

УДК 553.085; 553.086; 549.08

DOI: 10.24930/2500-302X-2025-25-3-595-618

Сфероидные образования рудного и нерудного вещества в природе и эксперименте

П. П. Сафронов¹, И. В. Кузнецова², Н. В. Моисеенко²

¹Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, 690022, г. Владивосток, пр-т 100-летия Владивостоку, 159, e-mail: psafonov@mail.ru

²Институт Геологии и Природопользования ДВО РАН, 675000, г. Благовещенск, ул. Богдана Хмельницкого, 2, e-mails: kuzia67@mail.ru; kaunamka82@mail.ru

Поступила в редакцию 26.07.2024 г., принята к печати 01.10.2024 г.

Объект исследований. Сфероиды из техногенных россыпей, палеороссыпей и гранитоидов Нижнеселемджинского золотоносного узла; из россыпи Уркима Уркиминского золотоносного узла; наносфероиды Au Октябрьского золотоносного узла; золотоносные шарики – продукты экспериментальных опытов по концентрированию благородных металлов; металлосиликатные сфероиды из желудочно-кишечного тракта плоского морского ежа. **Методы.** Для изучения сфероидов применялся метод аналитической растровой электронной микроскопии, для определения состава некоторых из них – метод атомно-абсорбционной спектроскопии. **Результаты.** Изучены морфология и химический состав сфероидов. Установлены металлические сфероиды – золотые, свинцовые, железные, сфероиды, состоящие из сплавов на основе Fe; металлоидные (Sb); металлооксидные (Fe₂O₃) и (Cu₂O); силикатные (SiO₂) и металлосиликатные (Ag и др., SiO₂) сфероиды. В зависимости от обстановки, в которой формировались изучаемые сфероиды, действовали различные факторы, обуславливающие образование округлых форм минерального вещества. 1. Газовый метаморфизм – природный гидротермально-металлургический процесс, приводящий к образованию сфероидальных форм минералов. 2. Кластерное формирование агрегированных (поликристаллических) шариков в условиях неравновесного процесса самоорганизации частиц вещества. 3. Геохимические барьеры, которые становились центрами зарождения сфероидальных наночастиц. 4. Вторичные процессы, влияющие на состояние поверхностного слоя сфероидальных частиц после формирования их основного состава: а) гипергенез, ведущий к разрушению одних и образованию других минералов; б) механическая обработка ковких материалов в россыпях. 5. Неравновесный биогенез (для биоорганизмов).

Ключевые слова: сфероиды, микроструктура, химический состав, механизмы кристаллизации, самоорганизация вещества, энергетическая выгодность сферических форм

Источник финансирования

Исследования выполнены в рамках государственного задания Дальневосточного геологического института ДВО РАН (тема № 125033104605-6), а также фундаментальных исследований Института геологии и природопользования ДВО РАН (№ 122041800127-8 “Геодинамические обстановки, основные этапы тектонической эволюции и металлогения восточной части Центрально-Азиатского складчатого пояса”)

Spheroidal formations of ore and non-metallic matter in nature and experiment

Petr P. Safronov¹, Inna V. Kuznetsova², Natalia V. Moiseenko²

¹Far East Geological Institute, FEB RAS, 159 100th Anniversary of Vladivostok av., Vladivostok 690022, Russia, e-mail: psafonov@mail.ru

²Institute of Geology and Nature Management, FEB RAS, 2 Bogdan Khmel'nitsky st., Blagoveshchensk 675000, Russia, e-mails: kuzia67@mail.ru; kaunamka82@mail.ru

Received 26.07.2024, accepted 01.10.2024

Research subject. Spheroidal formations from technogenic placers, paleoplacers, and granitoids of the Nizhneselemdzhinsky gold-bearing node; from the placer of the Urkimi gold-bearing node; spheroidal nano-sized gold of the Oktyabrsky gold-bearing node; gold balls resulted from experiments on the concentration and consolidation of precious metals; as well as metallosilicate spheroids from the gastrointestinal tract of the flat sea urchin. **Methods.** Spheroids were studied by raster electron microscopy; their composition was determined using atomic absorption spectrometry. **Results.** The mor-

Для цитирования: Сафронов П.П., Кузнецова И.В., Моисеенко Н.В. (2025) Сфероидные образования рудного и нерудного вещества в природе и эксперименте. *Литосфера*, 25(3), 595-618. <https://doi.org/10.24930/2500-302X-2025-25-3-595-618>. EDN: DSJYLX

For citation: Safronov P.P., Kuznetsova I.V., Moiseenko N.V. (2025) Spheroidal formations of ore and non-metallic matter in nature and experiment. *Lithosphere (Russia)*, 25(3), 595-618. (In Russ.) <https://doi.org/10.24930/2500-302X-2025-25-3-595-618>. EDN: DSJYLX

© П.П. Сафронов, И.В. Кузнецова, Н.В. Моисеенко, 2025

phology and chemical composition of spheroids were studied. The following types were established: metal spheroids – gold, lead, iron, spheroids consisting of Fe-based alloys; metal-alloyed (Sb); metal oxides (Fe, O) and (Cu, O); silicates (Si, O) and metalolytic (Ag and others, Si, O). Depending on the environment in which the studied spheroids were formed, different factors determined the formation of round forms of mineral matter, including the following. (1) Gas metamorphism – natural hydrothermal-metallurgical process leading to the formation of spherical forms of minerals. (2) Cluster formation of aggregated (polycrystalline) balls under conditions of an unbalanced process of self-organization of particles of matter. (3) Geochemical barriers that became the centers of origin of spheroid nanoparticles. (4) Secondary processes affecting the surface layer of the spheroid particles after the formation of their main composition: (a) hypergenesis leading to the destruction of some and formation of other minerals and (b) mechanical processing of hard materials in the splits. (5) Non-equilibrium biogenesis (for bio-organisms).

Keywords: *spheroids, microstructure, chemical composition, crystallization mechanism, self-organization, energy efficiency*

Funding information

The research was carried out within the framework of the state assignment of the Far Eastern Geological Institute of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences (topic No. 125033104605-6), as well as fundamental research of the Institute of Geology and Environmental Management of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences (No. 122041800127-8 “Geodynamic conditions, main stages of tectonic evolution and metallogeny of the eastern part of the Central Asian Folded Belt”)

ВВЕДЕНИЕ

Сферические формы широко распространены в природе. Это и космические тела: звезды, планеты, черные дыры. Это и макрообъекты, встречающиеся на поверхности Земли: валуны, каменные шары неизвестного происхождения, вулканические бомбы – продукты извержения вулканов и др. Это и весь мир элементарных частиц: атомы, нейтроны, протоны, электроны и множество других частиц. В последние десятилетия в различных геологических объектах обнаружены металлические, металлооксидные, силикатные и алюмосиликатные округлые микрочастицы – микросферулы и шарики. Они установлены в различных геологических объектах: магматических (Гамянин, Жданов, 2001; Ермолов, Королук, 1978; Кориневский и др., 2018; Лукин, 2013; Малич и др., 1991; Маршинцев и др., 2018; Новоселов, 2015; Пушкарев и др., 2002; Силаев и др., 2009; Татаринцев и др., 1983; Томиленко и др., 2011; Тянь и др., 1976) вулканических (Рычагов и др., 1996; Силаев и др., 2019; Сандиминова и др., 2003; Сандиминова, 2008; Главатских, Генералов, 1996; Филлимонова и др., 1989), метаморфических (Шумилов и др., 2007) и осадочных (Захарова, 1997; Трубкин и др., 1983; Цельмович и др., 2010; Чайковский, Коротченкова, 2012). Происхождение этих сфероидов также весьма различно: от космического (Грачев и др., 2008; Корчагин и др., 2007; Корчагин, 2010; Сунгатуллин и др., 2017;

