

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

УДК 553.41(571.65+571.53)

Рег. № НИОКР АААА-А17-117102740106-0

Инв. № _____

УТВЕРЖДАЮ

Директор ИГХ СО РАН,

д.г.-м.н.

_____ А.Б. Перепелов

« _____ » _____ 2019 г.

ОТЧЕТ

О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

по теме:

ОСОБЕННОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ И ФОРМЫ НАХОЖДЕНИЯ
БЛАГОРОДНЫХ МЕТАЛЛОВ В РУДАХ И МИНЕРАЛАХ
МЕСТОРОЖДЕНИЙ ЗОЛОТА И СЕРЕБРА

Блок проекта «Формы нахождения благородных металлов в сульфидных рудах разного генезиса: минералого-геохимические исследования, эксперимент, приложение к технологиям извлечения» Комплексной программы фундаментальных научных исследований СО РАН П.1.
(промежуточный, этап 1)

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»

Шифр темы: 0350-2018-0001

Ответственный исполнитель Блока

вед. науч. сотр., д.г.-м.н.

_____ Р.Г. Кравцова

Иркутск 2019

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Отв. исполнитель, вед. науч. сотр., д.г.-м.н.	_____	Р.Г. Кравцова (введение, раздел 1, 2, 3, заклучение)
Исполнители: Гл. науч. сотр., д.г.-м.н., чл.-корр. РАН, проф.	_____	Н.А. Горячев (раздел 4)
Гл. науч. сотр., д.х.н.	_____	В.Л. Таусон (раздел 2, 3)
Ст. науч. сотр., к.г.-м.н.	_____	А.С. Макшаков (раздел 1, 2)
Ст. науч. сотр., к.г.-м.н.	_____	А.Е. Будяк (раздел 4)
Науч. сотр., к.г.-м.н.	_____	Ю.И. Тарасова (раздел 4)
Аспирант (до 29 лет)	_____	В.В. Татаринев (раздел 2)

РЕФЕРАТ

Отчет 13 с., 3 рис., 2 табл., 3 источн., 1 прил.

ЗОЛОТО, СЕРЕБРО, ЭЛЕМЕНТЫ ПЛАТИНОВОЙ ГРУППЫ, МИНЕРАЛОГИЯ И ГЕОХИМИЯ РУД, ПРИРОДНЫЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РУДНЫЕ СИСТЕМЫ, СИНТЕЗ МИНЕРАЛОВ

Рассмотрены природные благороднометалльные системы орогенных (Au, Ag, Pt, Pd) и эпитермальных вулканогенных (Au, Ag) золоторудных месторождений, составляющие исходную базу для экспериментальных построений и исследований. Проведено изучение типоморфизма и типохимизма самородного золота эпитермального Au-Ag месторождения Кварцевая Сопка (Северо-Восток России).

Получены новые данные по строению и составу главных минералов руд пирита и арсенопирита, самородного золота и других минералов – его концентраторов. Изучен микроминеральный и химический состав поверхностного слоя кристаллов арсенопирита и пирита на Наталкинском орогенном золоторудном месторождении (Северо-Восток России).

Рассмотрены вопросы, связанные с распространением «невидимого» золота в природных сульфидных системах. Проведена оценка содержания БМ (Au, Ag, Pt) в рудообразующих флюидах месторождений Наталкинское и Дегдекан (Северо-Восток России).

Проведен локальный анализ изотопного состава серы сульфидов руд крупнейших месторождений бодайбинского синклиория – Сухой Лог и Вернинское (Восточная Сибирь). Полученные результаты по вариациям $\delta^{34}\text{S}$ свидетельствуют о заметном разделении изотопов серы в ходе процесса формирования рудной минерализации сухоложского типа.

СОДЕРЖАНИЕ

Термины и определения	5
Перечень сокращений и обозначений.....	6
Введение.....	7
ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ ОТЧЕТА	
1. Золото-серебряные месторождения Дальнее и Кварцевая Сопка.....	8
2. Золото-кварцевое месторождение Наталкинское	10
3. Экспериментальные и расчетные данные	11
4. Изотопные исследования.....	13
Заключение	14
Список использованных источников	16
ПРИЛОЖЕНИЕ А. Список опубликованной авторами литературы	
по теме проекта.....	17

ТЕРМИНЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

В настоящем отчете о НИР применяют следующие термины с соответствующими определениями:

