

РАЗРАБОТКА И ЭКСПЛУАТАЦИЯ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

УДК: 553.411-022.53(4/5)

ИССЛЕДОВАНИЯ МИКРОФОРМ КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ БЛАГОРОДНЫХ МЕТАЛЛОВ В ЗОЛОТОРУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЯХ ЕВРАЗИИ

© Кузнецов Ю.А.¹, Дубков А.А.², Калиниченко В.Н.³, Жабин А.В.⁴, Варфоломеев С.Д.³

1 - ООО «РГ Иркутскгеофизика 3» г. Иркутск

2 - ФГБУ ВНИГНИ, г. Москва

3 - ИБХФ РАН, г. Москва

4- ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет», г. Воронеж

DOI:10.24412/1997-8316-2023-111-27-37

Аннотация: исследованы образцы руд 29-ти золоторудных месторождений Евразии, измельченные до класса «менее 5 микрон». Определен их минеральный и элементный состав методами оптической микроскопии, электронной микроскопии и рентгенофазовой дифрактометрии. Для всех исследованных объектов установлено наличие соединений золота, серебра и платиноидов. Выявлено, что нольвалентные формы благородных металлов, представленных в микроформах, не являются преобладающими в исследованных образцах, независимо от генетического типа золоторудных месторождений. Доказано, что нольвалентные формы платиноидов в золоторудных месторождениях встречаются чаще, чем аналогичные формы золота. Мир малоразмерных минеральных частиц в породах золоторудных месторождений оказался более многообразным, чем представлялось на утилитарном уровне.

Ключевые слова: золоторудные месторождения Евразии, состав микроразмерных частиц, электронная микроскопия, рентгеноструктурный анализ, минеральные формы благородных металлов.

E-mail: zhabin01@gmail.com

STUDIES OF MICROFORM OF CRYSTALLINE COMPOUNDS OF NOBLE METALS IN GOLD DEPOSITS OF EURASIA

© Kuznetsov Yu.¹, Dubkov A.², Kalinichenko V.³, Zhabin A.⁴, Varfolomeev S.³

1 - LLC "RG Irkutskgeofizika 3", Irkutsk

2 - FGBU VNIGNI, Moscow

3 - IBCP RAS, Moscow

4- Voronezh State University, Voronezh

Abstract: the samples of ores from 29 gold ore deposits of Eurasia crushed to the class "Less than 5 microns" were studied. Their mineral and elemental composition was determined by optical microscopy, electron microscopy, and X-ray phase diffractometry. The presence of compounds of gold, silver and platinoids was established for all studied objects. It has been established that

"zero valent" forms of noble metals, presented in "micro" forms, are not predominant in the studied samples, regardless of the genetic type of gold deposits. It has been established that "zero valent" forms of platinoids in gold deposits are more common than "zero valent" forms of gold. The variety of small-sized mineral forms of noble metals in the rocks of gold deposits turned out to be more significant than it seemed at the utilitarian level.

Key words: gold deposits of Eurasia, composition of microsized particles of gold deposits, electron microscopy, X-ray diffraction analysis, mineral forms of noble metals.

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы всё более возрастает интерес исследователей к минеральным объектам ультрадисперсного и наноразмерного состояния, зафиксированным в составе минерального сырья и техногенных продуктов промышленного передела. В первую очередь это связано с резким уменьшением запасов самородных крупноразмерных и легкоизвлекаемых минеральных форм благородных металлов, элементов платиновой группы (ЭПГ) и редкоземельных элементов.

Научной основой такого интереса послужил гениальный вывод Петровской Н.В., сделанный ею более чем полвека назад: «Частицы тонкодисперсного золота (0,5-10 мкм) распространены значительно более широко, чем видимые золотины. Вероятно, не будет преувеличением утверждать, что эта форма самородного золота в эндогенных месторождениях является универсально распространенной. Соответственно, велики общие количества «распыленного» золота» [7].

Известно, что такое коллоидное и тонкодисперсное золото практически не амальгируется, не цианируется и тем более не извлекается методами гравитационного обогащения. Это относится к минеральным микроформам ЭПГ.

В настоящей работе подводится итог многолетних исследований микро- и наноминеральных форм благородных элементов, начатый ещё под руководством члена-корреспондента РАН Сахно В.Г. [6, 8, 9, 10, 11] и продолженный инициативной группой исследователей [1, 2, 3, 4, 5]. Заказчиком

данных исследований является ООО «РГ Иркутскгеофизика 3», исполнителем – лаборатория ИБХФ РАН под руководством члена-корреспондента РАН Варфоломеева С.Д.

МАТЕРИАЛЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Материалами исследований послужили образцы из рудных интервалов 29-ти золоторудных месторождений и рудопроявлений с установленным промышленным содержанием золота, зафиксированным пробир-



Рис. 1. Рабочая лабораторная модель планетарной мельницы (3-5 тысяч оборотов в минуту)

ным анализом и подтвержденным методами рентгенофлуоресцентного анализа, оптико-эмиссионной спектроскопии с индуктивно-связанной плазмой (ИСП-ОЭС), спектроскопией ядерно-магнитного резонанса. Исследованные объекты охватывают практически все известные промышленные типы золоторудных месторождений: золотой, серебряно-золотой, золото-сульфидный в углеродистых сланцах, золото-кварцевый, полиметалльно-золотой, золото-волластонитовый.

ПРОБОПОДГОТОВКА

После дробления на щёковой дробилке и расситовки до класса «менее 0,5 мм» весь материал фракции просматривался на бинокулярном микроскопе на предмет гарантированного визуального отсутствия макроминеральных форм золота и платиноидов. Дальнейшая пробоподготовка для исследования именно ультра-тонкодисперсных и, возможно, наноминеральных форм про-

водилась на планетарной мельнице улучшенной конструкции (рис. 1).

Как было установлено в результате многолетних исследований, данный процесс механического измельчения не ведёт к изменению минерального состава породообразующих минералов и минеральных форм благородных металлов. При обработке пробы гранулометрического состава менее 0,5 мм в течение 2-х минут гарантированно достигается измельчение породы до класса менее 10 микрон, сопоставимого с размером изучаемых минеральных форм благородных элементов (рис. 2). В некоторых случаях, когда нам требовалось измельчение до субмикронного уровня, время измельчения увеличивалось в несколько раз (рис. 3, 4).