Флоренский и др., 1968) до сугубо геологического и даже биогенного (Масленникова и др., 2015; Шадрин и др., 2022). Изучение подобных образований является важным, так как они несут в себе генетическую информацию о тех вещественно-минеральных системах, откуда они произошли (Баженов и др., 1991; Бердников и др., 2021; Гамянин и др., 2000; Гребенников, 2011; Новгородова и др., 2003; Палажченко, Неронский, 2006; Рудашевский и др., 1987; Сандиминова и др., 2003; Филимонова и др., 2003; Nystrom et al., 2016). Настоящая работа является продолжением таких исследований, в ней делается акцент на изучение сфероидных образований из россыпных и техногенных месторождений, кор выветривания, палеороссыпей и вмещающих пород различных рудно-россыпных источников Приамурья, а также шариков – продуктов экспериментов по обогащению технологического сырья и минеральных образований в живой природе.

Нам при многолетнем изучении пород и руд из различных регионов Дальнего Востока неоднократно встречались сфероиды различного состава и размеров (Сафронов и др., 2009, 2011; Сафронов, Кузнецова, 2016, 2017; Сафронов, 2023; Кузнецова и др., 2015; Кузнецова, Сафронов, 2021; Моисеенко, Кузнецова, 2010; Моисеенко и др., 2010; Моисеенко, Сафронов, 2012; Моисеенко и др., 2013; Елькин и др., 2013). Кроме того, изучены сфероиды космического происхождения (Сафронов, Сахно, 2012; Сафронов и др., 2024), а также округлые

образования, полученные при проведении опытов по обогащению технологического золотоносного сырья (Моисеенко, 2007; Моисеенко, Кузнецова, 2010). В результате набран большой фактический материал по этим образованиям, который частично представлен в данной работе. Здесь рассмотрены микроразмерные шарики металлического, металлоидного, металлооксидного, металлосиликатного и силикатного состава, а также металлические шарики нанометрового диапазона.

Актуальность выполненных исследований заключается в расширении знаний об этих удивительных объектах, широко встречающихся в природе и несущих в себе генетическую информацию.

В задачи исследования входило установить химический состав и микроструктуру поверхности сфероидных образований из различных веществено-минеральных систем Приамурья и шариков, полученных в ходе экспериментов по обогащению золотоносного сырья, а также по возможности раскрыть механизмы образования этих объектов.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве материала для исследований использовались образцы, отобранные из различных рудно-россыпных источников Приамурья. Материал для изучения получен в результате отбора штучных и шлиховых проб. Шлихи выделены с объемных проб, отобранных на полигонах дражной и раздельной отработки россыпей золота, а также зерна, полученного в результате колонкового бурения с глубины 35–40 м (палеороссыпи). Образцы представлены в виде отдельных природных шариков, а также искусственных округлых образований, полученных в ходе обогащения технологического сырья. Лишь в одном случае использовался приготовленный аншлиф.

Исследования морфологических и микроструктурных особенностей выделений, их элементного состава проводились методами растровой электронной микроскопии (РЭМ) и рентгеноспектрального микроанализа на электронных микроскопах EVO 40XVP и EVO 50XVP (фирмы “Carl-Zeiss”, Германия), оснащенных системами энергодисперсионного рентгеновского (EDX) анализа INCA Energy (фирмы “Oxfordinstruments”, Великобритания). Часть работ выполнялась в центре электронной микроскопии Института биологии моря ДВО РАН, часть – в аналитических центрах ИГиП ДВО РАН и ДВГИ ДВО РАН. Поскольку образцы в основном не шлифовались и не полировались, то для изучения их состава применялась стандартная, как это принято при исследовании натуральных, необработанных образцов с неидеальной поверхностью, методика EDX анализа с нормализацией полученных данных о концентрациях элементов (т.е. приведением сумм к 100%).

При этом соотношения между химическими элементами, как правило, сохраняются, тем самым результаты отражают объективную картину химического состояния образцов. Для изучения состава минеральных фаз (выделений, обособлений, включений) малых размеров – от 1 до первых десятков микрометров, а также укладываемых в нанометровый диапазон использовалась методика, разработанная ранее (Сафронов, 2011). В связи с тем, что при измерении состава малых фаз в зону генерации рентгеновских лучей, возбуждаемых электронным пучком, попадает матрица, в которой находится фаза, то EDX-спектрометр регистрирует суммарный спектр (линии от фазы и от матрицы). Для того чтобы установить истинный состав малой фазы, измеряется состав матрицы на достаточном удалении от этой фазы. Далее сравнивается общий спектр (фаза + матрица) со спектром матрицы и устанавливаются элементы, относящиеся непосредственно к фазе. Затем концентрации этих элементов суммируются, приводятся к 100% и непосредственно рассчитывается элементный состав изучаемой фазы.

Основная часть образцов, проводящих ток, не напылялась. Углеродом напылялись только металлооксидные и силикатные шарики. Исследования проводились в режимах вторичных (SE) и упругорассеянных (обратнорассеянных BSE) электронов, а также энергодисперсионного рентгеноспектрального (EDX) микрозондирования при различных увеличениях и ускоряющем напряжении электронного пучка 20 кВ.

Кроме того, применялся метод атомно-абсорбционной (ААА) спектрометрии и спектральный анализ (СА) для определения состава некоторых объектов.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В статье изучены природные и искусственно полученные шарики, имеющие различный химический состав и подразделяющиеся на металлические, металлоидные, металлооксидные, силикатные и металлосиликатные. К металлическим сфероидам относятся свинцовые, железные, железоромистые (с примесями ряда элементов), свинцово-золотые и золотые; к металлоидным – сурьмяные, к металлооксидным – шарики, имеющие состав оксида свинца (с примесями Si, Ti, Zn), оксида железа и оксида меди; к силикатным – шарики из оксида кремния (с примесями Cr и Fe), оксида кремния (с примесями Ca, Na, Mg); к металлосиликатным – шарики, состоящие из тонкой смеси Ag с силикатным веществом, обнаруженные в морском моллюске. Размеры сфероидов (в диаметре) могут составлять десятки и сотни нанометров, десятки и сотни микрометров, а самые крупные могут достигать ≈1–2 мм.

Металлические и металлоидные сфероиды из техногенных россыпей Нижнеселемджинского золотоносного узла (НЗУ) Приамурья

НЗУ расположен на правом берегу р. Селемджа в пределах Зее-Селемджинского золотоносного района, который приурочен к Мамыньскому блоку Буреинского срединного массива (Мельников и др., 2006). Для него, как и для других золотоносных узлов этой металлогенической зоны, характерно оруденение преимущественно золото кварцевого, золотополиметаллического и золотосеребряного типов. Особенностью узла является развитие химических кор выветривания (Сорокин, 1989; Орлова, 1995) и наличие россыпной золотоносности, в том числе погребенных россыпей. Большая часть

россыпей на сегодняшний день обработаны и перешли в разряд техногенных.

