

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

УТВЕРЖДАЮ

Директор ИГХ СО РАН,

д.г.-м.н.

А.Б. Перепелов

« 15 » 2020 г.

ОТЧЕТ

О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ за 2018-2019 гг.

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 II.1.  
(промежуточный, этапы 1, 2)

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 2020

## СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

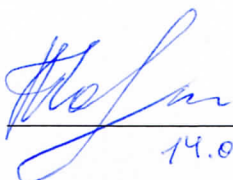
Отв. исполнитель,  
вед. науч. сотр., д.г.-м.н.

  
14.01.2020

Р.Г. Кравцова  
(введение, раздел 1, 2, 4,  
заключение)


Исполнители:

Гл. науч. сотр., д.г.-м.н.,  
чл.-корр. РАН, проф.

  
14.01.2020г.


Н.А. Горячев  
(раздел 4, 5)

Гл. науч. сотр., д.х.н.

  
14.01.2020г.


В.Л. Таусон  
(раздел 2, 4)

Ст. науч. сотр., к.г.-м.н.

  
14.01.2020г.


А.С. Макшаков  
(раздел 1, 2)

Ст. науч. сотр., к.г.-м.н.

  
14.01.2020г.

А.Е. Будяк  
(раздел 3, 5)

Ст. науч. сотр., к.г.-м.н.

  
14.01.2020г.

Ю.И. Тарасова  
(раздел 3, 5)

Аспирант (до 29 лет)

  
14.01.2020г.

В.В. Татаринов  
(раздел 4)

## РЕФЕРАТ

Отчет 22 с., 8 рис., 2 табл., 6 источн., 1 прил.

### ЗОЛОТО, СЕРЕБРО, ЭЛЕМЕНТЫ ПЛАТИНОВОЙ ГРУППЫ, МИНЕРАЛОГИЯ И ГЕОХИМИЯ РУД, ПРИРОДНЫЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РУДНЫЕ СИСТЕМЫ, ИЗОТОПНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

С помощью методов СВАОМ-ААС, фазового химического анализа, СЭМ-ЭДС и ЛА-ИСП-МС исследованы особенности распределения и ФН Au, Pt, Pd, Ru, Rh, Os, Ir в арсенопиритах и пиритах месторождения Наталкинское (Северо-Восток России). Изучен микроминеральный и химический состав их поверхностного слоя. Рассмотрены вопросы, связанные с распространением «невидимого» Au в природных сульфидных системах. По экспериментальным и расчетным данным проведена оценка содержания БМ (Au, Ag, Pt) в рудообразующем флюиде месторождений Наталка и Дегдекан.

Показаны различия в изотопном составе серы месторождений Сухой Лог и Голец Высочайший (Восточная Сибирь). На золоторудном месторождении Голец Высочайший выделено 4 морфологических разновидности пирита, установлены их взаимоотношения. Сделан вывод, что формирование большинства штокверковых рудных объектов Байкало-Патомского нагорья происходило в результате одних и тех же процессов, разделенных во времени, но с учетом специфики вмещающих толщ и степени метаморфизма.

## СОДЕРЖАНИЕ

ТЕРМИНЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ.....	5
ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ И ОБОЗНАЧЕНИЙ .....	6
ВВЕДЕНИЕ.....	7
1 ЗОЛОТО-СЕРЕБРЯНЫЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ ДАЛЬНЕЕ И КВАРЦЕВАЯ СОПКА .....	8
2 ЗОЛОТО-КВАРЦЕВОЕ МЕСТОРОЖДЕНИЕ НАТАЛКИНСКОЕ.....	10
3 ЗОЛОТОРУДНОЕ МЕСТОРОЖДЕНИЕ ГОЛЕЦ ВЫСОЧАЙШИЙ .....	13
4 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ И РАСЧЕТНЫЕ ДАННЫЕ.....	15
5 ИЗОТОПНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	18
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	19
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ .....	21
ПРИЛОЖЕНИЕ А. СПИСОК ОПУБЛИКОВАННОЙ АВТОРАМИ ЛИТЕРАТУРЫ ПО ТЕМЕ ПРОЕКТА .....	22

## 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

монофракция – проба, состоящая из одного минерала определенной размерности

минеральная ассоциация – совокупность минералов, совместно присутствующих в горных породах, рудах и т.д.

## ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ И ОБОЗНАЧЕНИЙ

В настоящем отчете о НИР применяют следующие сокращения и обозначения:

БМ – благородные металлы

ЭПГ – элементы платиновой группы

НФ – неавтономная фаза

ПНФ – поверхностная неавтономная фаза

СЭМ-ЭДС – сканирующая электронная микроскопия-энергодисперсионная спектрометрия

СВАДМ-ААС – статистические выборки аналитических данных для монокристаллов с применением атомно-абсорбционной спектрометрии

ЛА-ИСП-МС – масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой и лазерной абляцией

ФН – формы нахождения

Au-Ag – золото-серебряные

$C^{aq}$  – содержания БМ в рудообразующем флюиде

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

$C_{пов.}$  – содержание поверхностно-связанной формы

$C_{стр.}$  – содержание структурной формы

$\delta^{34}S$  – изотоп серы 34

## ВВЕДЕНИЕ

Настоящий отчет представляет результаты исследований природных и экспериментальных минеральных систем сульфидного ряда, выполненные в 2018-2019 гг. В отчете отражены материалы исследований природных систем орогенных и эпitherмальных месторождений золота крупнейших золотоносных структур Восточной Сибири и Северо-Востока России. Показано разнообразие ФН золота, в том числе «невидимого», 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 2018-2019 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 и их решение должно базироваться на надежной основе. Такой основой являются комплексные фундаментальные исследования, выполнение которых начато в 2018 году.