генезис – происхождение каких либо геологических образований (горных пород, месторождений и т.д.), возникших в определенных условиях при воздействии геологических процессов

месторождение – разведанное и достоверно опробованное природное скопление полезных ископаемых, которое в количественном и качественном отношении может быть предметом промышленной разработки при данном состоянии техники и в данных экономических условиях

сингенетические – любой геологический объект (горная порода, минерал, руда и т.д.), его свойство (структура, текстура и др.), процесс, возникающие одновременно с другими объектами, свойствами, процессами в пределах единого геологического объекта более высокого ранга

тонкодисперсные – частицы минералов размером < 10 мкм

эпитермальные – низкотемпературные

ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ И ОБОЗНАЧЕНИЙ

В настоящем отчете о НИР применяют следующие сокращения и обозначения:

БМ – благородные металлы

ПНФ – поверхностная неавтономная фаза

СЭМ-ЭДС – сканирующая электронная микроскопия-энергодисперсионная спектроскопия

ФН – формы нахождения

Au-Ag – золото-серебряные

C^{aq} – содержания БМ в рудообразующем флюиде

$D^{стр}$ – коэффициент распределения структурной составляющей золота в пирите

δ^{34S} – изотоп серы 34

ВВЕДЕНИЕ

Настоящий отчет представляет промежуточные результаты исследований природных и экспериментальных минеральных систем сульфидного ряда. В первой главе отчета отражены материалы исследований природных систем орогенных и эпитермальных месторождений золота крупнейших золотоносных структур Сибири и Дальнего Востока. Показано разнообразие ФН золота и сложность распределения частиц «невидимого» золота в пиритах и арсенопиритах золоторудных месторождений. На примере зонально построенных кристаллов арсенопирита и пирита показаны вариации изотопного состава серы. Рассмотрены вопросы экспериментального воспроизведения природных рудообразующих процессов в гидротермальных постмагматических системах.

Актуальность исследований, выполненных в 2018 году, связана с возрастающей ролью коренных объектов в работе золотодобывающей промышленности регионов Восточной Сибири и Северо-Востока России. Основной становится проблема выявления новых, в первую очередь, крупных месторождений золота. Накопленный опыт и огромный фактический материал, ставят перед исследователями широкий круг задач в области теории и практики рудообразования. Решение этих задач должно базироваться на надежной основе. Такой основой являются комплексные фундаментальные исследования, выполнение которых начато в 2018 году.

Основная цель исследования – изучение условий формирования и процессов, отвечающих за происхождение разных по типу и генезису золоторудных месторождений, в том числе крупных и уникальных. Основные задачи: 1 – получение новой информации по распределению и уровню концентрирования БМ (Au, Ag Pt, Pd, Ru и др.) в рудах и сульфидных минералах месторождений Восточной Сибири и Северо-Востока России – орогенных золото-сульфидных в «черносланцевых» толщах (Сухой Лог, Вернинское, Наталкинское, Дегдекан), эпитермальных Au-Ag (Кварцевая Сопка, Дальнее, Дукат, Роговик); 2 – выявление ФН БМ,

изучение собственно самородного Au в этих рудах, определение его крупности, вариаций пробы, спектров микропримесных элементов, минеральных ассоциаций.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ ОТЧЕТА

1. Золото-серебряные месторождения Дальнее и Кварцевая Сопка

Обобщены данные по изучению состава золотин на Au-Ag месторождениях Кварцевая Сопка и Дальнее. Для руд этих месторождений характерно свободное тонкодисперсное и мелкое золото в ассоциации с кварцем и сульфидными минералами (рисунок 1, 2).

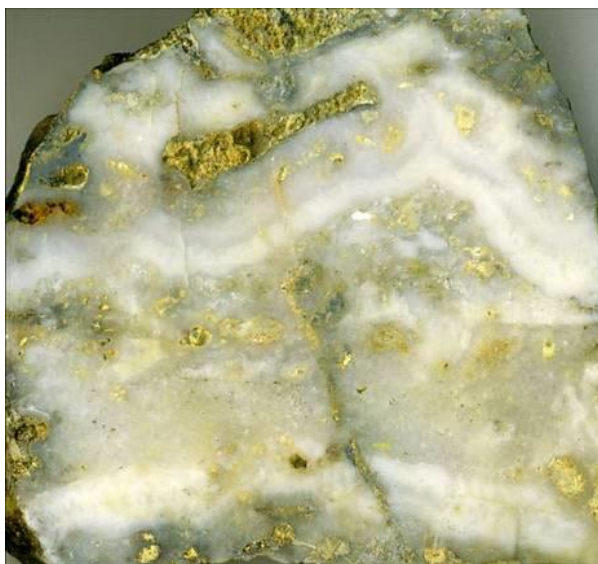


Рисунок 1 – Месторождение Дальнее. Адуляр-кварцевая жила колломорфно-полосчатой текстуры с самородным золотом и минералами Ag (карьер №1, гор. 443 м, жила № 1)