Минеральный состав техногенных россыпей отличается высоким содержанием ильменита, монацита, гидроокислов и металлического Fe, металлического Pb и окислов свинца, галенита. При повторной обработке техногенной россыпи р. Некля в шлихах также выделены различные по составу сфероиды (Кузнецова, 2011; Кузнецова и др., 2019).

Рассмотрим один из металлических сфероидов (рис. 1), основной состав которого свинцовый. Его размер ≈ 600 мкм. По составу это твердый раствор Pb (98.25 мас. %) с примесью Fe (0.86 мас. %), Sb (0.7 мас. %) и Cu (0.1 мас. %). В незначительных количествах присутствуют Hg (300 г/т), Au (140 г/т), Ni (100 г/т), As (100 г/т), Mn (100 г/т) и др. (табл. 1).

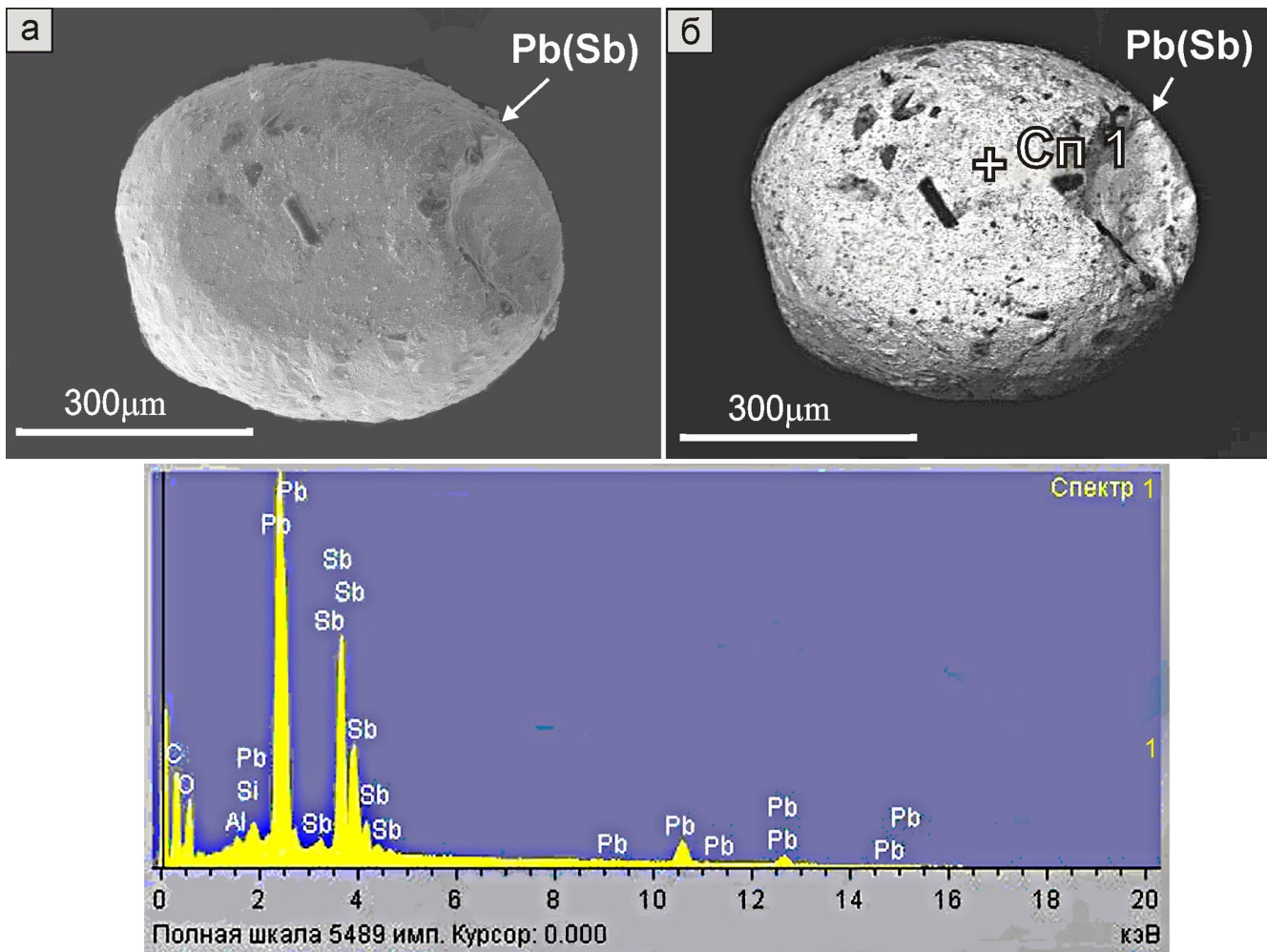


Рис. 1. Микроснимки самородно-свинцового сфероида из техногенной россыпи. а – в SE, б – в BSE. Под снимками приведен EDX спектр (спектр 1).

Fig. 1. Micrographs of autogenous spheroidal lead from technogenic placer. а – in SE, б – in BSE. The EDX spectrum (spectrum 1) is shown below the images.

Таблица 1. Средний состав свинцовых сфероидов самородного свинца из техногенных россыпей НЗУ

Table 1. Average composition of lead spheroids of the native lead from technogenic placers of NZU

Pb	Fe	Sb	Cu	Hg	Au	Ni	As	Mn	Bi	Zn	Mn	Ag	Ba	Co	Cr	Nb	Cd
мас. %				г/г													
98.25	0.86	0.7	0.1	300	140	100	100	100	80	60	52	50	45	20	20	5	2

Примечание. Не отражен углерод, нередко присутствующий в самородных выделениях, поскольку в таблице приведены данные СА.

Note. Carbon, often present in native emissions, is not reflected here because the table shows CA data.

Эмпирическая формула сфероидов: $Pb_{0.95}Fe_{0.03}Sb_{0.01}Cu_{0.01}$

В шарике наблюдаются как крупные включения различной морфологии, так и многочисленные мелкодисперсные включения алюмосиликатного вещества (Сафронов, Кузнецова, 2021). В свинцовой матрице сфероида, фиксируется углерод (см. рис. 1, сп. 1).

В техногенных россыпях встречены самородно-сурьмяные шарики диаметром $\approx 200\text{--}300$ мкм, на поверхности которых обнаружены минеральные новообразования. Один из таких объектов изучен детально (рис. 2а, б). На его поверхности установлены многочисленные округлые сфериды диаметром $\approx 2\text{--}3$ мкм (снимок “б”), имеющие высокоуглеродистый состав с присутствием значительных количеств Pb и меньших Sb. В некоторых из них вместо Sb выявлена примесь Cl. На поверхности сурьмяного шарика установлены мно-

гочисленные пленочные отложения углеродсодержащего свинца. Следует отметить, что углерод присутствует в обеих фазах, т.е. и в сфероидах, и в пленках.