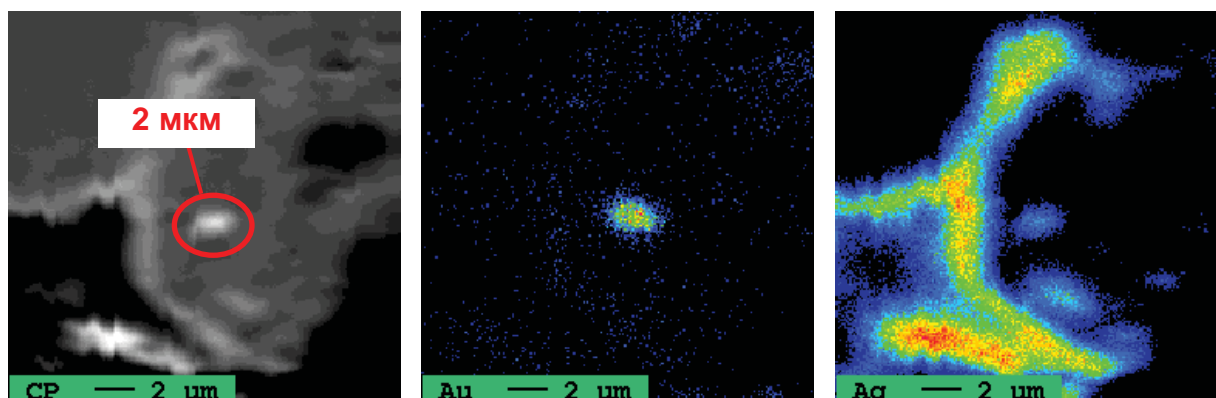
Основная цель исследования – изучение условий формирования и процессов, отвечающих за происхождение разных по типу и генезису золоторудных месторождений. Основные задачи: 1 – получение новой информации по распределению и уровню концентрирования БМ (Au, Ag Pt, Pd, Ru и др.) в рудах и сульфидных минералах месторождений Восточной Сибири и Северо-Востока России – орогенных золото-сульфидных в «черносланцевых» толщах (Сухой Лог, Вернинское, Наталкинское, Дегдекан), эпitherмальных Au-Ag (Кварцевая Сопка, Дальнее, Дукат, Роговик); 2 – выявление ФН БМ, изучение собственно самородного Au в этих рудах, определение его крупности, вариаций пробности, спектров микропримесных элементов, минеральных ассоциаций.

## 1 ЗОЛОТО-СЕРЕБРЯНЫЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ ДАЛЬНЕЕ И КВАРЦЕВАЯ СОПКА

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



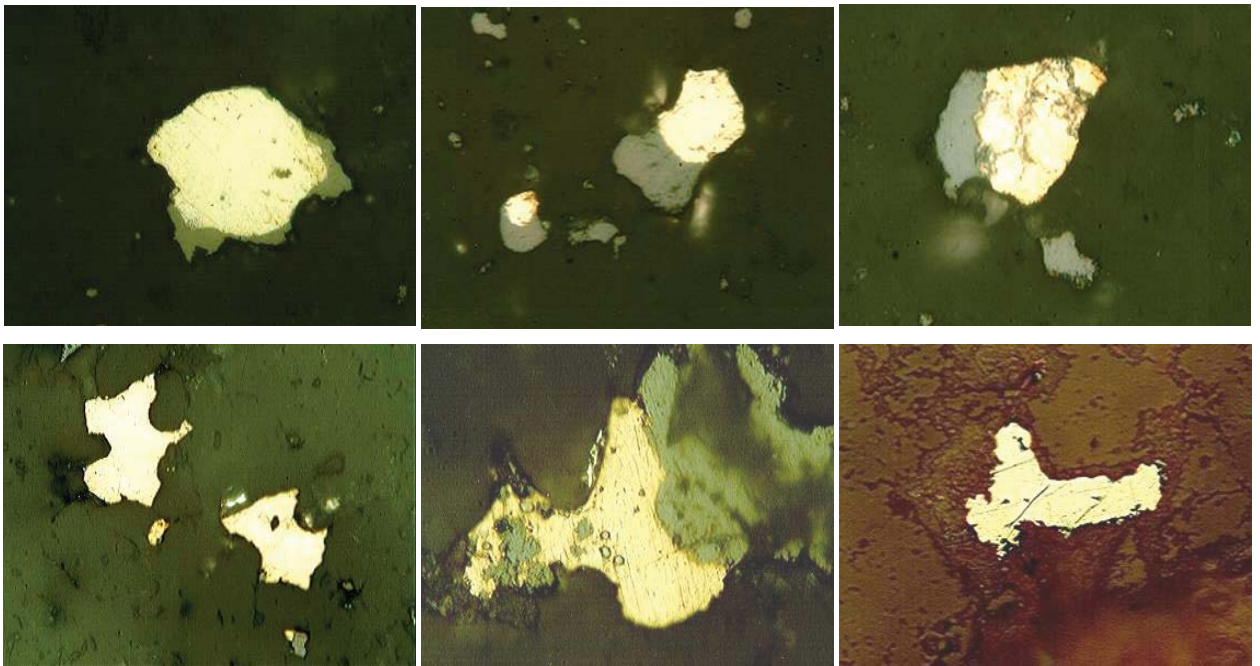
**Рисунок 1** – Месторождение Дальнее. Адуляр-кварцевая жила колломорфно-полосчатой текстуры с самородным золотом и минералами Ag (карьер №1, гор. 443 м, жила № 1)