Масса загружаемой в планетарную мельницу породы составляла 0,3-0,5 кг. Таким образом, для всех видов применяемых нами анализов гарантированно обеспечивалась однородность исследуемого материала. Часть

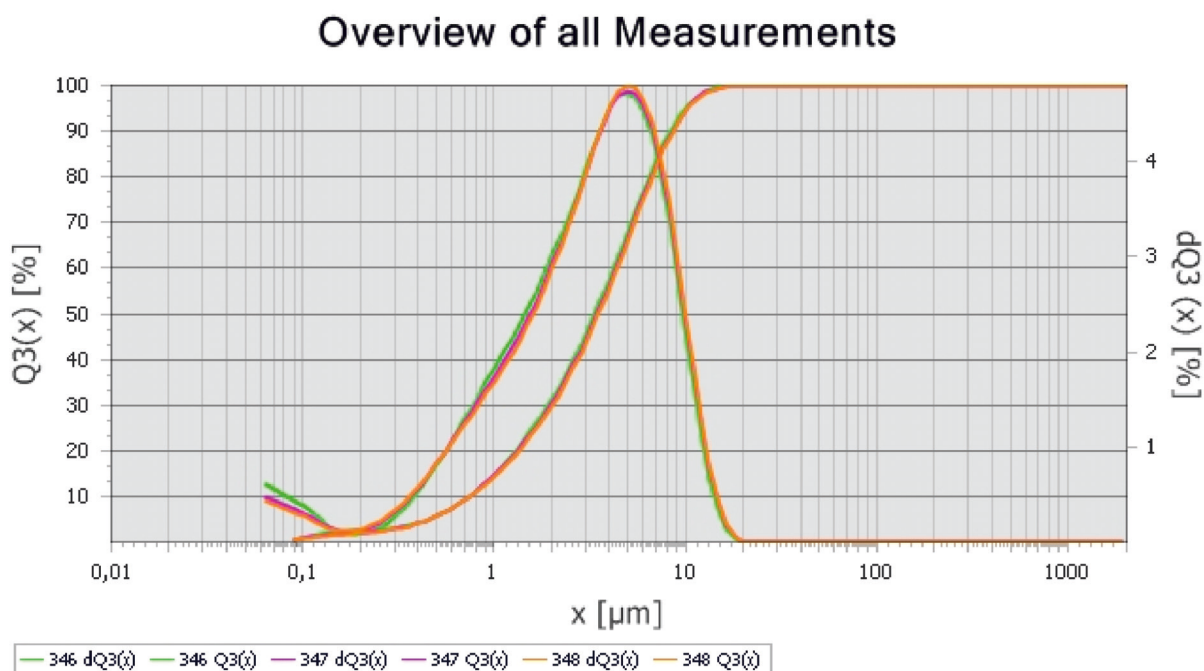


Рис. 2. Распределение размеров частиц после обработки пробы в течение 2-х минут на планетарной мельнице. Значение моды измельчённой пробы – 4,88 микрон. Небольшой экстремум в левой части снимка показывает наличие частиц уже субмикронной размерности. Месторождение Павлик. Материал пробы – углеродистые малосульфидные кристаллические сланцы рудной зоны

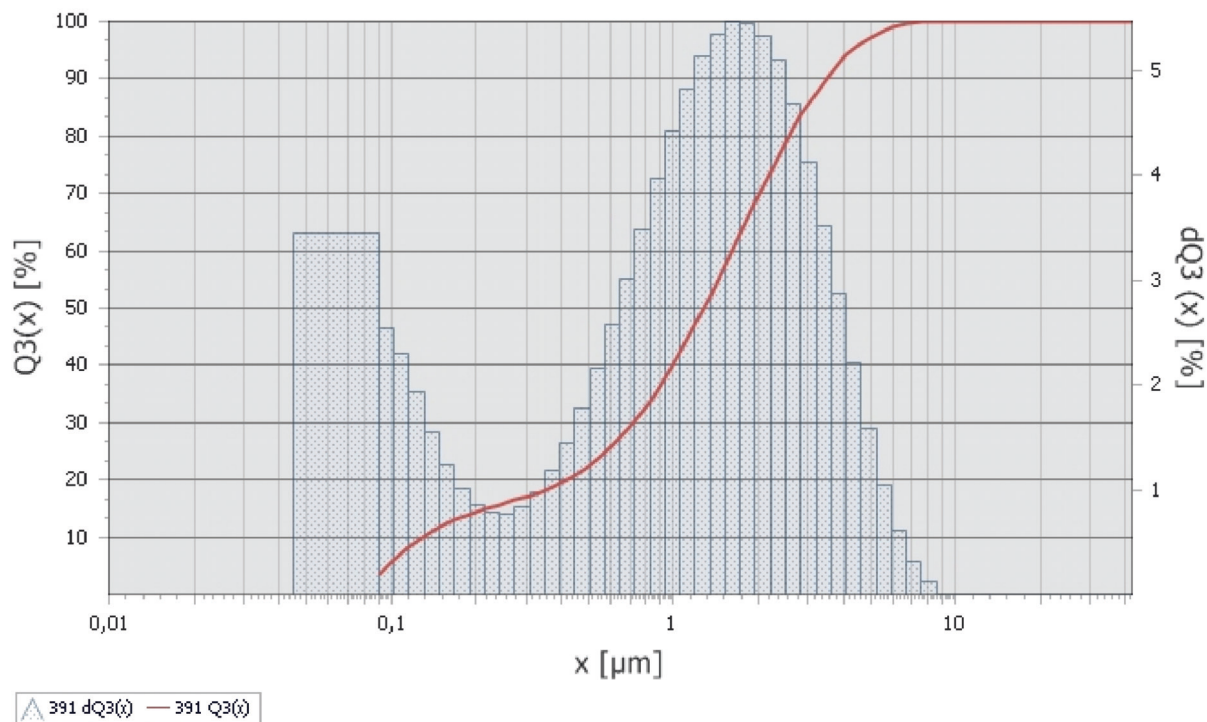


Рис. 3. Распределение размеров частиц после обработки пробы в течение 5-ти минут на планетарной мельнице. Значение моды измельчённой пробы – 0,90 микрон. Видно наличие значительного количества частиц субмикронного размера. Месторождение Хлебопёк. Материал пробы – пириты с повышенным содержанием благородных элементов