Металлооксидные и силикатные сфериды из палеороссыпи НЗУ

При изучении минерального состава погребенной россыпи в долине р. Некля НЗУ установлены сфериды различного состава (рис. 3а–в). В тяжелой фракции шлиха выделены немагнитные шарики прозрачные, желтого и розового цвета металлооксидного (Pb, Si, Ti, Zn, O) состава с ровной гладкой поверхностью (см. рис. 3а) и непрозрачные серые силикатные (SiO_2 с примесями Cr и Fe; см. рис. 3в). В магнитной фракции установлены железоксидные (Fe, O) сфериды, по-видимому, шпинелиды (см. рис. 3б).

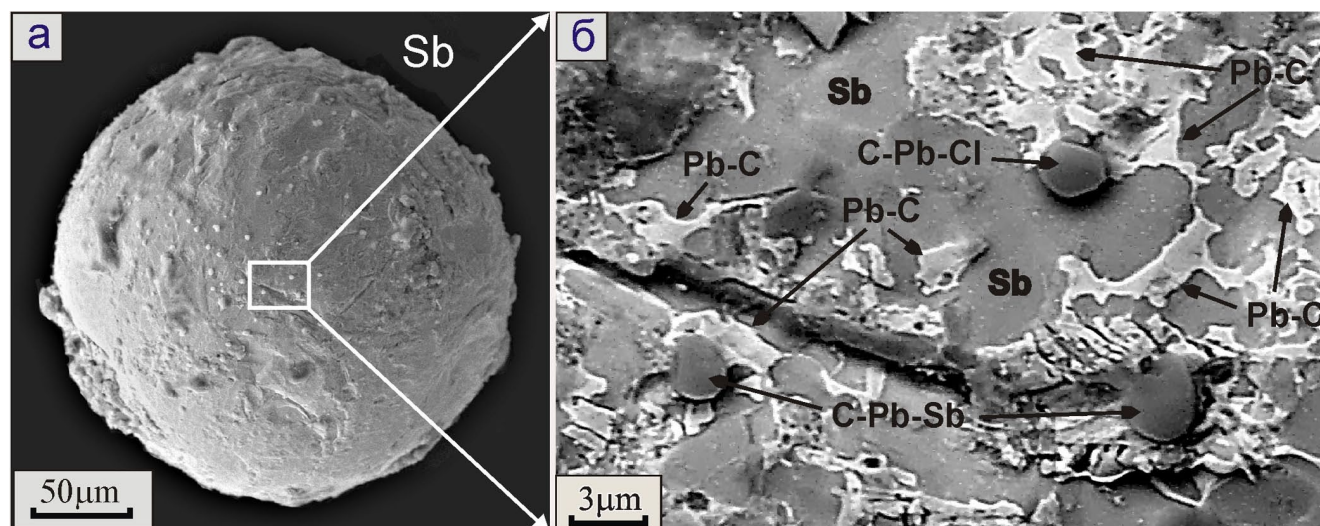


Рис. 2. Микроснимок одного из самородно-сурьмянных сфероидов из техногенных россыпей. а – в SE, б – в BSE.

а – общий вид; б – увеличенный участок поверхности, на котором установлены округлые сфериды C-Pb-Sb- и C-Pb-Cl-составов, и ксеноморфные пленочные отложения (более светлые) Pb-C-состава.

Fig. 2. Microdot of one of native antimony spheroids from technogenic placer compounds. а – in SE, б – in BSE.

а – general view; б – enlarged surface area on which rounded spheroids C-Pb-Sb- and C-Pb-Cl-compositions are installed, and xenomorphic film deposits (lighter) Pb-C-formulations.

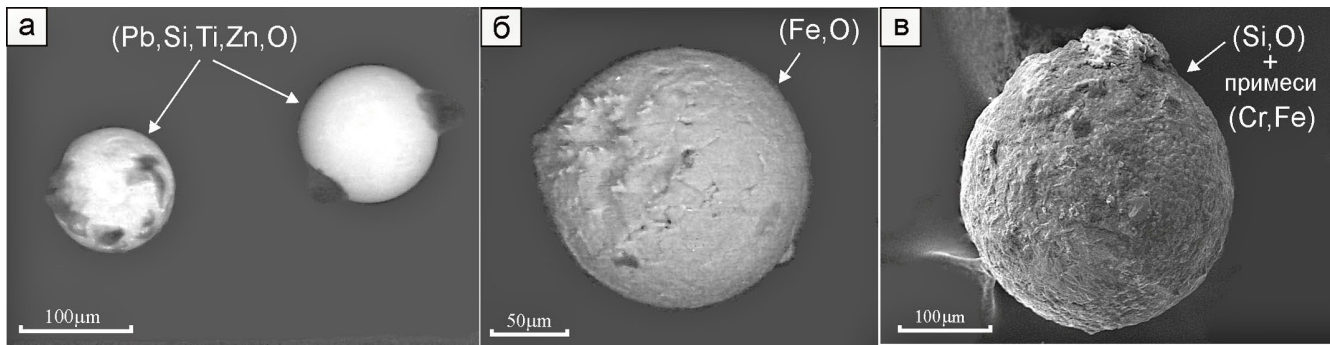


Рис. 3. Сфероиды из палеороссыпи НЗУ различного состава. а, б – в BSE; в – в SE.

а – металлооксидный, б – железоксидный, в – силикатный с примесями Cr и Fe.

Fig. 3. Spheroids from paleorossipy HZU of different composition. а, б – in BSE; в – in SE.

а – metalloxide; б – iron oxide; в – silicate with impurities Cr and Fe.

Металлооксидные сфероиды из гранитоидов НЗУ

При изучении минерального состава коренных пород НЗУ из плотика россыпи р. Татарка отобраны образцы палеозойских гранитоидов. В аншлифе одного из образцов (рис. 4) на участке сростка кварца (табл. 2, сп. 11) с Ва-содержащим мусковитом (табл. 2, сп. 12) в интерстиции установлен шарик оксида меди CuO (вероятно, тенорит) (см. рис. 4; табл. 2, сп. 10). Его размер ≈ 90 мкм, поверхность гладкая, ровная. Этот минерал, как правило, связан с зоной окисления.

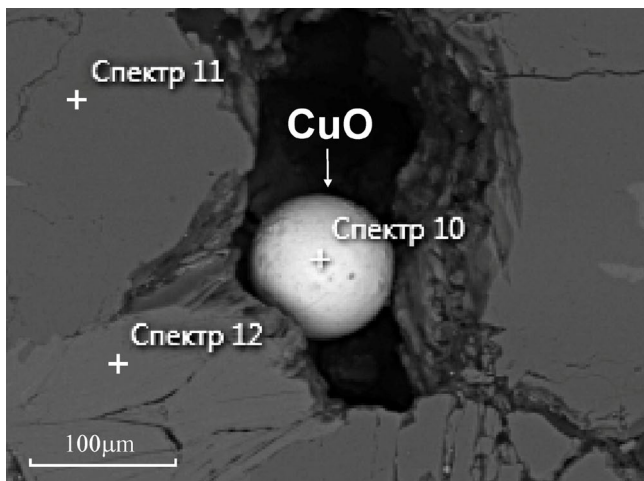


Рис. 4. Сфероид оксида меди в породе, состоящей из сростка кварца и мусковита. Черное вокруг шарика CuO – вероятно, углеродистое вещество (УВ) (анализ его не проводился). Снято в BSE.