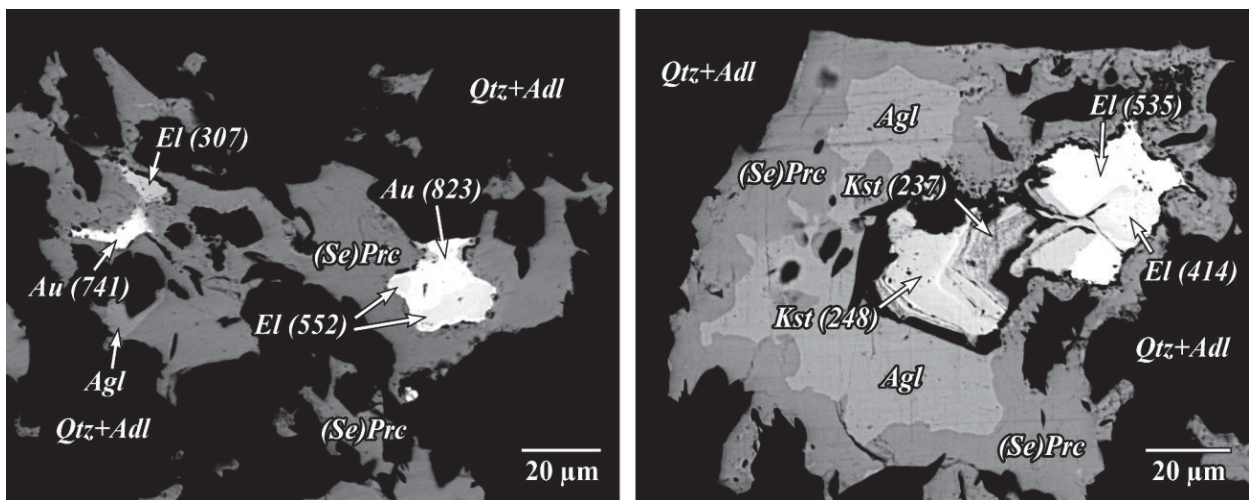
**Рисунок 2** – Месторождение Дальнее. Тонкодисперсные выделения самородного Au. Микронзонд. Изображения даны в обратно-рассеянных электронах и рентгеновских лучах

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



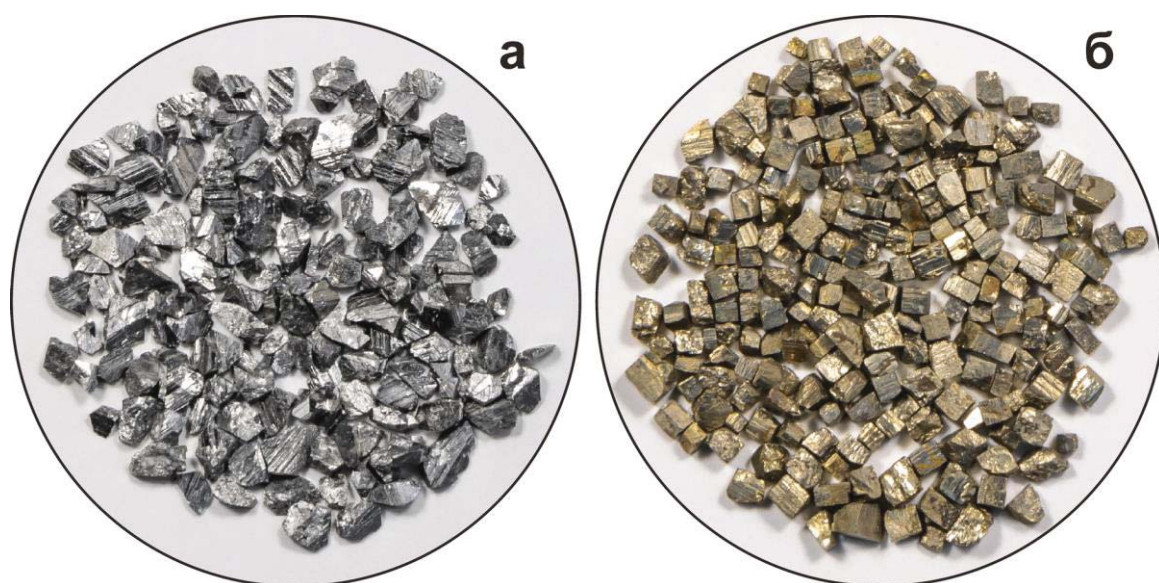
**Рисунок 4** – Месторождение Кварцевая Сопка. Самородное золото (*Au*), электрум (*El*) и кюстелит (*Kst*) (в скобках дана пробность, ‰) в сростании с *Se*-пирсеитом (*(Se)Prc*) и агвиларитом (*Agl*) в кварц-адуляровой массе (*Qtz+Adl*). Изображения даны в обратно-рассеянных электронах