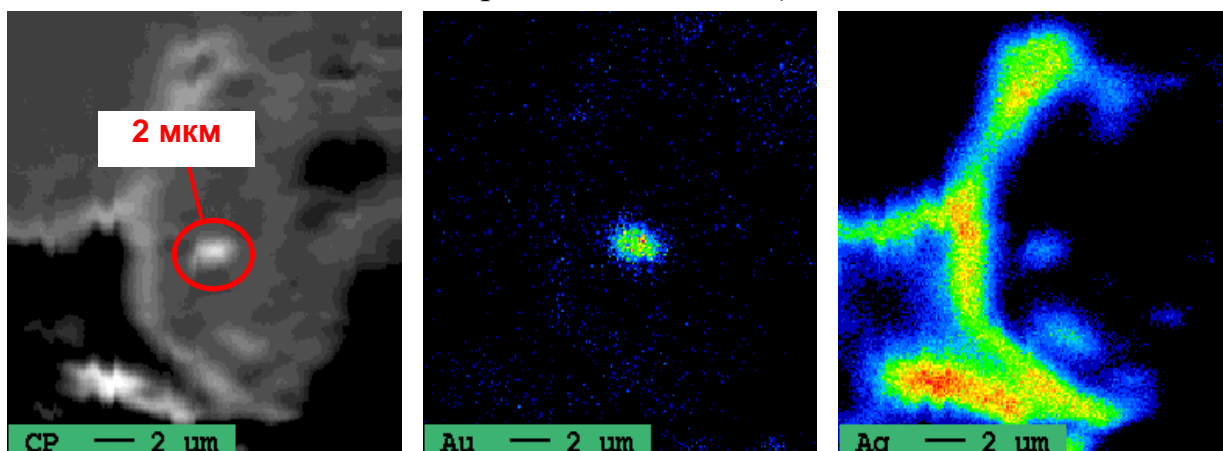


Рисунок 2 – Месторождение Дальнее. Тонкодисперсные выделения самородного Au. Микрозонд. Изображения даны в обратно-рассеянных электронах и рентгеновских лучах

Золотины имеют изометричную (угловатую, комковидную, неправильную), пластинчатую формы и неоднородную структуру (**рисунок 3**), обладают высокой изменчивостью основного состава – от кюстелита до самородного золота с преобладанием электрума (**рисунок 4**) и значительным количеством примесей.

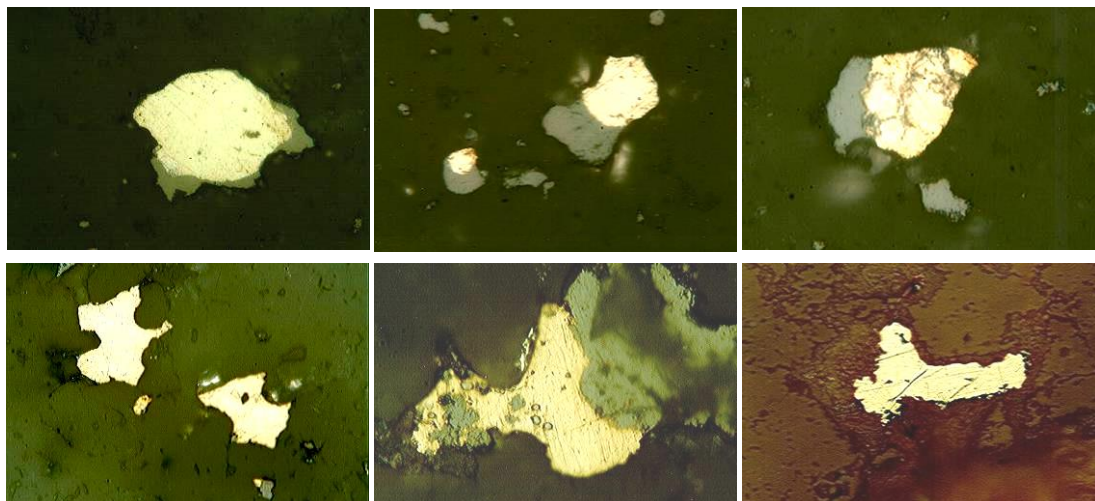


Рисунок 3 – Месторождение Дальнее. Включения золота в кварце. Оптический микроскоп