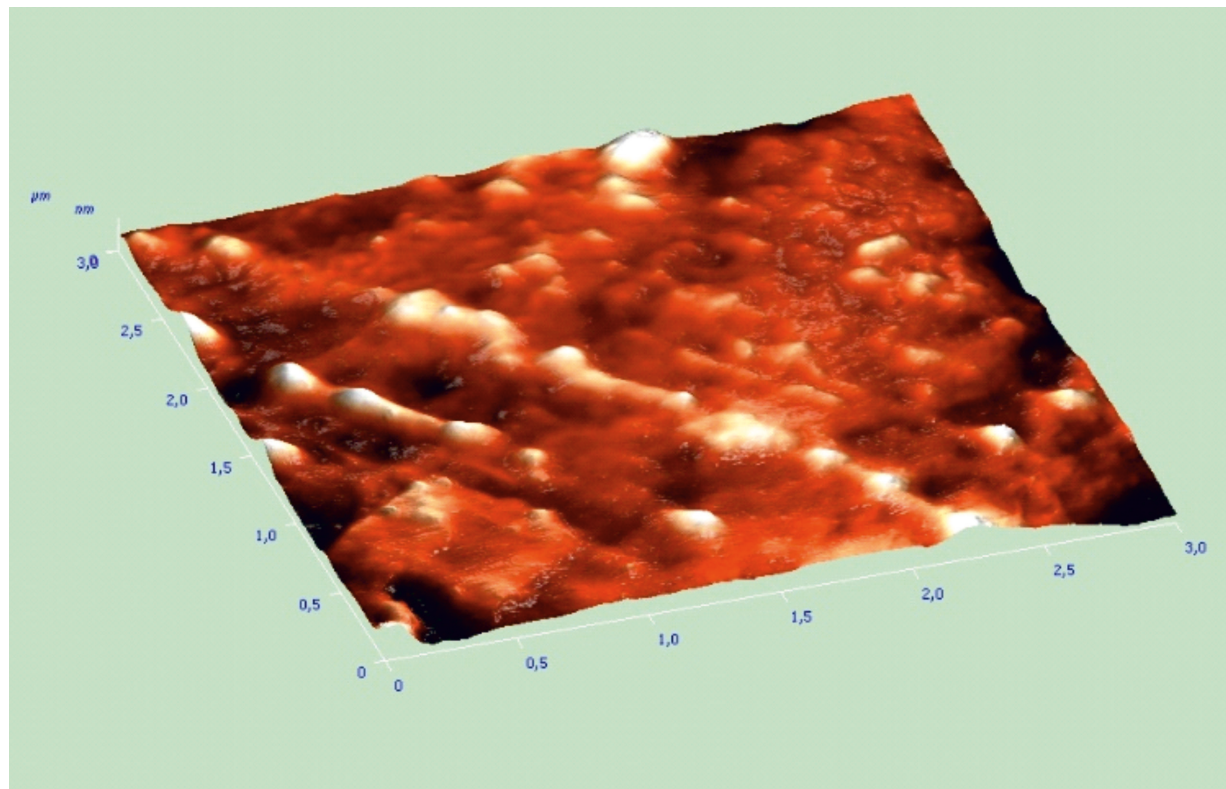


Рис. 4. Фромбоидальные выделения палладия и других платиноидов в зонах дислокации пирита. Поле зрения силового микроскопа 3x3 микрона. Месторождение Хлебопёк

исходного материала проб сохранялась для последующих исследований.

ПРИБОРНАЯ БАЗА ИССЛЕДОВАНИЙ

После обработки проб на механической планетарной мельнице в первую очередь осуществлялся гранулометрический контроль на лазерном измерителе частиц *Bettersizer 2600-WD* (ФРГ). Данные пробирного анализа предоставлялись аккредитованными лабораториями по нашему заказу.

Морфология и элементный состав соединений благородных элементов в исследованных образцах изучались методами сканирующей электронной микроскопии (СЭМ-ЭДС), силовой электронной микроскопии на электронных микроскопах различных марок и производителей («HitachiTM-1000», «JSM-

6380LV JEOL», «Tescan Vega 3», «Prisma E» и др.). Чаще всего элементный состав исследовался рентгенофлуорисцентным методом анализа на приборах *Schimaizu* (Япония) и *Vega 400* (Израиль). Дополнительно наличие благородных и редких элементов в кварц-полевошпатовых жилах подтверждалось методом ядрено-магнитного резонанса (табл. 1), оптико-эмиссионной спектроскопией с индуктивно-связанной плазмой и другими методами. Для извлечения и «самосборки» ультратонкодисперсных частиц (в частности платины и золота) в макроформы использовались газовые центрифуги, предназначенные для разделения изотопов (рис. 5), а в случае ультратонкодисперсного золота – установки лазерной агломерации для извлечения так называемого плывущего золота (рис. 6, 7).