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

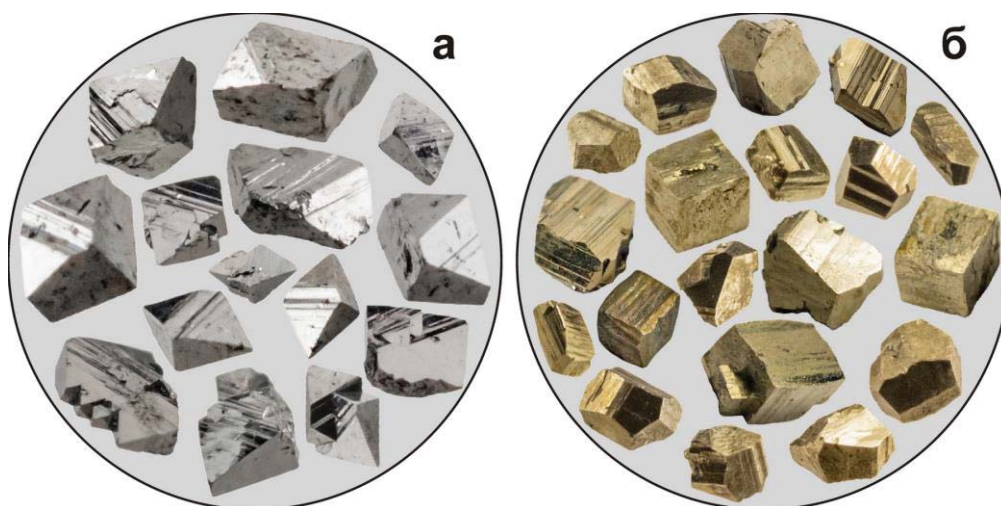
Методами фазового химического анализа, СВАДМ-ААС, СЭМ-ЭДС и ЛА-ИСП-МС изучены особенности распределения и ФН ЭПГ (Pt, Pd, Ru, Rh, Os, Ir) в арсенопиритах и пиритах золоторудного месторождения Наталкинское (Северо-Восток России).

В мономинеральные пробы отбирались кристаллы арсенопирита в виде ромбических призм и дипирамид и кристаллы пирита кубического и кубооктаэдрические габитуса (**рисунок 5**). Установлено, что все изученные арсенопириты и пириты месторождения являются концентраторами не только Au, но и таких элементов как Pt, Pd, Ru и Rh. Наиболее высокие концентрации (в г/т) отмечены в монофракциях арсенопирита – Pt до 127.9, Pd до 19.7, Ru до 86.3 и Rh до 21.4, менее высокие в монофракциях пирита – Pt до 29.1, Pd до 15.1, Ru до 57.8 и Rh до 5.9 .



**Рисунок 5** – Мономинеральные фракции: а – арсенопирита, б – пирита.  
Месторождение Наталкинское

Для изучения ЭПГ (Pt, Pd, Ru) в арсенопиритах и пиритах методом СВАДМ-ААС из разноразмерных мономинеральных фракций отбирались кристаллы только с хорошо выраженной морфологической формой – кристаллы арсенопирита моноклинной сингонии и кристаллы пирита кубической сингонии (**рисунок 6**). Было изучено 415 кристаллов арсенопирита и 234 кристалла пирита.



**Рисунок 6** – Кристаллы: а – арсенопирита, б – пирита

Выявлены две ФН равномерно распределенных Pt, Pd, Ru и Rh – структурная и поверхностная, соответствующие химически связанному элементу в структуре минерала и в структуре находящейся на поверхности кристалла наноразмерной НФ. Последняя преобладает. Максимальные концентрации платиноидов, химически связанных в структуре арсенопирита, достигают значений (в г/т): Pt – 47.46, Pd – 5.85, Ru – 47.6, Rh – 45.02; в структуре пирита: Pt – 67.5, Pd – 5.23, Ru – 33.5, Rh – н/опр. Концентрации Pt, Pd, Ru и Rh в структуре находящейся на поверхности кристалла наноразмерной НФ значительно выше и составляет (в г/т): для арсенопирита Pt – 714, Pd – 114, Ru – 1083, Rh – 678; для пирита Pt – 890, Pd – 61.8, Ru – 690, Rh – н/опр.