Fig. 4. Spheroid copper oxide in a rock consisting of a fusion of quartz and muscovite. Black around CuO ball – possible carbon substance (no analysis was done). Images in BSE.

Эмпирические формулы, отвечающие измеренным в трех точках составам (в анализе Сп 10 инородная примесь Si – намазка на поверхности шарика, при расчете формулы не учитывалась):

сп. 10 – $\text{Cu}_{0.99}\text{O}_{1.01}$ – тенорит,

сп. 11 – SiO_2 – кварц,

сп. 12 – $(\text{K}_{0.90}\text{Ba}_{0.03})_{0.93}(\text{Al}_{1.76}\text{Mg}_{0.18})_{1.94}[\text{AlSi}_3\text{O}_{10}](\text{OH})_{1.6}$ – барийсодержащий мусковит.

Металлические сфероиды из аллювиальных отложений р. Уркима (Приамурье)

При изучении минерального состава аллювиальных отложений р. Уркима Уркиминского золотоносного узла (УЗУ) выделены металлические сфероиды, четыре из которых рассмотрены ниже (рис. 5а). Территория отбора образцов относится к УЗУ, входящему в Средненюкжинский золотоносный район (Мельников и др., 2006). Река Уркима является правым притоком р. Нюкжи, впадающей в р. Олекма. УЗУ характеризуется наличием рудопроявлений урана, железа, германия, титана и др. и пунктами минерализации хрома, свинца, молибдена, золота и др. (Кошеленко и др., 2020). Кроме того, это один из старейших районов россыпной золотодобычи Приамурья.

Основной состав сфероидов разный. Шарики 1 и 4 состоят из трехкомпонентного сплава Fe-Cr-Ni с примесью Mn, в них железа ≈ 63 мас. % (рис. 5; табл. 3, сп. 3, 4; см. рис. 8, табл. 6, сп. 3). Шарик 2 представляет собой сплав Fe-Cr-Cu, в котором Fe составляет ≈ 90 мас. % (рис. 6; табл. 4, сп. 6, 7). Шарик 3 состоит в основном из железа с небольшими примесями Si (0.17 мас. %) и C (2.79 мас. %) (рис. 7; табл. 5, сп. 2).

Ниже приводятся эмпирические формулы для каждой проанализированной точки (спектра). При этом учитываются размерные особенности, в частности, ксеноморфных выделений ртутистого золота. Последние, являясь по существу намазкой на поверхности шарика, имеют малую толщину, в ре-

Таблица 2. Элементный состав сфероидов CuO и породной матрицы (см. рис. 4), мас. %

Table 2. Elemental composition of spheroid CuO and breed matrix (see Fig. 4), wt %

Спектр	O	Mg	Al	Si	K	Fe	Ba	Cu
10	20.46	–	–	0.48	–	–	–	79.06
11	53.26	–	–	46.74	–	–	–	–
12	45.15	1.16	16.36	23.49	9.77	3.54	0.54	–

Примечание. Здесь и далее все составы приведены к 100 %. Прочерк – элемент не обнаружен или его содержание ниже чувствительности прибора.

Note. Here and further all formulations are given to 100%. Dash is element not detected or its content is below the sensitivity of the instrument.

зультате из-за того, что электронный пучок пробивает это пленочное образование, в спектрах 1 и 2 появляются элементы матрицы, которые, согласно примененной методике, нами не берутся в расчет. Предполагается, что здесь и далее примесные элементы входят изоморфно в структуру установленных минералов.

Эмпирические формулы:

сп. 1 – $Au_{0.80}Hg_{0.12}Ag_{0.08}$ – среднепробное ртуть-содержащее золото,

сп. 2 – $Au_{0.82}Hg_{0.11}Ag_{0.07}$ – среднепробное ртуть-содержащее золото,

сп. 3 – $(Fe_{0.65}Cr_{0.22}Ni_{0.09}Mn_{0.03}Si_{0.01})[C_{0.11}O_{0.03}]_{0.14}$ – сплав железо–хром–никель УВ-содержащий,

сп. 4 – $(Fe_{0.66}Cr_{0.21}Ni_{0.10}Mn_{0.02}Si_{0.01})[C_{0.11}O_{0.03}]_{0.14}$ – сплав железо–хром–никель УВ-содержащий,

сп. 5 – $(Si_{0.36}Al_{0.25}Ca_{0.23}Fe_{0.13}Cr_{0.01}Na_{0.01}K_{0.01})$

$[C_{1.69}O_{1.46}(S,Cl)_{0.01}]_{3.16}$ – углеродсодержащее алюмосиликатное вещество,

сп. 6 – $[C_{77.3}O_{0.04}](Cr_{0.41}Fe_{0.1}Mn_{0.05}Ni_{0.11}Au_{0.07}Ti_{0.02}Al_{0.06}Si_{0.1}Na_{0.08})$ – металлоносное углеродное вещество.

Спектры 1 и 2 по составу близки известному интерметаллическому соединению $(Au,Ag)_9Hg_1$,

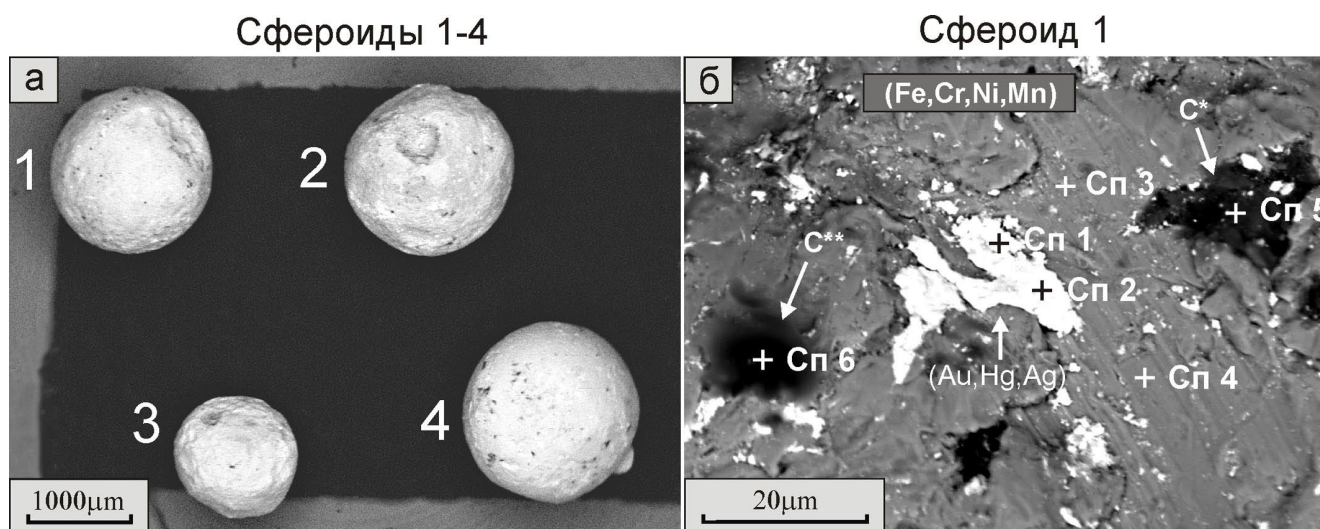


Рис. 5. Микроснимки металлических сфероидов (а) и участка поверхности одного из них (б) с включениями алюмосиликатного вещества С*, содержащего углерод, высокоуглеродистого вещества С** и выделениями ртустистого золота (Au,Hg,Ag). Снято в BSE.