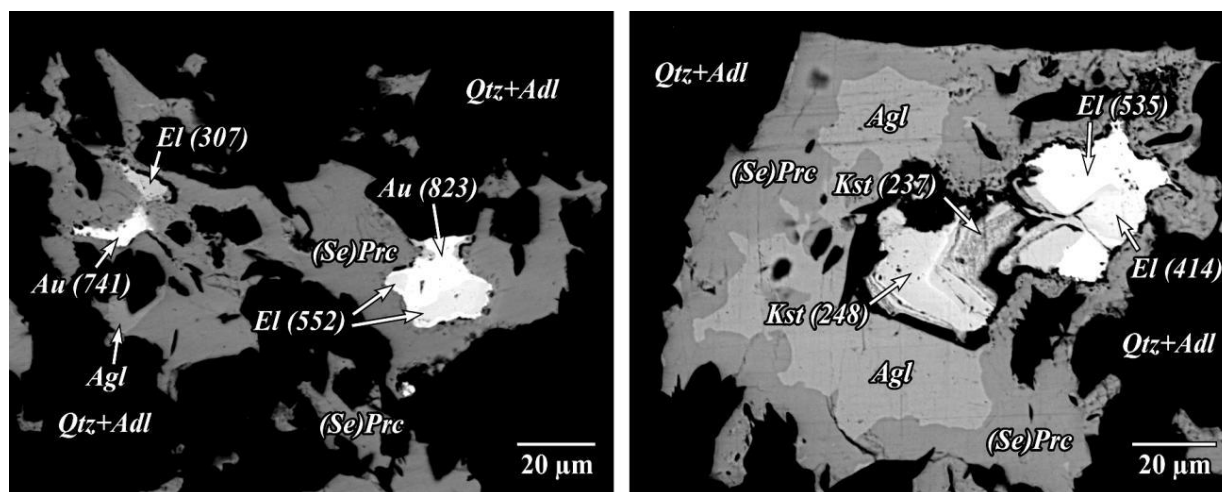


Рисунок 4 – Месторождение Кварцевая Сопка. Самородное золото (*Au*), электрум (*El*) и кюстелит (*Kst*) (в скобках дана пробность, ‰) в сростании с *Se*-пирсеитом (*(Se)Prc*) и агвиларитом (*Agl*) в кварц-адуляровой массе (*Qtz+Adl*). Изображения даны в обратно-рассеянных электронах

Отмечена тенденция увеличения пробности золота и количества элементов-примесей в нем с глубиной (мас. ‰): *Bi* от 0.50 до 1.46, *Se* от 0.67 до 0.75, *Zn* от 0.20 до 0.25, *Pb* от 0.10 до 0.41, *S* от 0.10 до 0.29, *Cu* от 0.06 до 0.31,

As от 0.06 до 0.22. Примесь Te (0.11–0.21), характерная для золотин приповерхностных зон, на глубине отсутствует.

2. Золото-кварцевое месторождение Наталкинское

С помощью метода СЭМ-ЭДС изучен микроминеральный и химический состав поверхностного слоя кристаллов арсенопирита и пирита Наталкинского месторождения. Из нерудных минералов на поверхности большинства кристаллов установлены микронные и субмикронные включения, в основном, кварца и карбоната, из рудных – мелкие и тонкодисперсные включения золота, сфалерита, халькопирита, галенита и рутила (рисунок 5, 6).