Для изучения состава «невидимой» примесной составляющей на поверхности кристаллов арсенопирита и пирита методом СЭМ-ЭДС выбирались так называемые «чистые» площадки, практически не имеющие видимых включений и значительных дефектов. Так, на «чистой» поверхности арсенопирита в качестве примеси из платиноидов присутствуют (в мас. %): Pt (до 1.05), Ru (1.02), Ir (до 0.69) и Os (до 0.67). Установлен еще целый ряд рудных элементов (в мас. %): U (до 2.03), Hg (до 1.11), Au (до 0.96), в единичных случаях Ag (до 0.71) (таблица 1). В то же время на «чистой» поверхности пирита из платиноидов присутствует только Pt (до 2.88 мас. %), из других рудных элементов – As (до 2.24 мас. %) и Cu (до 0.69 мас. %).

**Таблица 1** – Химический состав (в мас. %) поверхностного слоя кристаллов арсенопирита с микронными редкими включениями нерудных минералов. Жильный тип руд. Месторождение Наталкинское

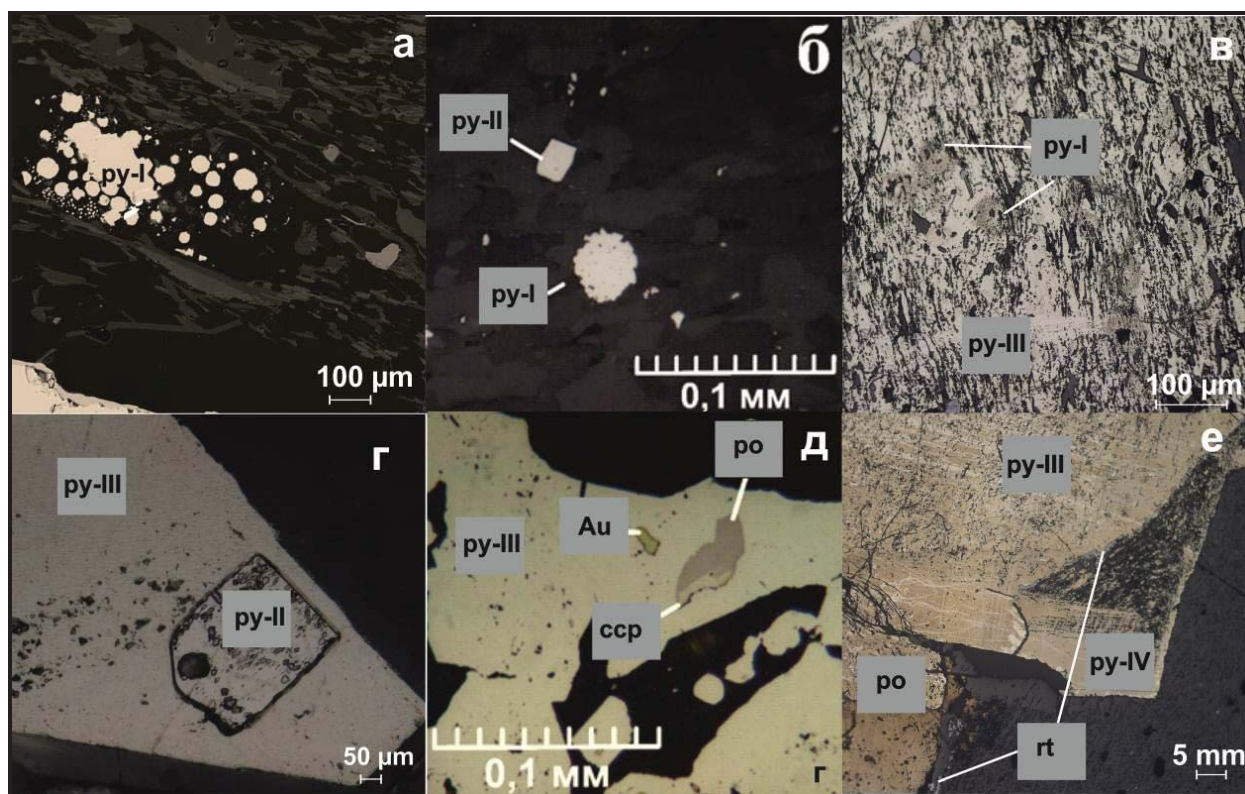
№№ проб	N	n	Fe	As	S	Hg	Au	Ag	Pt	Os	Ir	Ru	U
М-129/10	1	1	<b>31.6</b>	<b>35.9</b>	<b>23.4</b>	0.65	0.67	<i>0.23</i>	<i>0.47</i>	–	–	–	0.80
		2	<b>32.5</b>	<b>35.7</b>	<b>20.2</b>	1.08	0.86	<i>0.31</i>	0.61	–	–	–	1.49
	2	1	<b>29.9</b>	<b>36.3</b>	<b>20.4</b>	1.11	0.93	<i>0.11</i>	1.05	–	–	–	2.03
		2	<b>28.9</b>	<b>39.0</b>	<b>20.6</b>	0.86	0.78	<i>0.24</i>	<i>0.44</i>	–	–	–	1.39
	3	1	<b>32.6</b>	<b>41.8</b>	<b>16.1</b>	0.95	0.67	–	0.54	0.57	<i>0.44</i>	–	0.86
		2	<b>32.1</b>	<b>43.4</b>	<b>14.2</b>	0.87	0.96	<i>0.21</i>	0.95	0.64	0.67	0.97	1.29
		3	<b>32.3</b>	<b>43.1</b>	<b>15.4</b>	0.91	0.94	0.71	0.92	0.67	0.69	1.02	1.20