С* – углеродистое вещество, в состав которого входят кислород и примеси основных элементов O, Si, Ca, Fe, Al, Cr (табл. 3, спектр 5); С** – высокоуглеродистое вещество с примесями основных элементов Fe, O, Cr, Au, Ni (табл. 3, спектр 6).

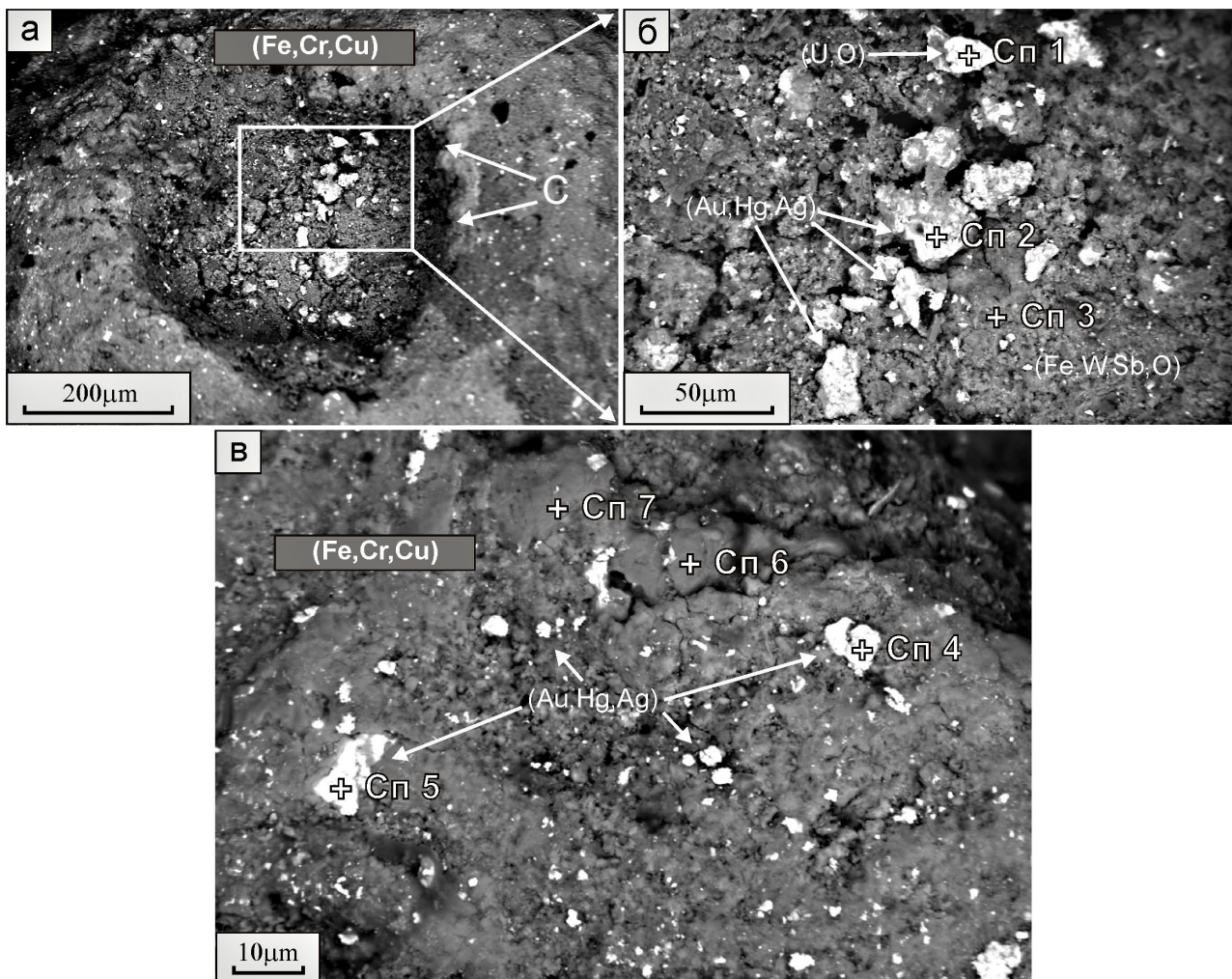
Fig. 5. Microimages of metallic spheroids (a) and surface area of 1st of them (б) with the inclusion of aluminosilicate substance C*, containing carbon, high carbon substance C** and mercury gold (Au,Hg,Ag). Shot in BSE.

C* – carbon substance, which includes oxygen and impurities of the main elements O, Si, Ca, Fe, Al, Cr (Table 3, spectrum 5); C** – high-carbon substance with months of main elements Fe, O, Cr, au, Ni (Table 5, spectrum 6).

Таблица 3. Состав сфероид 1 и минеральных образований на его поверхности (см. рис. 5), мас. %**Table 3.** Composition of spheroid 1 and mineral formations on its surface (see Fig. 5), wt %

Спектр	C	O	Na	Al	Si	S	Cl	K	Ca	Ti	Cr	Mn	Fe	Ni	Ag	Au	Hg
1	6.79	1.64	–	–	0.16	–	–	–	–	–	–	–	1.03	–	3.98	75.04	11.36
2	5.71	1.77	–	–	–	–	–	–	–	–	1.03	–	2.87	–	3.75	74.97	9.89
3	2.19	0.83	–	–	0.31	–	–	–	–	–	20.44	3.00	63.96	9.28	–	–	–
4	5.14	1.01	–	–	0.46	–	–	–	–	–	18.71	1.68	63.32	9.68	–	–	–
5	25.85	29.81	0.36	8.51	12.83	0.10	0.35	0.26	11.99	–	0.53	–	9.41	–	–	–	–
6	84.60	4.98	0.16	0.14	0.25	0.09	0.09	–	–	0.10	1.96	0.24	5.50	0.62	–	1.28	–

Сфероид 2

**Рис. 6.** Микроснимки участков сфероид 2 Fe-Cr-Cu-состава (см. рис. 5а). Снято в BSE.

а – выемка на поверхности шара, окруженная углеродом (С); б – участок с включениями уранового минерала (U,O), ртутистого золота (Au,Hg,Ag) и выделением (Fe,W,Sb,O) состава; в – участок с многочисленными обособлениями ртутистого золота.

Fig. 6. Microscopic images of spheroid regions 2 Fe-Cr-Cu-composition (see Fig. 5a). Shot in BSE.

а – a excavation on the surface of the ball surrounded by carbon (C); б – a site with the inclusion of uranium mineral (U,O), mercury gold (Au,Hg,Ag) and the separation (Fe,W,Sb,O) composition; в – a plot with numerous separations of mercury gold.