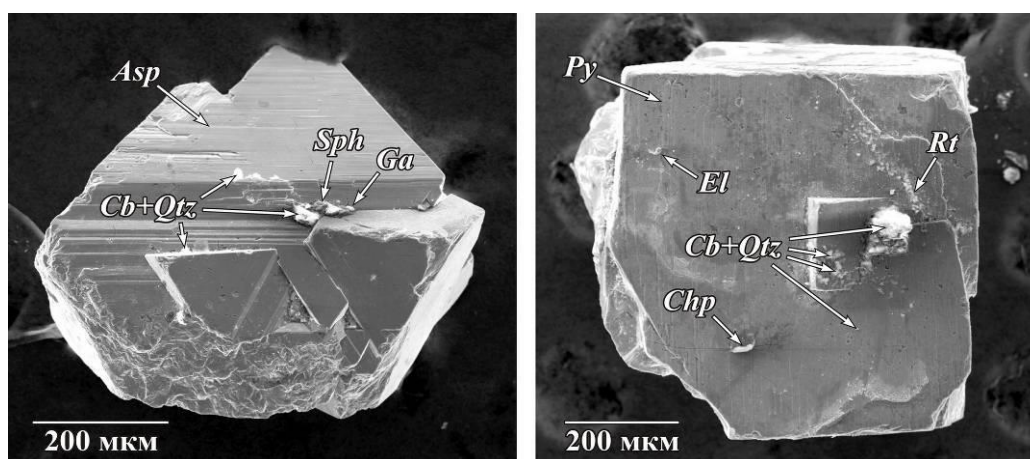


Рисунок 5 – Кристаллы арсенопирита (*Asp*) и пирита (*Py*) с микровключениями карбоната (*Cb*), кварца (*Qtz*), сфалерита (*Sph*), галенита (*Ga*), электрума (*El*), халькопирита (*Chp*) и рутила (*Rt*). Здесь и далее – изображения даны во вторичных электронах

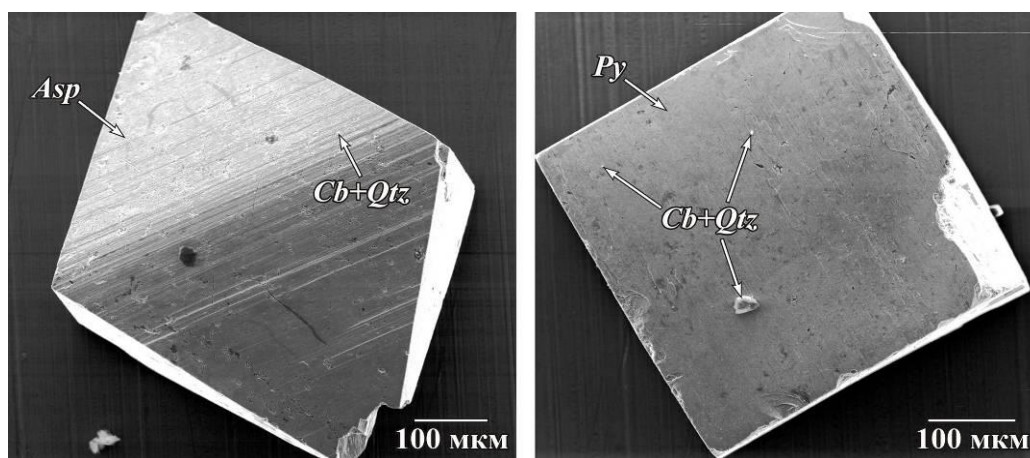


Рисунок 6 – Кристаллы арсенопирита (*Asp*) и пирита (*Py*) с микровключениями карбоната (*Cb*) и кварца (*Qtz*)

Самородное золото на поверхности этих сульфидов, в основном, мелкое и тонкодисперсное, часто образует причудливые формы (**рисунок 7**). По данным СЭМ-ЭДС золотины представлены электрумом с примесью U (до 1.43 мас. %), Pt (до 0.73 мас. %) и Hg (до 0.75 мас. %) (**таблица 1**).