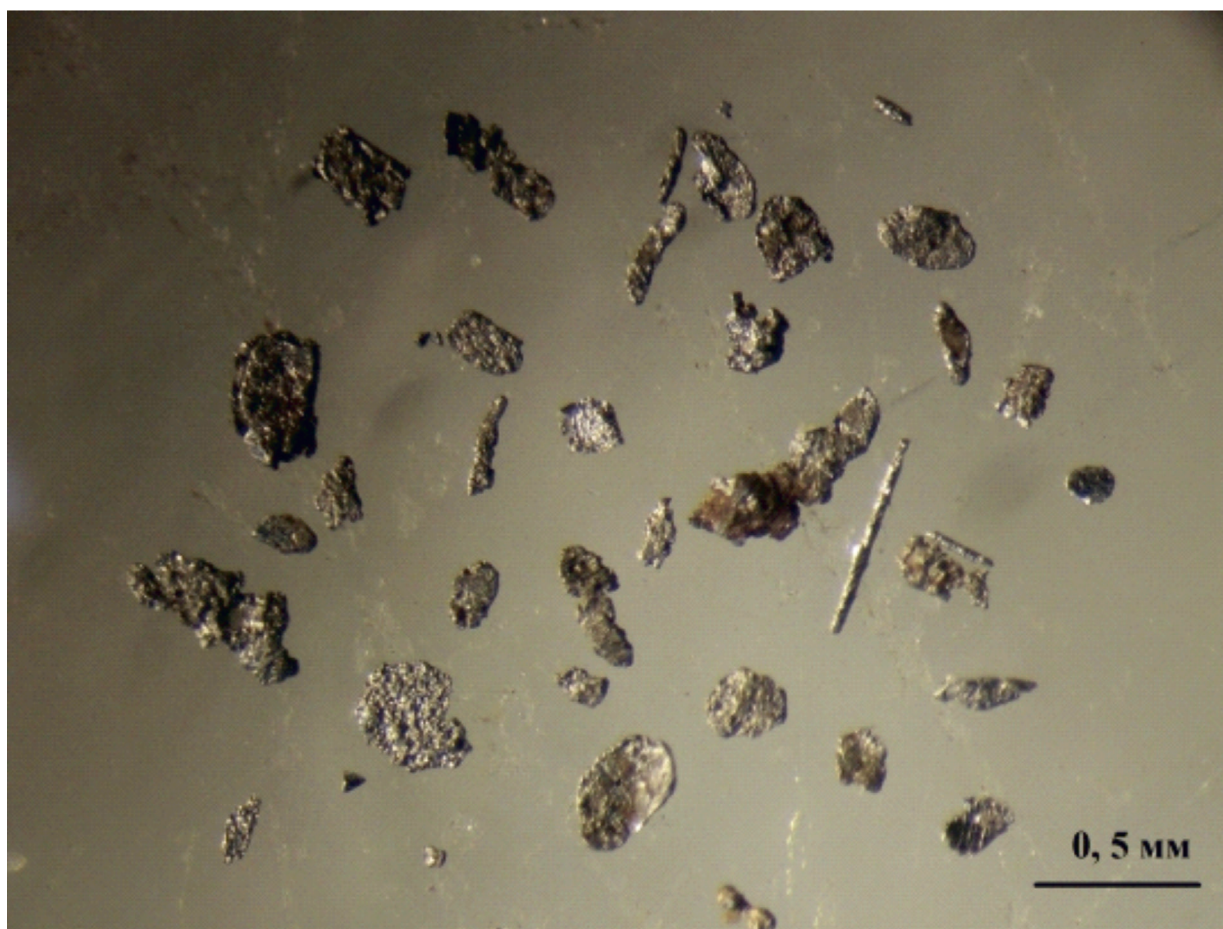


Рис. 5. Частички платины из руды золотосеребряного рудопроявления Милоградovo, образованные в результате их «самосборки» в газовой центрифуге из бесчисленного количества наночастиц, находящихся в руде [6]

Таким примером визуально подтверждается наличие в горных породах значительного количества мелкодисперсного золота, пригодного для извлечения более совершенными методами. Минеральный состав образцов во многих случаях дополнительно изучался с помощью рентгенофазовой дифрактометрии, которая является единственным прямым методом для определения состава минеральных фаз микро- и нанодисперсных частиц, имеющих кристаллическую структуру, поскольку оперирует параметрами единичной кристаллической ячейки. Её размеры являются константой для данных соединений.

В публикациях [3, 4, 6, 8, 10] детально описаны применяемые нами методы исследования, приборы, физические принципы работы и полученные результаты. В частности, описаны методики совместного применения методов электронной микроскопии и рентгенофазовой дифрактометрии. Данный вид анализа проводился с использованием программного комплекса «Oxford Crystallographica search match». При этом кристаллические фазы более чем 457-ми тысяч неорганических соединений, входящих в международную базу этого прибора, сравнивались данным программным ком-



Рис. 6. Концентрат «плывущего» золота перед его обработкой методом лазерной агломерации. Для фракции характерна значительная примесь теллура (Au -72,37%, Te – 27,23% с незначительной примесью меди). Месторождение Петух

Таблица 1.
Содержание Au, Pt, Re и Ag в геологических образцах рудопроявления Милоградово.

Образец	Au	Pt	Re	Ag
582 28-12	$(1,01 \pm 0,01) 10^{-4}$	$(4 \pm 1) 10^{-5}$	$(7,6 \pm 1,2) 10^{-6}$	$(1,99 \pm 0,4) 10^{-3}$
582 29-12	$(8,21 \pm 0,12) 10^{-6}$	$(5,30 \pm 1) 10^{-5}$	$(4,01 \pm 0,19) 10^{-6}$	$(3,7 \pm 0,7) 10^{-4}$
583 15-12	$(1,75 \pm 0,2) 10^{-6}$	$(1,72 \pm 0,2) 10^{-4}$	$(7,7 \pm 1,9) 10^{-7}$	$(9,1 \pm 1,4) 10^{-5}$
583 16-12	$(1,72 \pm 0,31) 10^{-6}$	$(4,7 \pm 1,1) 10^{-4}$	$(5,5 \pm 1,2) 10^{-7}$	$(7,2 \pm 0,8) 10^{-5}$
583 65-12	$(5,94 \pm 0,05) 10^{-5}$	$(7,21 \pm 0,21) 10^{-4}$	$(2,3 \pm 0,6) 10^{-6}$	$(2,2 \pm 0,4) 10^{-3}$
583 66-12	$(2,26 \pm 0,01) 10^{-4}$	$(1,34 \pm 0,17) 10^{-3}$	$(4,1 \pm 0,9) 10^{-6}$	$(6,3 \pm 0,1) 10^{-3}$
583 66-13	$(4,05 \pm 0,4) 10^{-4}$		$(2,6 \pm 0,5) 10^{-6}$	$(1,5 \pm 0,3) 10^{-2}$
583 67-13	$(6,38 \pm 0,48) 10^{-4}$	$(1,27 \pm 0,15) 10^{-3}$	$(4,1 \pm 1) 10^{-6}$	$(3,5 \pm 0,7) 10^{-2}$
583 80-12	$(8,01 \pm 0,04) 10^{-4}$	$(9,65 \pm 0,95) 10^{-4}$	$(3,4 \pm 0,1) 10^{-5}$	$(3,7 \pm 0,4) 10^{-2}$
583 80-13	$(1,03 \pm 0,02) 10^{-3}$	$(9,76 \pm 0,63) 10^{-4}$	$(2,6 \pm 0,8) 10^{-6}$	$(3,6 \pm 0,5) 10^{-2}$

Время облучения образцов – 2 часа общим потоком нейтронов, время выдержки после облучения 1, 3 и 15 дней.