Таблица 4. Состав шарика 2 (см. рис. 5а) и минеральных образований на его поверхности (см. рис. 6б, в), мас. %
Table 4. Composition of the ball 2 (see Fig. 5а) and mineral formations on its surface (see Fig. 6б, в), wt %

Спектр	C	O	Na	Si	S	Cr	Fe	Cu	Sr	Ag	Sb	W	Au	Hg	U
1	9.13	16.68	–	–	–	–	5.22	–	–	–	–	1.69	–	–	67.29
2	3.77	11.31	–	0.43	–	–	6.87	–	1.30	3.74	–	–	63.65	8.94	–
3	4.60	20.14	1.86	–	0.40	1.87	45.30	0.87	–	–	4.38	20.58	–	–	–
4	5.22	2.88	–	0.11	–	–	2.46	–	–	1.99	–	–	80.88	6.45	–
5	5.67	3.28	–	0.20	–	–	4.05	–	–	5.54	–	–	71.69	9.57	–
6	2.80	–	–	0.16	–	4.18	89.50	3.36	–	–	–	–	–	–	–
7	4.17	–	–	0.26	–	4.16	88.07	3.35	–	–	–	–	–	–	–

встреченному в техногенных россыпях (Сафронов, Кузнецова, 2017).

В сфероиде 1 Fe-Cr-Ni-Mn-состава (см. рис. 5б; табл. 3, сп. 3, 4) отмечаются включения алюмосиликатного вещества С*, содержащего углерод (25.85 мас. %), и высокоуглеродистого металлоносного вещества С** с концентрацией С 84.60 мас. % (см. табл. 3, сп. 5, 6). На его поверхности имеются разных размеров ксеноморфные и изометрические выделения ртутистого золота (см. рис. 5б; табл. 3, сп. 1, 2).

В сфероиде 2 Fe-Cr-Cu-состава (см. рис. 6; табл. 4, сп. 7, 8) наблюдаются морфологические особенности, заключающиеся в следующем. На поверхности сфероида (см. рис. 5а) имеется углубление, в котором находится выпуклое почти округлое образование, обрамленное углеродистой оторочкой. На выпуклости видны выделения микрофаз разного состава (см. рис. 6б). Ряд фаз имеют состав ртутистого золота (Au, Hg, Ag) (см. табл. 4, сп. 2). Одна фаза (U, O) относится к оксиду либо гидрооксиду урана (см. табл. 4, сп. 1). Здесь же фикс-

Сфероид 3

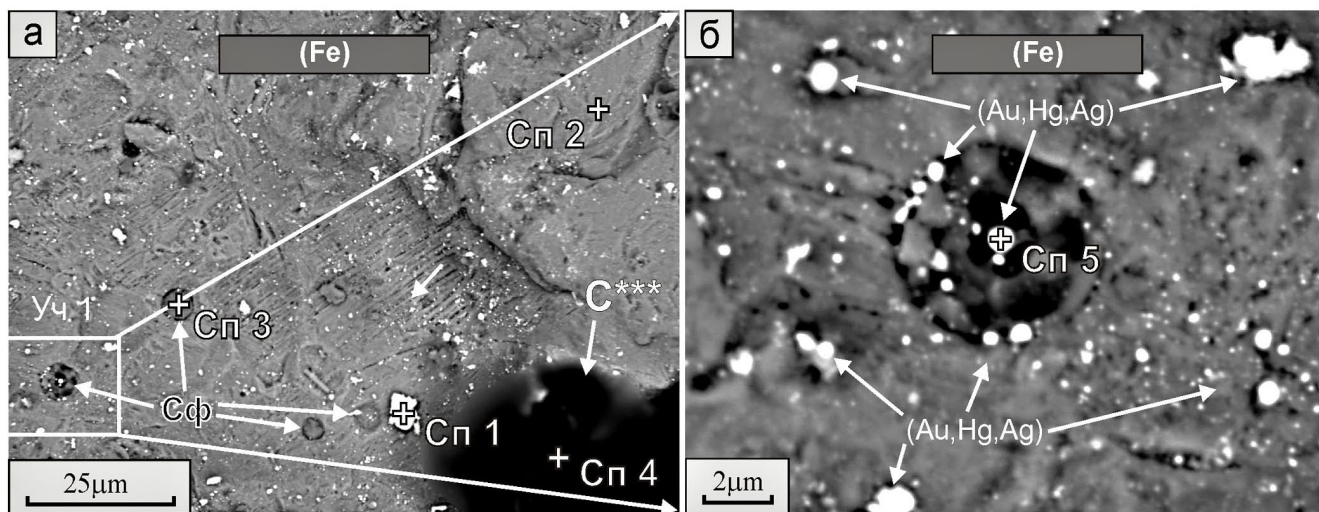


Рис. 7. Микроснимки участков железного сфероида 3 (см. рис. 5а).

а – включение углеродистого вещества С***, б – многочисленные округлые обособления ртутистого золота (Au,Hg,Ag). Снято в BSE.

С*** – углеродистое вещество, в состав которого входят кислород и примеси основных элементов Fe, N, O, Au, Hg (см. табл. 4, спектр 4).

Fig. 7. Iron spheroid 3 (Fig. 5 а).

а – inclusion of carbon substance С***, б – numerous rounded separations of mercury gold (Au,Hg,Ag). Shot in BSE.

С*** is a carbon substance containing oxygen and impurities of the main elements Fe, N, O, Au, Hg (see Table 4, spectrum 4).

Таблица 5. Состав сфероид 3 (см. рис. 5а) и минеральных выделений на нем (см. рис. 7), мас. %**Table 5.** Composition of spheroid 3 (see Fig. 5a) and mineral extracts on it (see Fig. 7), wt %

Спектр	C	N	O	Na	Si	S	Cl	Cr	Mn	Fe	Cu	Ag	Sb	W	Au	Hg
1	11.65	–	3.12	–	–	–	–	–	–	10.13	–	1.64	1.75	–	63.21	8.49
2	2.79	–	–	–	0.17	–	–	–	–	97.04	–	–	–	–	–	–
3	3.28	–	16.42	–	0.33	0.19	–	0.90	5.15	72.25	–	–	–	–	0.92	0.55
4	55.34	12.60	8.31	0.38	0.18	0.61	0.18	–	–	21.30	–	–	–	–	0.59	0.50
5	1.94	–	6.97	–	–	–	–	0.44	1.94	40.95	1.31	3.83	–	1.55	27.79	13.28

сируются агрегаты (Fe, W, Sb, O)-состава с примесями Na, Cr, Cu, S и C (см. табл. 4, сп. 3). Несколько ниже от впадины (см. рис. 6в) приведен участок шарика 2 с многочисленными выделениями на его поверхности частиц ртутистого золота (Au, Hg, Ag) (см. табл. 4, сп. 4, 5).