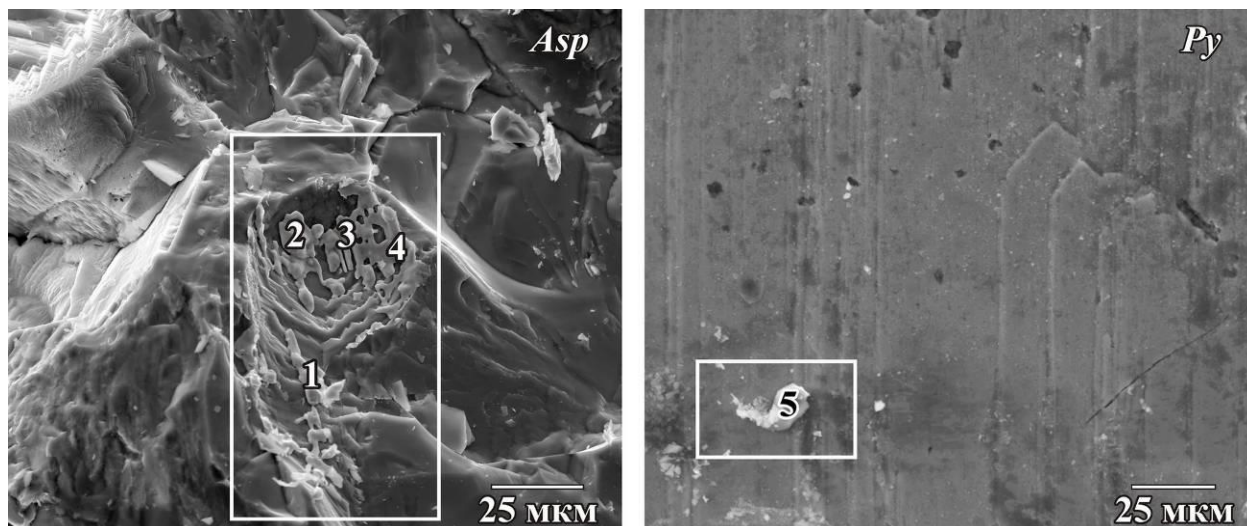


Рисунок 7 – Фрагменты поверхности арсенопирита (*Asp*) и пирита (*Py*). В рамках: слева – агрегат электрума, кварца и карбоната; справа – включение электрума. 1–5 – точки определения содержаний элементов, указанных в табл. 1. Ниже даны рентгеновские энергетические спектры электрума (точка 5)

Таблица 1 – Химический состав (в мас. %) электрума, имеющего скелетную структуру поверхности арсенопирита (точки 1–4) и зерно электрума на поверхности мышьяковистого пирита (точка 5). Месторождение Наталкинское

<i>n</i>	Au	Ag	C	O	Fe	As	Hg	Pt	Os	Ir	Rh	U
1	48.65	33.42	6.23	2.60	3.30	4.00	0.66	0.62	<i>0.33</i>	<i>0.33</i>	<i>0.16</i>	0
2	48.92	32.67	7.83	2.64	2.92	4.07	0	0	0	0	<i>0.11</i>	0.84
3	46.97	33.91	7.53	2.58	2.97	4.09	<i>0.31</i>	<i>0.42</i>	0	0	<i>0.10</i>	1.12
4	49.21	33.41	5.65	2.65	0.80	4.77	0.75	0.73	<i>0.30</i>	<i>0.30</i>	0	1.43
5	58.61	36.35	0	0	1.27	3.30	0	<i>0.47</i>	0	0	0	0

Примечание – *n* - точки замера. Здесь и далее: сумма приведена к 100%, основной состав выделен жирным шрифтом, содержания элементов < 0.5 мас. % – курсивом, 0 – не обнаружено. Аналитические линии – AuL_α, AgL_α, CK_α, NK_α, OK_α, FeK_α, AsK_α, HgL_α, PtL_α, OsL_α, IrL_α, RhL_α, UL_α. Высокие Fe и As вероятнее всего вызваны влиянием захвата матрицы (арсенопиритовой “подложки”).

3. Экспериментальные и расчетные данные

Проведены исследования по изучению особенностей распределения и сегрегации редких элементов-примесей при росте кристаллов рудных минералов в гидротермальных системах, природных и полученных экспериментальным путем.

Установлено, что граничный слой кристалла малорастворимого минерала, растущего в гидротермальных условиях, химически модифицирован в ПНФ, и в этом качестве принимает участие в ростовом процессе, осуществляя ряд важных функций. В статье рассматриваются некоторые из них, относящиеся к области геохимии и минералогии. Предлагается новое объяснение таким явлениям, как отбор компонентов при росте кристалла в многофазных ассоциациях, устойчивость многофазных парагенезисов минералов с общим химическим компонентом; двойственный характер коэффициентов распределения, вызванный разными свойствами объема кристалла и ПНФ; образование в минералах нано- и микровключений необычного состава; пространственное упорядочение нано- и микрочастиц при их ориентированной агрегации на грани растущего кристалла; концентрирование полезных компонентов, прежде всего БМ, несовместимых в большинстве минеральных матриц, в поверхностном слое, и явление «скрытой» металлоносности, связанное с присутствием БМ в составе ПНФ или, образующихся в результате их эволюции, поверхностных нано- и микровключений.

