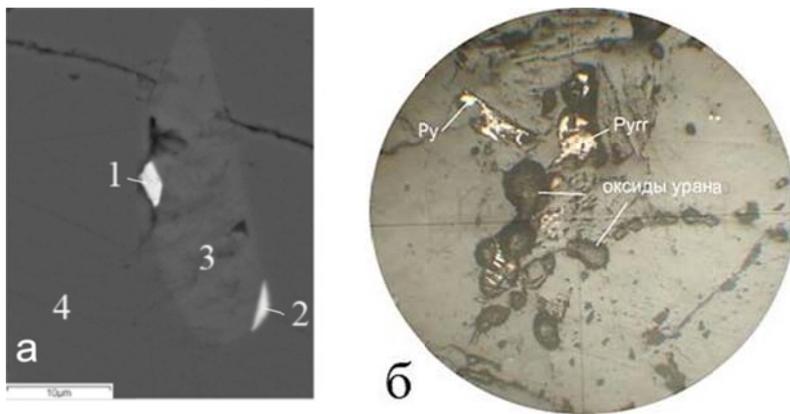


Рис. 2. а – морфология выделений самородного золота (1) и алтаита (2) в зерне кобальт-никелистого пирротина (3) в пирите (4). б – минералы урана в виде вкраплено-прожилковидных выделений в нерудных минералах в ассоциации с пиритом и пирротинном, замещающая их. Микроскоп. Николи П. Поля зрения рисунков: а – 0,2 мм; б – 0,54 мм.

Отмечая широкое распространение пород данной серии на территории Забайкалья, можно предположить поисковую перспективность на обнаружение рудных месторождений аналогичного типа.

В предыдущие годы проведения исследований в рамках проекта были выполнены рекогносцировочные геофизические исследования методами пешеходной магниторазведки и радиометрии по сети 30×80 м в районе месторождения Хадатканда и по сети 40×100 м далее на восток по Хадаткандскому разлому.

Проведенная пешеходная гамма-съемка не дала существенных результатов. Зоны структурно-тектонических несогласий выявленного типа, вмещающие золото-уран-пирит-пирротинную минерализацию, в обычных условиях могли бы быть обнаружены методами электромагнитных профилирований, однако проведение электроразведки с гальваническим заземлением в рассматриваемом районе затруднено условиями рельефа. Геофизическое изучение территории методом магниторазведки показало более адекватный материал. Рудная зона месторождения характеризуется наличием положительных аномалий магнитного поля значительной амплитуды. Пересчет поля в нижнее подпространство позволяет определить аномалеобразующий объект как практически вертикальный цилиндр (рудоподводящий канал), перекрытый моренными отложениями.

Таким образом, учитывая установленную генетическую связь золота с сульфидной минерализацией, предлагается считать магниторазведку в пешеходном варианте наиболее подходящим для поиска золоторудных объектов геофизическим методом. Поскольку в пределах изучаемой территории Au и радиоактивные (U, Th) элементы, как сказано выше, имеют различный источник, тем не менее локализованы в пределах единых структурных несогласий, магниторазведка представляется перспективным методом поисков также и радиоактивных объектов.

Кроме того положительные результаты были получены при изучении территории биогеохимическими (бриолитохимия) и гидрогеохимическими методами опробования.

Одним из важнейших результатов работ 2013-2015 гг. является изучение геологической истории Байкальской горной области (БГО) и приуроченных к ней рудных месторождений, которую следует рассматривать с позиций эволюции южной окраины Сибирского кратона, начиная с архей-палеопротерозойских (>2000 млн лет) отложений до позднего неопротерозоя–раннего палеозоя. Большинство выявленных месторождений с Pt, Pd, Au, U и полиметаллической нагрузкой в пределах БГО связаны с двумя продуктивными горизонтами: кевактинским (палеопротерозой) [Будяк и др., 2015] и дальнетайгинским (неопротерозой) [Немеров и др., 2001; 2010].

На основе геохимических данных установлено, что отложения Кодаро-Удоканской СФЗ и кевактинской серии накапливались в условиях пассивной окраины в интервале 2.2-2.4 млрд лет. Последующие коллизионные события в результате аккреции Сибири, индикатором которых является выплавка чуйско-кодарских гранитов (1.9 млрд лет) [Ларин и др., 2006], повлияли на перераспределение и концентрирование Au, PGE и U в нижнепротерозойских отложениях южного обрамления кратона.

В позднем неопротерозое (до 635 млн лет) накапливались отложения дальнетайгинской серии в условиях задугового бассейна. Важно отметить, что более 90% золоторудных и полиметаллических месторождений района, среди которых Сухой Лог и Холоднинское, связаны с хомолхинской «черносланцевой» толщей из более чем 8 «черносланцевых» уровней, имеющих в разрезе неопротерозоя БГО. Геохимическая специализация этих отложений имеет ярко выраженную сидеро-халькофильную специализацию осадков, которая формировалась под влиянием эксгальляционной деятельности зоны спрединга задугового бассейна [Немеров и др., 2010]. Нарушение корреляции эксгальляционного и железомарганцевого модулей во время накопления терригенно-карбонатных отложений валухитнской свиты говорит о значительной удаленности Приленского бассейна от осевой части зоны спрединга (олокитская структура) и значительном разбавлении коровым терригенным материалом, сносимым с кратона. Однако сопоставимые отложения хомолхинской свиты имеют в этой точке показатель, значительно превышающий 600 млн лет [Немеров и др., 2010], что указывает на дополнительный флюид ювенильного характера в формировании кевактинского и дальнетайгинского рудных горизонтов.