Примечание. Pd, Rh, F, Cl, Pb, Zn, Mo, W, Bi, PЗЭ не обнаружены. Аналитические линии – FeK<sub>α</sub>, AsK<sub>α</sub>, SK<sub>α</sub>, CK<sub>α</sub>, OK<sub>α</sub>, AlK<sub>α</sub>, SiK<sub>α</sub>, HgL<sub>α</sub>, AuL<sub>α</sub>, AgL<sub>α</sub>, CuK<sub>α</sub>, TiK<sub>α</sub>, PtL<sub>α</sub>, OsL<sub>α</sub>, IrL<sub>α</sub>, RuL<sub>α</sub>, UL<sub>α</sub>. Здесь: N – порядковый номер кристалла, n – порядковый номер площадки замера в кристалле; прочерк – элемент не обнаружен; цифры курсивом – содержания ниже предела обнаружения (< 0.5 мас.%), но без их учета сумма не достигает 100%; основной состав выделен жирным шрифтом

Методом ЛА-ИСП-МС изучен поверхностный слой кристаллов арсенопирита и пирита на глубину 6 мкм (глубина за один проход равна 1 мкм). Определение концентраций Ru и Os не проводилось в связи с их отсутствием в использованных нами стандартах. Уровни концентраций элементов (г/т) в поверхностных слоях арсенопирита – Pt до 5.2, Pd до 8.4, Rh до 8.9 и Ir до 0.2, в поверхностных слоях пирита – Pt до 13.1, Pd до 896.1, Rh до 6.7 и Ir до 4.1. Максимальные концентрации Pt, Pd и Ir установлены в пирите, Rh – в арсенопирите. Наиболее высокие концентрации Pt, Pd, Rh и Ir приурочены к первому поверхностному слою изученных кристаллов.

### 3 ЗОЛОТОРУДНОЕ МЕСТОРОЖДЕНИЕ ГОЛЕЦ ВЫСОЧАЙШИЙ

Методом ЛА-ИСП-МС изучен состав пиритов месторождения Голец Высочайший (Восточная Сибирь). Выделено 4 морфологических разновидности пирита, установлены их взаимоотношения (рисунок 7).



**Рисунок 7** – Морфологические разновидности пирита: а – скопление фрамбоидального пирита-I во вмещающих породах, б – зерна пирита-I и пирита-II; в – реликты пирита-I в метаагрегате пирита-III г- реликты кристаллов кубического пирита- II в агрегате пирита- III; д – метаагрегат пирита- III с включениями халькопирита, пирротина и самородного золота; е – агрегат прожилковидного выделения пирротина и кристалла пирита-IV и кайма рутила вдоль пирротина и пирита-III

Наиболее ранняя разновидность (**пирит-I**) представлена мелкими фрамбоидами пирита. Состав py-I характеризуется содержанием Au до 4.20 г/т и примесью Ni и Co. **Пирит-II** представляет собой мелкие идиоморфные кристаллы. В нем также установлена примесь Au, Ni и Co. **Пирит-III** представлен метаагрегатами вытянутой формы. В виде включений в нем

установлены включения халькопирита, пирротина, галенита, сфалерита и самородного золота. Состав пирита-III значительно отличается от более ранних разновидностей отсутствием любых примесей. **Пирит-IV** представляет собой наиболее позднюю генерацию. Та же последовательность и особенности образования пирита выявлены и на других месторождениях (Сухой Лог, Красный, Угахан, Ыкан). Это указывает на то, что формирование большинства штокверковых рудных объектов Бодайбинского района происходило в результате одних и тех же процессов, разделенных во времени, но с учетом специфики вмещающих толщ и степени метаморфизма.

#### 4 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 nano- и микровключений необычного состава; пространственное упорядочение nano- 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 nano- и микровключений.

Проведена оценка содержания Au и Pt в рудообразующем флюиде месторождений Наталка и Дегдекан по составу пирита. Используются содержание элемента в структурной форме в природном пирите и коэффициент распределения для той же формы по экспериментальным данным [1–3]. Для Au принята средняя величина  $D^{cmp}$  0.1, для Pt – 21. Максимальные содержание Au и Pt во флюидах установлены на месторождении Наталкинское, до 3.2 г/т и 3.1 г/т, соответственно (**таблица 2**). Флюид, формирующий руды Наталкинское месторождения, явно обогащен Au и Pt.