Регистрацию спектров гамма-излучения проводили спектром гамма-излучения Lunx в комплекте с HPGe детектором GC2018, Canberra USA. Свидетельство о поверке спектрометра №03-0544 12 от 17 октября 2014г.

плексом с полученными кристаллографическими характеристиками наших проб. Количественный рентгенофазовый анализ по методу Ритвельда производился с использованием программного обеспечения «Siroquant Sietronics PtyLtd». Конечным результатом качественной и количественной обработки полученных данных являются таблицы кристаллических фаз. Пример одной из них приведён в таблице 2, где кристаллические фазы благородных элементов и рения выделены курсивом. Недостатком этого метода является невозможность определения аморфных фаз и фаз, отсутствующих в библиотеке прибора. Поэтому метод всегда даёт несколько завышенные количественные оценки.

ОБСУЖДЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Поскольку исследованные нами пробы были гарантированно измельчены до размеров менее 10 микрон, изученные кристаллические фазы относятся к объектам «микро» класса. Состав кристаллических фаз изучался методом рентгенофазовой дифрактометрии только после проведения гранулометрического анализа каждой пробы. Данные результатов исследования отдельных проб сведены в таблицу 3. В ней показан химический состав кристаллических фаз, содержащих только золото, серебро, золото с серебром и платиноиды. В левой части таблицы даны названия исследованных золоторудных объектов, в правой – химический

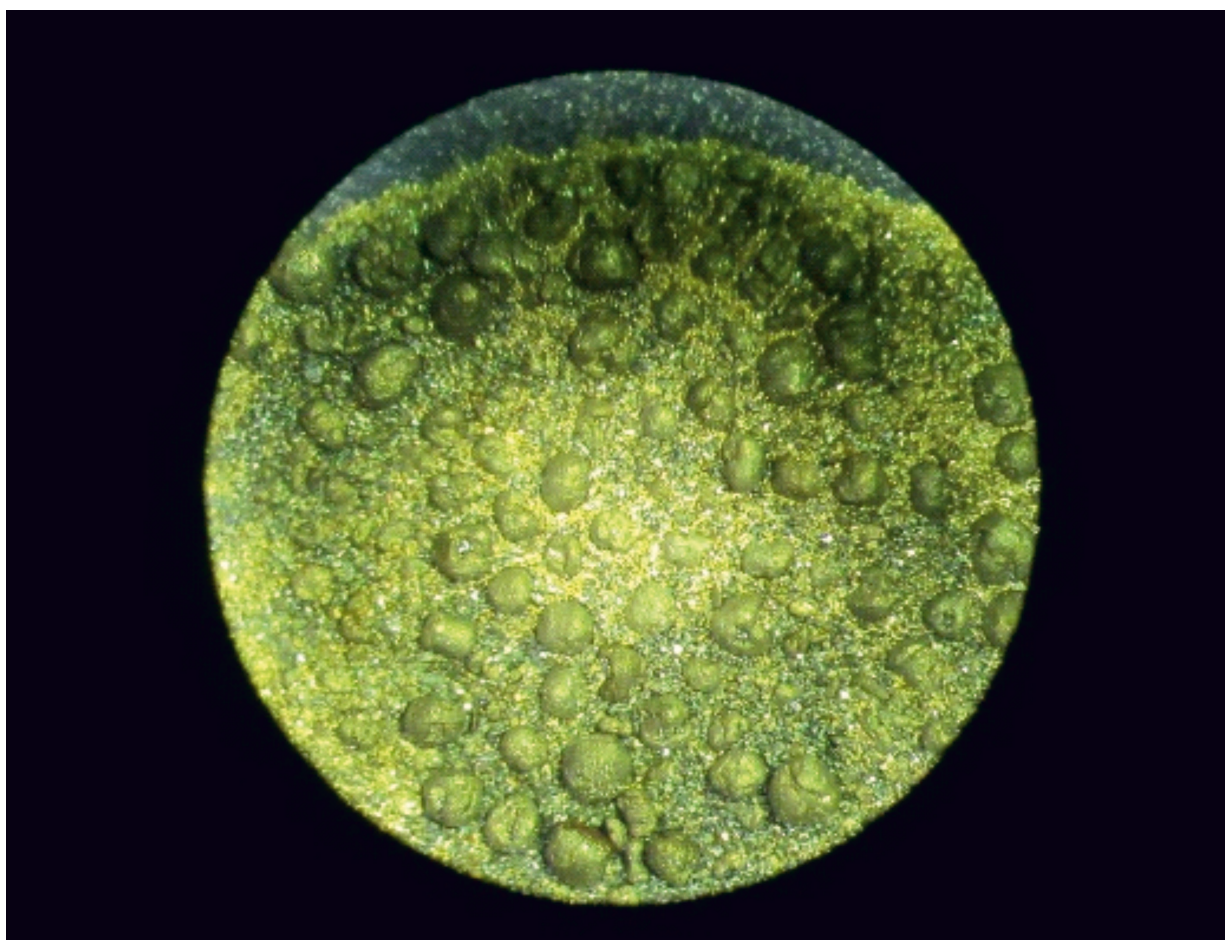


Рис. 7. Частички золота высокой пробы (98,23%), «самособранные» из концентрата «пльвущего золота» с помощью метода лазерной агломерации на основе установки И.В. Храпова [12]. Месторождение Петух. Натуральная величина. Микроскоп Olympus Sx33.

Таблица 2.
Относительный состав кристаллических фаз золотосеребряного месторождения Милоградovo. Концентрат тяжёлой фракции. Технологическая проба K108/193. Вес пробы 958 кг (известные минеральные формы выделены жирным шрифтом, кристаллические фазы, не имеющие минералогических названий, выделены курсивом).