Дана оценка содержания БМ (Au, Pt, Pd) в рудообразующем флюиде по составу природного пирита ряда золоторудных месторождений (таблица 2). Для оценки содержания БМ в рудообразующем флюиде (C^{aq}) месторождений Наталка и Дегдекан использованы содержание элемента в структурной форме в природном пирите и коэффициент распределения для той же формы по экспериментальным данным (D^{cmp}) [1–3]. Для Au принята средняя величина D^{cmp} 0.1, для Pt – 21, для Ag – 1400.

Таблица 2 – Оценка содержания благородных металлов в рудообразующем флюоиде по составу пирита

№ образца	Месторождение	Число крист. (нач.-конеч. выборка)	Элемент	Содержание в пирите, г/т		C ^{aq} , г/т	(Au/Ag) ^{aq}	(Au/Pt) ^{aq}
				Стр.	Пов.			
М-163/10	Дегдекан	95-59	Au	0.21	0.53	2.1	Не опр.	21
		92-71	Pt	2.0	7.1	0.1		
ДГ-10/14*	Дегдекан	67-44	Au	0.13	1.1	1.3	14.4	5.4
		67-42	Ag	122	195	0.09		
		34-22	Pt	5.1	102	0.24		
ЮВ-3/13*	Наталка	80-52	Au	0.29	1.37	2.9	9.7	1.6
		80-54	Ag	448	800	0.3		
		79-52	Pt	37	189	1.8		

Примечание. *Пирит в ассоциации с арсенопиритом.

Установлено, что содержание Au во флюоидах месторождений Наталкинское и Дегдекан находится на уровне 1.3-2.9 г/т. Содержание Ag заметно ниже по сравнению с Au и составляет от 0.09 до 0.3 г/т. Содержание Pt в основном от 0.10 г/т до 0.24 г/т и повышено на Наталкинском месторождении до 1.8 г/т. Флюид, формирующий руды Наталкинского месторождения, явно обогащен всеми тремя элементами по сравнению с другими пробами.

4. Изотопные исследования

Выполнен локальный анализ изотопного состава серы сульфидов руд крупнейших месторождений бодайбинского синклинория – Сухой Лог, Вернинское, Голец Высочайший (Восточная Сибирь). Полученные результаты по вариациям $\delta^{34}\text{S}$ свидетельствуют о заметном разделении изотопов серы в ходе процесса формирования рудной минерализации сухоложского типа. Предположительно сингенетический пирит обладает заметно более тяжелой серой (Сухой Лог, Вернинское), в то время как выявленная зональность метакристаллов указывает на закономерное облегчение состава серы от ранних к поздним зонам, что, вероятно, отвечает эволюции состава рудообразующего флюоида (**рисунок 8**). Отметим, что пирит рудных тел и окolorудных пород месторождения Голец Высочайший практически не различается по изотопному составу серы. Изотопная гомогенизация серы рудных пиритов разных

месторождений, фактически совпадающая с изотопным составом серы арсенопирита, указывает на их формирование в ходе единого процесса преобразования ранних сульфидов рудовмещающих толщ.