**Таблица 2** – Содержания Au и Pt в рудообразующем флюиде по составу пирита

№№ проб	Месторождение	Число кристаллов (нач.-кон. выбор)	Элемент	С <sub>стр.</sub> , г/г	С <sub>пов.</sub> , г/г	С <sup>ақ</sup> , г/г
<b>Данные 2018 г</b>						
М-163/10	Дегдекан	95-59	Au	0.21	0.53	2.1
		92-71	Pt	2.0	7.1	0.1
ДГ-10/14	То же	67-44	Au	0.13	1.1	1.3
		34-22	Pt	5.1	102	0.2
ЮВ-3/13	Наталка	80-52	Au	0.29	1.37	<b>2.9</b>
		79-52	Pt	37	189	<b>1.8</b>
<b>Данные 2019 г</b>						
М-161/10	То же	58-40	Au	0.18	3.6	1.8
		58-45	Pt	68	890	<b>3.1</b>
ТПМ-1/1	То же	43-30	Au	0.32	3.4	<b>3.2</b>
		43-33	Pt	41	462	2.0
Нат-10	То же	60-39	Au	1.8	2.7	1.8
		54-34	Pt	3.6	35	0.2

Примечание. С<sub>стр.</sub> – содержание структурной формы, С<sub>пов.</sub> – содержание поверхностно-связанной формы, С<sup>ақ</sup> – содержание в рудообразующем флюиде

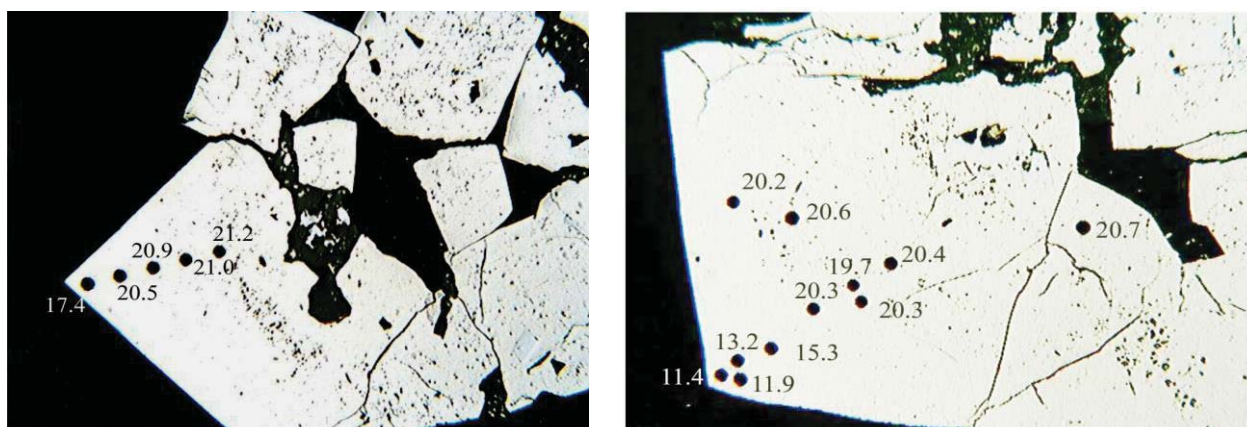
По данным минерального состава руд участка Горный Au-Ag месторождения Валунистое (Чукотка) [4] выполнена оценка физико-химических условий образования продуктивных минеральных ассоциаций на основе особенностей химического состава минералов Au и Ag и их взаимоотношений с другими минералами. Установлено, что наряду с самородным золотом Au-Ag минерализация представлена халькогенидами (ютенбогаардтитом, петровскаитом, акантитом, науманнитом, кервеллеитом) и минералами пирсеит-полибазитового ряда, находящимися в виде микровключений в мелкозернистом пирите. Показано, что рудоотложение происходило на поздних стадиях из слабокислых растворов на фоне снижения температуры от 350 до 100°C и уменьшения фугитивностей серы ( $\log fS_2$  от -2 до -23), теллура ( $\log fTe_2$  от -5 до -27) и селена ( $\log fSe_2$  от -16.5 до -28), а также изменения окислительно-восстановительных условий ( $\log fO_2$  от < -23 до < -48).



При изучении самородного золота широко использовался метод РСМА, разработанный в ИГХ СО РАН [5, 6], позволяющий изучение тонкодисперсных включений золота микронных и субмикронных размеров в сульфидных минералах. Описана процедура, позволяющая оценить состав тонкодисперсных включений, размер которых меньше, чем пространственное разрешение рентгеноспектрального микроанализа с электронным зондом. Предложена аппроксимация для оценки пространственного разрешения рентгеноспектрального микроанализа с электронным зондом в случае определения золота по L-линии. На примере анализа руд месторождения Наталкинское показано, что предлагаемый подход позволяет существенно повысить достоверность определения пробности тонкодисперсных включений золота (1-2 мкм и меньше) в сульфидных минералах.

## 5 ИЗОТОПНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Выполнен локальный анализ изотопного состава серы сульфидов руд крупнейших месторождений бодайбинского синклиория – 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 флюида (рисунок 8).