Кристаллическая фаза	Содержание материала фазы в пробе, %	Ошибка определения, Σ
Cerussite (PbCO₃)	33,6	0,84
Acanthite (Silver Sulphide, low)	18	0,65
Stishovite (SiO₂ tetragonal)	10,8	1,45
Acanthite (Silver sulphide beta 186°)	4,4	0,96
Hematite (Fe₂O₃)	3,9	0,66
<i>Osmium ditelluride</i>	2,7	0,22
<i>Rhenium arsenide</i>	2,2	0,24
<i>Re₃O₁₀</i>	2,2	0,52
<i>Mo Re K₃O₈</i>	2,1	0,33
Osmium	1,8	0,13
<i>Palladium fluoride</i>	1,7	0,26
<i>Ir₂P</i>	1,5	0,13
<i>Rhodium disulphide</i>	1,5	0,36
Silver oxide	1,4	0,2
Krennerite (Ag Au Te₂)	1,2	0,32
<i>Palladium difluoride</i>	1,1	0,31
Wulfenite (Pb[M₆O₄])	1,1	0,16
<i>Rhodium telluride</i>	1	0,25
<i>Gold antimonide</i>	1	0,21
<i>Ir Sb₃</i>	0,9	0,23
Cuproiridsite (CuIr₂S₄)	0,8	0,19
Hocartite (Ag₂FeSnS₄)	0,8	0,25
<i>Platinum disulphide</i>	0,7	0,15
<i>Cu₃Pd</i>	0,7	0,44
Reniite (ReS₂)	0,6	0,2
<i>Platinum ditelluride</i>	0,6	0,17
<i>Platinum diantimonide</i>	0,6	0,22
Iridium	0,4	0,13
<i>Re Si₂</i>	0,4	0,25
<i>Re₆Li₄S₁₁</i>	0,3	0,13

состав кристаллических фаз. Нольвалентные фазы благородных металлов выделены подчеркиванием. Фазы в колонках расположены слева направо, по степени убывания их процентных содержаний в пробе. Значения, находящиеся правее, всегда имеют меньшие процентные содержания.

Приведенные в таблице 3 данные говорят о том, что нольвалентные, условно самородные формы благородных элементов, представленные в породах в виде микроформ, не являются превалирующими, независимо от генетического типа золоторудных месторождений. Большинство применяемых в настоящее время технологических регламентов выделения благородных металлов настроены на извлечение нольвалентных форм, не затрагивая иные формы.

Как правило, в золоторудных месторождениях присутствуют разнообразные кристаллические формы платиноидов. Нольвалентные формы платиноидов в золоторудных месторождениях встречаются даже несколько чаще, чем нольвалентные формы золота. При изучении многих сотен серебряносодержащих проб собственно самородная форма золота была отмечена лишь три раза. Для соединений, содержащих одновременно Au и Ag, это ещё более характерно. В микро- и наноформах нольвалентная форма была встречена лишь на золотосеребряном рудопроявлении Милоградovo и месторождениях Купол и Валунистое.

Интересным является факт довольно частой встречаемости в микро- и наноминеральных формах серебра минералов литохлебита Ag₂PbBi₄Se₈ и окартита Ag₂FeSnS₄, тогда как в макроминеральных формах это случается крайне редко.

Многие из зафиксированных кристаллических фаз благородных элементов не имеют присвоенных минералогических названий, хотя их кристаллографические характеристики находятся в базе прибора как давно синтезированные для технических целей. Трудности их обнаружения традиционными минералогическими методами

Таблица 3.
Основные соединения благородных металлов в исследованных месторождениях