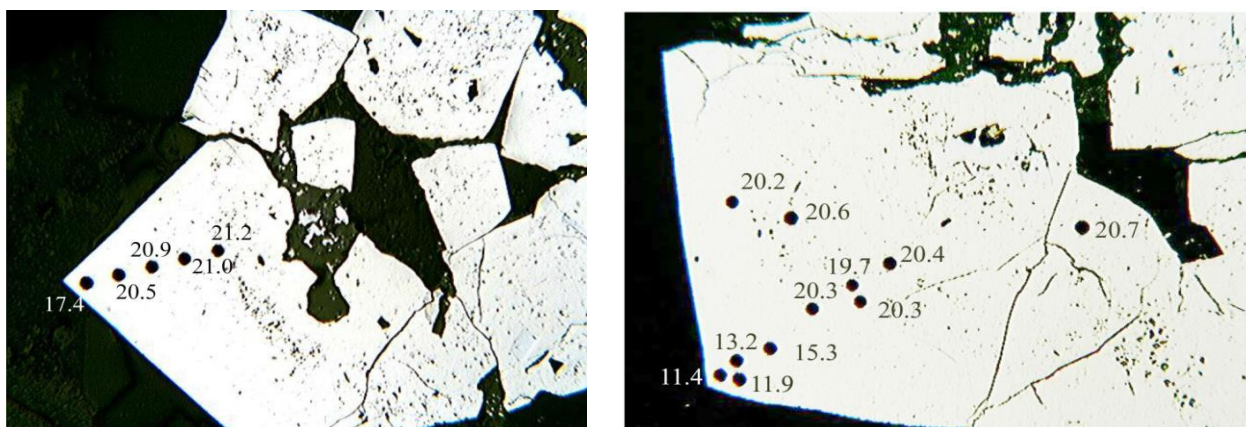


Рисунок 8 – Вариации изотопного состава S пирита месторождения Сухой Лог (карьер Западный, обр. 3-18)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Получены новые данные по геохимическому и минеральному составу руд орогенных золото-кварцевых месторождений Наталкинское, Дегдекан (Яно-Колымский золотоносный пояс) и эпиптермальных золото-серебряных месторождений Кварцевая Сопка, Дальнее (Охотско-Чукотский вулканогенный пояс), находящихся на территории Северо-Востока России. Начаты исследования по выявлению закономерностей распределения, уровней концентрирования и ФН БМ в рудах и минералах этих месторождений. По экспериментальным и расчетным данным проведена оценка содержания БМ (Au, Ag, Pt) в рудообразующем флюиде месторождений Наталка и Дегдекан.

Выполнен локальный анализа изотопного состава серы сульфидов руд крупнейших золоторудных месторождений бодайбинского синклиория – Сухой Лог, Вернинское (Восточная Сибирь). Полученные результаты по вариациям $\delta^{34}\text{S}$ свидетельствуют о заметном разделении изотопов серы в ходе процесса формирования рудной минерализации сухоложского типа. Зональность метакристаллов пирита указывает на закономерное облегчение состава серы от ранних к поздним зонам, что, вероятно, отвечает эволюции состава рудообразующего флюида

Научная значимость результатов, полученных в 2018 году, заключается в обобщении на новом уровне полученной информации с целью понять, какие необходимые и достаточные условия приводят к формированию Au-рудных месторождений, в том числе крупных и уникальных, практическая – в разработке на этой основе прогнозно-поисковых критериев и решении вопросов, связанных с обогащением руд.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Таусон В.Л., Бабкин Д.Н., Пастушкова Т.М., Краснощекова Т.С., Лустенберг Э.Е., Белозерова О.Ю. Двойственные коэффициенты распределения микроэлементов в системе «минерал-гидротермальный раствор». I. Аккумуляция золота пиритом // Геохимия. – 2011. – № 6. – С. 595-604.

2. Таусон В.Л., Липко С.В., Арсентьев К.Ю., Михлин Ю.Л., Бабкин Д.Н., Смагунов Н.В., Пастушкова Т.М., Воронова И.Ю., Белозерова О.Ю. Двойственные коэффициенты распределения микроэлементов в системе “минерал-гидротермальный раствор”. IV. Платина и серебро в пирите // Геохимия. – 2017. – № 9. – С. 759-781.

3. Таусон В.Л., Липко С.В., Смагунов Н.В., Кравцова Р.Г., Арсентьев К.Ю. Особенности распределения и сегрегации редких элементов примесей при росте кристаллов рудных минералов в гидротермальных системах: геохимические и минералогические следствия // Геология и геофизика. – 2018. – Т. 59. – № 12. – С. 2148–2165.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Список опубликованной авторами литературы по теме проекта

1. Таусон В.Л., Липко С.В., Смагунов Н.В., Кравцова Р.Г., Арсентьев К.Ю. Особенности распределения и сегрегации редких элементов примесей при росте кристаллов рудных минералов в гидротермальных системах: геохимические и минералогические следствия // Геология и геофизика. – 2018. – Т. 59. – № 12. С. 2148–2165.

2. Макшаков А.С., Кравцова Р.Г., Павлова Л.А. Самородное золото эпitherмального месторождения Кварцевая Сопка (Северное Приохотье) // Вопросы естествознания. – 2018. – № 2(16). – С. 76–83.

3. Макшаков А.С., Кравцова Р.Г., Павлова Л.А. Самородное золото эпitherмального месторождения Дальнее (Северное Приохотье) // IX Сибирская конференция молодых ученых по наукам о Земле: материалы конференции. Новосибирск: ИПЦ НГУ. – 2018. – С. 329–331.