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

Отметим, что пирит рудных тел и околорудных 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.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Получены новые данные по геохимическому и минеральному составу рудорогенных золото-кварцевых месторождений Наталкинское, Дегдекан (Яно-Колымский золотоносный пояс) и эпитеермальных золото-серебряных месторождений Кварцевая Сопка, Дальнее (Охотско-Чукотский вулканогенный пояс), находящихся на территории Северо-Востока России. Впервые с помощью методов СВАДМ-ААС, фазового химического анализа, СЭМ-ЭДС и ЛА-ИСП-МС изучены особенности распределения, уровни концентрирования и ФН ЭПГ (Pt, Pd, Ru, Rh, Os, Ir) в арсенопиритах и пиритах золоторудного месторождения Наталкинское. Установлено, что арсенопириты и пириты месторождения являются концентраторами не только Au, но и платиноидов. Выявлены две ФН равномерно распределенных Au, Pt, Pd, Ru и Rh – структурная и поверхностная, соответствующие химически связанному элементу в структуре минерала и в структуре находящейся на поверхности кристалла наноразмерной неавтономной фазы (НФ). Последняя преобладает. По экспериментальным и расчетным данным проведена оценка содержания БМ (Au, Ag, Pt) в рудообразующем флюиде месторождений Наталка и Дегдекан.

При изучении 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. Дается новое объяснение таким явлениям, как отбор компонентов при росте кристалла в многофазных ассоциациях, двойственный характер коэффициентов распределения, вызванный разными свойствами объема кристалла и ПНФ; образование в минералах нано- и микровключений необычного состава; концентрирование полезных компонентов, прежде всего БМ и явление «скрытой» металлоносности, связанное с присутствием БМ в составе ПНФ или, образующихся в

результате их эволюции, поверхностных нано- и микровключений.

Рассмотрен опыт применения LA-ICP-изотопного состава S пирита и арсенопирита золоторудных месторождений Байкало-Патомского нагорья (Вост. Сибирь). Показано, что изученные образцы имеют значения  $\delta^{34}\text{S}$ ,  $\delta^{33}\text{S}$ , строго соответствующие закону масс-зависимого фракционирования изотопов S. Показаны различия в изотопном составе серы месторождений Сухой Лог и Голец Высочайший. Установлено закономерное облегчение изотопного состава S пирита по мере роста его кристаллов для Сухого Лога и изотопная гомогенность S пирита и пирротина месторождения Голец Высочайший. Сделан вывод о возможной роли метаморфизма Мамско-Оронского плутоно-метаморфического пояса в формировании изотопной гомогенности сульфидов руд.

Методом LA-ICP-MS изучен состав пиритов месторождения Голец Высочайший (Бодайбинский район, Восточная Сибирь). Выделено 4 морфологических разновидности пирита, установлены их взаимоотношения, такие же, как на других месторождениях этого региона (Сухой Лог, Красный, Угахан, Ыкан). Это указывает на то, что формирование большинства штокверковых рудных объектов Бодайбинского района происходило в результате одних и тех же процессов, разделенных во времени, но с учетом специфики вмещающих толщ и степени метаморфизма.

Научная значимость результатов, полученных в 2018-2019 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.
4. Журавкова Т.В., Пальянова Г. А, Калинин Ю. А., Горячев Н. А., Зинина В. Ю., Житова Л. М. Новые данные об условиях образования минералов золота и серебра месторождения Валунистое (Чукотка) // Геология и геофизика. – 2019. – Т. 60. – № 11. – С. 1247–1256.
5. Татаринов В.В., Финкельштейн А.Л., Кравцова Р.Г., Павлова Л.А. Определение состава микровключений самородного золота в матрице сульфидного минерала при рентгеноспектральном электронно-зондовом микроанализе // Аналитика и контроль. – 2017. – Т. 21. – № 3. – С. 208-215.
6. Alexander L. Finkelshtein, Vasiliy V. Tatarinov, Evgeniya Finkelstein, Ludmila A. Pavlova, Raisa G. Kravtsova. About the assessment of gold concentrations in tiny inclusions within sulfide mineral matrix: An electron microprobe study // X-Ray Spectrometry.– 2018. – V. 47. – Issue 6. – P. 423-431.

## 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.

4. 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 Синклинория (Восточная Сибирь) // Доклады Академии наук, 2019, Т. 484, № 4, С. 460-463.

5. Горячев Н.А. Месторождения золота в истории Земли // Геология рудных месторождений, 2019, Т. 64, № 6, с. 3-18.

6. Татаринцов В.В. Оценка локальности рентгеноспектрального электронно-зондового микроанализа при определении состава тонкодисперсных включений самородного золота в гомогенной сульфидной матрице // Двадцатая международная конференция «Физико-химические и петрофизические исследования в науках о Земле», Москва, 23-25, Борок, 27 сен. 2019: Материалы конф. – М.: ИГЕМ РАН, ФГУП «Издательство «Наука», 2019. – С. 324-327.

7. Кравцова Р.Г., Таусон В.Л., Горячев Н.А., Макшаков А.С., Арсентьев К.Ю., Липко С.В. Изучение поверхности арсенопирита и пирита на золоторудном месторождении Наталкинское (Северо-Восток России) методом сканирующей электронной микроскопии // Геохимия, 2020, № 5.