№	Название объекта	Соединения Au	Соединения Ag	Соединения Ag+Au	Соединения платиноидов
1	Сентябрьское	<u>AuSb₃</u>	–	AgAuTe ₂	AsMnRu, RhSe ₂ , PtAs ₂ , RhO ₂ , <u>CuIr</u> , MoRhO ₆
2	Купол	<u>AuSb₃</u> , AuCuSe ₄ , <u>AuCu</u>	Ag ₂ S, Ag ₂ FeSnS ₄ , AgF	AgAuTe ₂ , AgAuTe ₄ , <u>AuAg</u>	RhSe ₂ , <u>Cu₃Pd</u> , AsNiRh, AsCrPd, <u>RhSn</u>
3	Валунистое	AuCuSe ₄	Ag ₂ SO ₄	AgAuTe ₂ , <u>AuAg</u>	PdF, RtO ₂ , PdAs ₂ , PdTe ₂
4	Среднеканское	<u>AuSb₃</u>	Ag ₂ CO ₃	AgAuF ₄ , AgAuTe ₂	RhSe ₂ , RtSe ₂ , PtO ₂ , <u>IrSb₃</u> , RhTe
5	Петух	AuTe ₂ , <u>AuSb₃</u>	Ag ₃ O ₄	AgAuF ₄ , AgAuTe ₄	–
6	Павлик	AuTe ₂ , <u>AuSb₃</u>	Ag ₂ S, AgF, AgCl, Ag ₂ Bi ₄ PbSe ₈	AgAu ₂ F ₈ , AgAuTe ₄	MoRhO ₆ , IrSe ₂ , <u>Cu₃Pd</u> , PdF ₂ , Pt ₂ B
7	Арик	AuCuSe ₄ , <u>AuHg</u> , Au ₂ O ₃	Ag ₂ O ₃ , Ag ₃ O ₄ , Ag ₂ S	AgAuTe ₂	MoRh ₂ O ₆ , IrSe ₂ , PtO ₂ , <u>Cu₃Pd</u> , RhSe ₂ , RhCuO ₂ , PdF, <u>RhSn</u> , <u>PtBi</u>
8	Аметистовое	–	Ag ₂ S	AgAuTe ₄	RhSe ₂ , <u>Cu₃Pd</u> , RhO ₂
9	Агинское	<u>AuSb₃</u> , AuTe ₂	Ag ₂ S	–	MoRhO ₆
10	Шануч	AuTe ₂ , <u>Au₃Cu</u>	–	AgAuTe ₄	IrAs ₃ , PtO ₂ , PtSe ₂
11	Многовершинное	–	Ag ₂ S, <u>Ag</u> , Ag ₃ O ₄ , Ag ₂ Te	–	IrAs ₃ , <u>Ir</u> , PdF ₂ , <u>PdSn</u> , MoRhO ₆ , <u>PbPd₂</u> , <u>RhBi</u> , <u>CuIr</u>
12	Кумирное	–	Ag ₃ O ₄	AgAuF ₄ , AgAuTe ₄	<u>Cu₃Pd</u> , PtS ₂ , PdF ₂ , CaIrO ₃
13	Милоградское	<u>AuSb₃</u> , AuTe ₂ , <u>AuPb</u>	Ag ₂ SO ₄ , Ag ₂ S, AgF, AgCuSe, Ag ₃ O ₄ , AgCl, Ag ₂ Bi ₄ PbSe ₈	AgAuTe ₂ , AgAuTe ₄ , <u>AuAg</u>	RhS ₂ , MoRhO ₆ , RhTe, PdF, <u>CuIr</u> , <u>Os</u> , OsTe ₂ , <u>IrSb₃</u> , PdF ₂ , PdS ₂ , OsS ₂ , CuIr ₂ S ₄ , IrSe ₂ , OsSe ₂ , OsS ₂ , AsOsPd, RhTe ₂ , IrO ₂ , PtP ₂ , Ir ₂ P, <u>Ir</u>
14	Глухое	<u>AuSb₃</u> , AuTe ₂	–	AgAu ₂ F ₈ , AgAuF ₄	CaIrO ₃ , RhTe, RhS ₂ , PtTe ₂ , PdTe ₂ , PtS ₂ , PdF
15	Малиновское	AuCuSe ₄	–	AgAu ₂ F ₈	RhSe ₂ , IrSe ₂ , PdF, AsMnRu, PtPb ₂ O ₄ , RhO ₂ , AsCrPd, PtPb ₂ O ₄ , <u>IrSb₃</u> , <u>CuIr</u> , CuIr ₂ S ₄
16	Намовское	AuTe ₂	AgF, Ag ₃ O ₄	AgAuF ₄ , AgAu ₂ F ₈	RuSe ₂ , <u>CuIr</u> , PdF ₂ , RuO, PtPbO ₄ , <u>IrSb₂</u> , <u>IrSb₃</u>
17	Конторское	–	Ag ₂ S	–	AsCrPd, PdF, PtPbO ₄ , RhSe ₂
18	Круты	AuCuSe ₄ , AuAs, Au ₂ O ₃ , <u>AuSn</u>	Ag ₂ S, Ag ₃ O ₄	AgAuTe ₂	RuS ₂ , RhCuO ₂ , PdAs ₂ , <u>PtBi₂</u> , IrSe ₂ , MoRh ₂ O ₆ , IrAs ₃ , OsO ₂ , AsCrPd, PtPbO ₄ , PdTe, <u>FePt</u> , <u>CuIr</u>
19	Карийское	Au ₂ O ₃ , AuTe ₂ , <u>AuAl</u>	AgCl, Ag ₂ S, <u>Ag</u>	AgAuTe ₂ , AgAuTe ₄ , AgAuF ₄ , AgAu ₂ F ₈	RhSe ₂ , AsMnRu, RuSe ₂ , <u>FePt</u> , IrAs ₃ , <u>IrSb₃</u> , <u>RhBi</u> , PtO ₂ , <u>PbPd₂</u> , <u>PtSn</u> , PdF ₂ , RhS ₂ , IrTe ₂ , <u>Cu₃Pd</u> , CaIrO ₃ , PdAs ₂ , <u>PdSb</u> , MoRh ₂ O ₆
20	Букукинское	<u>AuCu</u>	Ag ₂ S, AgF	–	AsMnRu, CaIrO ₃ , PtAs ₂ , PtAl, OsSe ₂ , MoRhO ₆ , <u>RhSn</u> , <u>IrSb</u>
21	Ю.Челотуй	AuCuSe ₄ , AuTe ₂	–	AgAu ₂ F ₈ , AgAuF ₄	PdF ₂ , <u>Cu₃Pd</u>
22	Сейбинское	–	AgBr, Ag ₂ Bi ₄ PbSe ₈	AgAu ₂ F ₈ , AgAuF ₄ , AgAuTe ₂	PdAs ₂ , RhSe ₂ , PtTe ₂ , AsNiRh, PtPbO ₄ , <u>Cu₃Pd</u> , Ir ₂ P, OsS ₂
23	Сухой Лог	AuTe ₂ , <u>AuSb₃</u> , AuCuSe ₄	Ag ₂ S, Ag ₃ O ₄ , Ag ₂ FeSnS ₄	AgAuTe ₄ , AgAuTe ₂ , AgAu ₂ F ₈	RhSe ₂ , RhS ₂ , PdTe ₂ , <u>RhBi</u> , RuO ₂ , AsVRu, RhO ₂ , <u>PtBi</u>
24	Хлебопёк	AuCuSe ₄ , AuTe ₂ , <u>AuHg</u>	Ag ₂ S, Ag ₃ O ₄ , Ag ₂ SO ₄	AgAuTe ₂ , AgAuTe ₄ , AgAuF ₄ , Au ₂ F ₈	AsCrPd, IrTe ₂ , MoRh ₂ O ₆ , IrAs ₃ , RhS ₂ , RhSe ₂ , OsS ₂
25	Тарын	Au ₂ O ₃ , <u>AuAl</u> , <u>AuGa</u> , <u>AuMg</u>	Ag ₂ S, Ag ₂ CO ₃ , AgJ, AgCd, Ag ₂ O ₃	–	RhSe ₂ , PtP ₂ , RhO ₂
26	Ю.Кировский	AuTe ₂	Ag ₂ S	AgAu ₂ F ₈	<u>Cu₃Pd</u>
27	Карабаш	<u>AuSb₃</u> , <u>AuAl</u>	Ag ₂ S	–	AsMnRu, RuSe ₂ , PdF, PtSe ₂ , OsTe ₂
28	Макмал	<u>AuSb₃</u> , Au ₂ O ₃ , <u>AuMg</u>	AgI, Ag ₃ O ₄ , Ag ₂ SO ₄	–	MoRh ₂ O ₆ , IrTe ₂ , PtSe ₂ , PdF, AsNiRh, PdTe ₂ , PdAs ₂ , RhSe ₂
29	Ловозеро	<u>AuCu</u>	Ag ₂ Bi ₄ PbSe ₈ , AgBr	AgAuTe ₄	<u>Cu₃Pd</u> , <u>Fe₃Pd</u> , PtB, PdAs ₂ , CuO ₂ Rh, OsSe ₂ , PtP ₂ , <u>PtSb</u>