Заключение

Все исследования проведены на высоком научном уровне с привлечением современных методик и имеют важное значение для выявления геохимических особенностей разнотипных рудно-магматических систем благородных металлов, формирующихся в различных геодинамических обстановках, построения их генетических моделей и разработки комплекса геохимических методов прогноза и поисков месторождений.

Основные результаты проведенного исследования

1. Золотое оруденение месторождения Погромное представлено двумя морфологическими типами руд: штокверковым кварц-карбонат-арсенопирит-пиритовым метасоматически изменённых эффузивов и прожилково-жильным кварцевым (с вкраплениями сульфидов) в изменённых углеродсодержащих сланцах. Возраст начала формирования штокверковой системы рудовмещающих трещин и метасоматитов, возникших в предрудном этапе, оценивается ^{40}Ar - ^{39}Ar изотопным методом в 139.5 ± 1.8 млн лет. По генезису месторождение Погромное относится к объектам, сформированным в зонах смятия с участием мантийных золотоносных флюидов, источниками которых, как считают авторы, являются рудопродуцирующие гранитоиды амуджикано-сретенского интрузивного комплекса (J_3 - K_1).

2. Изучен комплекс геологических и геохимических процессов, проявившихся в динамике рудообразования на месторождении Погромное с участием сульфоарсенидной гидротермальной системы при воздействии многофакторной геологической эволюции во вмещающей зоне смятия. Проведен анализ зональности и рудоносности метасоматитов с учетом объемного эффекта их образования, рассчитаны минеральные геотермометры и участие золотоносных сульфидно-мышьяковистых гидротермальных растворов при образовании промышленных в руд.

3. Установлено, что оруденение Карийского месторождения сформировалось в два этапа, разделенных внедрением даек грорудитов и гибридных порфиров. Руды раннего этапа тесно связаны с гранитоидами Кара-Чачинского массива, имеющими корово-мантийные метки, а второго ассоциируют с дайками, также имеющими мантийные метки.

4. Комплексные исследования ФВ позволяют судить о физико-химических условиях формирования рудопродуцирующих магматических пород и рудной минерализации на рифтогенном этапе развития Карийской рудно-магматической системы.

5. Получены новые данные по геохимическому составу руд эндогенных (первичные ореолы) и экзогенных (литохимические потоки рассеяния) аномальных геохимических полей эпитермальных золото-серебряных (Au-Ag) месторождений Северного Приохотья. Выявлены их типоморфные особенности, состав и закономерности распределения в пространстве, установлены критерии поисков и оценки (Au-Ag) минерализации. Впервые по геохимическим данным проведена оценка уровня эрозионного среза Au-Ag рудных зон на эпитермальном месторождении Роговик (Северное Приохотье).

6. В арсенопиритах золоторудного месторождения Наталкинское впервые выявлено существование двух основных неминеральных ФН Au, Pt, Pd – структурной и поверхностно-связанной. Установлено, что золотоносные арсенопириты и пириты месторождений Наталкинское, Омчак и Дегдекан являются основными минералами-концентраторами Pt, Pd, Ru.

7. Обобщены результаты изучения ФН Au, Ag и сопутствующих компонентов в рудах и минералах вулканогенных Au-Ag месторождений (ОЧВП). Найденные в рудах Au-Ag месторождения Роговик амальгамы серебра являются нетипичными для Au-Ag минерализации Омсукчанского прогиба, и для Au-Ag руд ОЧВП в целом. Полученные данные позволяют по-новому взглянуть на условия формирования благороднометалльных рудообразующих систем в структурах активной континентальной окраины Северо-Востока России.

8. Установлено, что большинство месторождений с Pt, Pd, Au, U и полиметаллической специализацией в пределах Байкальской горной области связано с двумя продуктивными горизонтами: кевактинским (палеопротерозой) и дальнетайгинским (неопротерозой).