имеют множество причин. Так, многие из них обладают низкой твёрдостью и даже растворимы в воде, как, например, фтораураты серебра. В силу неумолимых законов оптики мельчайшие размеры кристаллических форм не позволяют однозначно идентифицировать их даже с помощью самых совершенных ЭДС электронных микроскопов, поскольку в любом случае мы будем иметь, как ненужное дополнение, элементный состав матрицы, окружающей частицу. Некоторые крупные частицы размерами более 10 микрон (теллуриды золота и серебра, фтораураты и селениды золота) были нами найдены и идентифицированы после фиксации их наличия в изучаемой пробе рентгенофазовым методом [11-12].

Судя по полученным данным, наличие малоизвестных микроминеральных форм драгоценных металлов в породах достаточно велико и зачастую может превышать количество известных минеральных форм. Это надо принять как объективную реальность, которую ещё полвека назад предрекала Н.В. Петровская. Вероятнее всего, именно из более сложных по составу благородных элементов при благоприятном стечении геологических процессов образуются их нольвалентные формы.

ВЫВОДЫ

- Действующие технологические схемы по извлечению благородных металлов ориентированы в основном на извлечение их нольвалентных форм, никак не затрагивая их значительную сложносоставную и микроразмерную долю, заключённую в окружающую матрицу.
- Мир малоразмерных минеральных частиц в породах золоторудных месторождений более многообразен, чем нам представляется на утилитарном уровне.
- Огромное количество благородных металлов остается в технологических отходах горнодобывающих предприятий. Однако отходы могут быть более богатым источником благородных и редких металлов, чем разрабатываемые месторождения.
- Без знания химического состава микро- и наночастиц благородных элементов невозможно решать проблемы комплексного использования минерального сырья.
- Необходима разработка новых технологических приемов комплексного извлечения благородных металлов, включающих методы изменения фазового состава трудноизвлекаемых форм и перевода их в нольвалентные формы.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Дубков А.А., Жабин А.В., Кузнецов Ю.А., Грибанов В.Н., Калининченко В.Н. Гулин А.А. Исследования минерального состава россыпного месторождения Хлебобёк (Бодайбинский район Иркутской области) // Недра Поволжья и Прикаспия. – 2023. – Вып. 109. – С. 20-29.
2. Дубков А.А., Жабин А.В., Калининченко В.Н., Кузнецов Ю.А. Исследование благороднометалльной минерализации пород кор выветривания Карийского рудного поля методами рентгенофазовой дифракции и электронной микроскопии (Восточное Забайкалье) // Недра Поволжья и Прикаспия. – 2023. – Вып. 110. – С. 12-24.
3. Жабин А.В., Кузнецов Ю.А., Дубков А.А. О находках элементов платиновой группы, драгоценных и редких металлов в породах баженовской свиты (Западная Сибирь) и сравнение их с известными рудными объектами северо-востока РФ // Недра Поволжья и Прикаспия. – 2020. – Вып. 101. – С. 78-88.
4. Жабин А.В., Дубков А.А., Золотарёва Г.С., Кузнецов Ю.А. Импациты в четвертичных отложениях Воронежской антеклизы // Недра Поволжья и Прикаспия. – 2020. – Вып. 102. – С. 39-52.
5. Жабин А.В., Кузнецов Ю.А., Дубков А.А. К вопросу о применении рентгеноструктурного и энерго-дисперсионного анализов для обнаружения платиноидной и рениевой минерализации на золоторудных проявлениях (на примере золото-сульфидных месторождений Центрального Сихотэ-Алиня Приморского края) // Недра Поволжья и Прикаспия. – 2021. – Вып. 104. – С. 30-38.
6. Ненахова Е.В., Сахно В.Г., Калашников Ю.Д., Ненахов В.М., Кузнецов Ю.А. Самосборка нанодисперсных форм платиноидов как метод их извлечения на примере золотосеребряных руд Милоградовского проявления (Приморский край) // Вестник ВГУ. Серия Геология. – 2018. – № 4. – С. 102-106.
7. Петровская Н.В. Самородное золото. – М.: Наука. – 1973. – 349 с.
8. Сахно В.Г., Кузнецов Ю.А., Дубков А.А., Ненахова Е.В. // О находках платиноидов в первичных рудах золотосеребряных месторождений Северной Чукотки // Вестник Воронежского государственного университета. Серия Геология. – 2019. – № 3. – С. 329-336.
9. Сахно В.Г., Коваленко С.В., Баринов Н.Н., Лызганов А.М., Кузнецов Ю.А. Монцоноидный магматизм золоторудного месторождения Глухое: изотопное датирование (U-Pb, SHRIMP), петро- и микроэлементный состав и особенности благороднометалльной минерализации (Приморье) // ДАН РФ. – 2015. – Т. 465. – №3. – С. 329-336.
10. Сахно В.Г., Кузнецов Ю.А., Дубков А.А., Ненахова Е.В. // О находках платиноидов в первичных рудах золотосеребряных месторождений Северной Чукотки // Вестник ВГУ. Серия Геология. – 2019. – № 3. – С. 111-117.
11. Сахно В.Г., Кузнецов Ю.А. Платиноиды золотосеребряных месторождений и рудопроявлений Охотско-Чукотского и Восточно-Сихотэ-Алинского вулканогенно-плутонических комплексов/ Материалы X Всероссийской конференции «Геология и минеральные ресурсы северо-востока России». – Якутск, 2020. – С. 285-290.
12. Храпов И.В. Наноразмерные исследования материалов, содержащих наноразмерное, ультрадисперсное и тонкое золото, входящее в сульфидные соединения и структурно-сложные сростки: автореферат кандидатской диссертации на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук. – Курск, 2013. – 20 с.