9. Сопоставляя результаты проведенных исследований территории Кодаро-Удоканской зоны представляется, что эффективный комплекс методов поисков руд на территории Северного Забайкалья должен включать биогеохимические и гидрогеохимические исследования, которые в данных условиях могут быть эффективнее традиционных литохимических методов поисков.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Будяк А.Е., Паршин А.В., Дамдинов Б.Б., Реутский В.Н., Спиридонов А.М., Волкова М.Г., Брюханова Н.Н., Брянский Н.В. Новые данные геохимического и геофизического изучения Хадатканской разломной зоны (Северное Забайкалье) // Тихоокеанская геология. 2015. Т. 9. №5. С. 53-67.
2. Волков В.А., Прокофьев В.Ю., Алексеев В.Ю., Бакшеев И.А., Сидоров А.А. Рудообразующие флюиды и условия формирования золото-сульфидного оруденения в зоне смятия (shear zone): месторождение Погромное (Восточное Забайкалье) // Доклады Академии наук. 2011.Т. 441, №3.С. 352-357.
3. Зорин Ю.А., Беличенко В.Г., Рутштейн И.Г., Зорина Л.Д., Спиридонов А.М. Геодинамика западной части Монголо-Охотского пояса и тектоническая позиция рудных проявлений золота в Забайкалье //Геология и геофизика. 1998. Т. 39, № 11. С. 104-112.
4. Ларин А.М., Сальникова Е.Б, Котов А.Б. и др. Раннепротерозойские коллизионные и постколлизионные граниты северной части Байкальской складчатой области // Стратиграфия. Геологическая корреляция. 2006. Т. 14. № 5. С. 3-15.
5. Немеров В.К., Станевич А.М. Эволюция рифей-вендских обстановок биолитогенеза Байкальской горной области // Геология и геофизика. 2001. Т. 42. № 3. С. 456-470.
6. Немеров В.К., Станевич А.М., Развозжаева Э.А.и др. Биогенно-седиментационные факторы рудообразования в неопротерозойских толщах Байкало-Патомского региона // Геология и геофизика. 2010. Т.51. №5. С. 729-747.
7. Collins P. L. P. Gas hydrates in CO₂-bearing fluid inclusions and the use of freezing data for estimation of salinity // Economic Geology. 1979. V. 74. P. 1435–1444
8. Zorin Yu.A., Belichenko V.G., Turutanov E.Kh., Mazukabzov A.M., Sklyarov E.V., Mordvinova V.V. The East Siberia transect // International Geology Review, 1995, V. 37, №. 2, p. 154-175.
9. Velasques G., Beziat D., Salvi S., Siebenaller F., Borisova A.Y., Pokrovski G.S., Parseval P. Formation and deformation pyrite and implication for gold mineralization in the el Callao district, Venezuela // Economics Geology. 2014. V. 109, N 2. p. 457-486.

Перечень статей, опубликованных по тематике проекта в соответствии с
государственным заданием.

индикатор	Ед. измерения	Всего за 2013-2016 гг.	2013	2014	2015	2016
Количество публикаций в ведущих российских и международных журналах по результатам исследований, полученных в процессе реализации проекта	единиц	30	6	9	8	6
Количество публикаций в мировых научных журналах, индексируемых в базе данных «Сеть науки» (WEB of Science)	единиц	18	1	6	7	4
Число тезисов в конференциях	единиц	33	11	6	9	7
Число охраняемых объектов интеллектуальной собственности:	единиц	3	3	-	-	-
зарегистрированных патентов в России	единиц	0	0	0	0	0
зарегистрированных патентов за рубежом	единиц	0	0	0	0	0

Перечень статей, опубликованных по тематике проекта в 2016 г. в соответствии с
государственным заданием

1. Будяк А.Е., Горячев Н.А., Скузоватов С.Ю. Геодинамические предпосылки формирования масштабного оруденения южного обрамления Сибирского кратона в протерозое // Доклады Академии наук. 2016. Т. 470. № 5. С. 562-565.
2. Вилор Н.В., Мироманов А.В., Толстой М.Ю., Вилор М.А., Бадминов П.С. Сейсмическая и геотермальная активность региональных разломов (южное Прибайкалье, Восточная Сибирь) // Геоэкология, инженерная геология, гидрогеология, геокриология, 2016, № 2, С. 149-166.
3. Кравцова Р.Г., Макшаков А.С. Оценка уровня эрозионного среза золото-серебряных зон эпitherмального месторождения Роговик по геохимическим данным (Северо-Восток России) // Геология рудных месторождений, 2016, т. 58, № 6, С. 544-558
4. Кравцова Р.Г., Тарасова Ю.И., Макшаков А.С., Павлова Л.А. Особенности распределения и формы нахождения золота, серебра и сопутствующих элементов в потоках рассеяния золото-серебряных зон Дукатского месторождения (Северо-Восток России) // Геология и геофизика, 2016, № 4, С. 676-698.
5. Tarasova Yu.I., Sotskaya O.T., Skuzovатов S.Yu., Vanin V.A., Kulikova Z.I., Budyak A.E. Mineralogical and geochemical evidence for multi-stage formation of the Chertovo Koryto deposit // Geodynamics & Tectonophysics, 2016, V. 7, № 4, P. 663-677
6. Ertl A., Baksheev I.A., Giester G., Lengauer C.L., Prokofiev V.Yu., Zorina L.D. Bosiite, $\text{NaF}^{e3}_{+3}(\text{A}_{14}\text{M}_{g2})(\text{S}_{16}\text{O}_{18})(\text{B}_{\text{O}3})_3(\text{OH})_3\text{O}$, a new ferric member of the tourmaline supergroup from the Darasun gold deposit, Transbaikalia, Russia // European Journal of Mineralogy, 2016, V. 28, № 3, p. 581-591.