Следует обратить внимание на то, что выделения ртутистого золота не монолитные (см. рис. 5б, в; сп. 2, 4, 5), а, по существу, представляют собой агрегаты, состоящие из фаз ртутистого золота и металлосодежающего УВ. С учетом этого приводятся эмпирические формулы:

сп. 1 – UO_2 – уранинит; его обособление находится на включении УВ, при этом электронным пучком частично захватываются Fe и W содержащие агрегаты (см. сп. 3);

сп. 2 – $Au_{0.80}Hg_{0.11}Ag_{0.09}$ – среднепробное ртутьсодержащее золото – фаза в агрегате, содержащем УВ;

сп. 3 – $(Fe_{0.74}Cr_{0.03}Cu_{0.01}W_{0.10}S_{0.01}Na_{0.07}Sb_{0.04})[C_{0.35}O_{1.14}]$ – оксид Fe сложного состава с примесью W и УВ, из которого состоит один из агрегатов, имеющий мелкокристаллическое строение;

сп. 4 – $Au_{0.89}Hg_{0.07}Ag_{0.04}$ – высокопробное ртутьсодержащее золото в агрегате с УВ;

сп. 5 – $Au_{0.79}Hg_{0.10}Ag_{0.11}$ – среднепробное ртутьсодержащее золото в агрегате с УВ;

сп. 6 – $(Fe_{0.92}Cr_{0.05}Cu_{0.03})C_{0.13}$ – самородное железо с УВ-примесью;

сп. 7 – $(Fe_{0.86}Cr_{0.1}Cu_{0.03}Si_{0.01})C_{0.21}$ – самородное железо с УВ-примесью.

Следует подчеркнуть, что спектры 2, 4, 5 практически отвечают интерметаллическому соединению $(Au, Ag)_9Hg_1$.

Сфероид 3 состоит практически из чистого железа (см. табл. 5, сп. 2). В нем есть включение углеродистого вещества C^{***} , представляющего собой металлоорганическое соединение, в состав которого, наряду с углеродом (55.34 мас. %), входят Fe (21.30 мас. %), N (12.60, S 0.61, Cl 0.18, O 8.31, Au 0.59 мас. %) и ряд других малозначимых элементов. По всей поверхности участка (см. рис. 7а) наблюдаются изометрические частицы ртутистого золота размером 2–3 мкм и меньше, также установлено образование ромбовидной формы с со-

ставом, аналогичным таковому примесей C, Sb, O (см. рис. 7а; табл. 5, сп. 1). Кроме того, просматриваются очень мелкие округлые выемки размером ≈ 3 –6 мкм (Сф), по-видимому, следы от газовых пузырей. При большем увеличении (см. рис. 7б) установлены несколько ксеноморфных частиц ртутистого золота (Au, Hg, Ag) размером ≈ 0.6 –2 мкм и многочисленные сфероидные образования также ртутистого золота размером ≈ 0.1 –0.8 мкм. Состав одного из них без учета элементов матрицы приблизительно отвечает интерметаллическому соединению $\approx (Au, Ag)_3Hg_1$ (см. рис. 7б; табл. 5, сп. 5).

Эмпирические формулы:

сп. 1 – $(Au_{0.82}Hg_{0.11}Ag_{0.04}Sb_{0.03})$ – среднепробное ртутьсодержащее золото; обособление лежит на углеродистой подложке;

сп. 2 – $(Fe_{0.99}Si_{0.01})C_{0.13}$ – самородное железо с примесью УВ;

сп. 3 – $(Fe_{0.91}Mn_{0.06}Cr_{0.01}(Au, Ag)_{0.01}Si_{0.01})[C_{0.13}O_{0.72}]_{0.85}$ – оксид железа сложного состава с примесями Au, Hg и других элементов, а также с примесью УВ; идеально округлое выделение размером ≈ 6 мкм в железной матрице;

сп. 4 – $(Fe_{0.93}Au_{0.01}Ag_{0.01}Na_{0.04}Si_{0.01})[C_{11.28}N_{2.05}O_{1.27}]_{14.6}$ – металлоорганическое соединение с незначительными примесями Au, Hg, S и Cl;

сп. 5 – $(Au_{0.58}Hg_{0.27}Ag_{0.15})$ – низкопробное ртутистое золото (многочисленные шарики).

Следует отметить, что спектр 1 практически отвечает интерметаллическому соединению $(Au, Ag, Sb)_9Hg_1$, а спектр 5 – приближенно соединению $(Au, Ag)_3Hg_1$.

В сфероиде № 4 Fe-Cr-Ni-Mn-состава (рис. 8, табл. 6, сп. 2) установлено кубическое включение $(Sb, Fe, O)^*$ сложного Sb-Fe-Cr-Ni-Mn-оксидного состава с примесями Na и C (вероятно, трипугит, тетрагональный минерал со структурным типом рутила). На поверхности сфероиды зафиксированы как крупные, так и многочисленные мелкие выделения ртутистого золота (Au, Hg, Ag).

Эмпирические формулы:

сп. 1 – $(Au_{0.66}Hg_{0.23}Ag_{0.11})$ – низкопробное ртутистое золото; тонкопленочная намазка на включении углеродистого вещества;

Сфероид 4

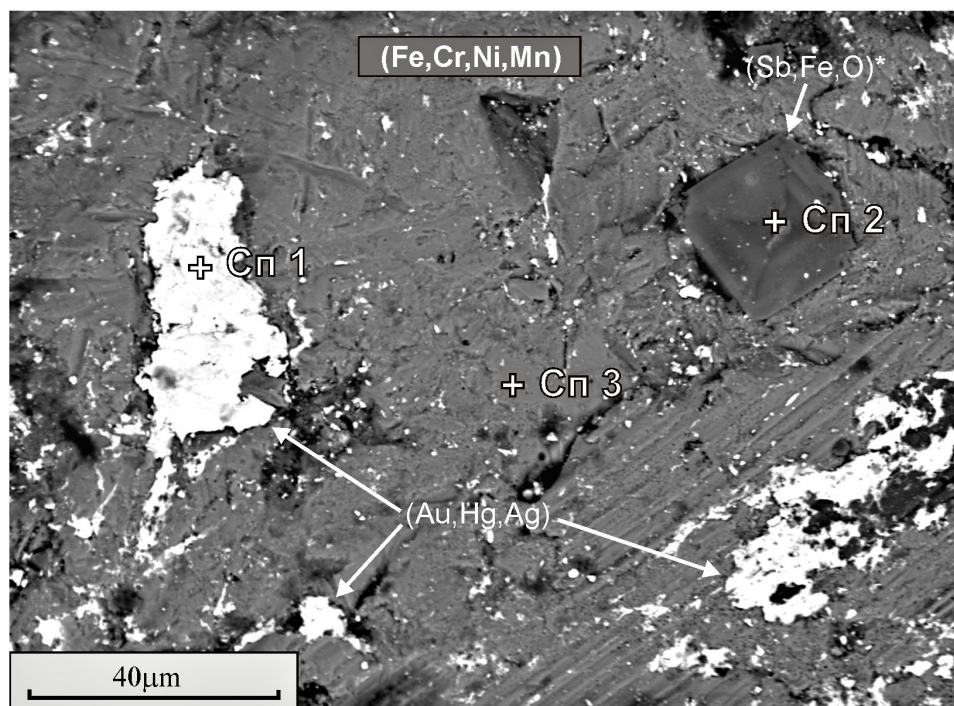


Рис. 8. Микроснимок участка поверхности сфероида 4 (см. рис. 5а) (Fe,Cr,Ni,Mn)-состава с выделениями ртутистого золота (Au,Ag,Hg) (спектр 1) и включением сурьмянистого минерала (Sb,Fe,O)* (спектр 2). Снято в BSE.

Сурьмянистый минерал (Sb,Fe,O)* содержит примеси Cr, Na, Ni, Mn (табл. 6, спектр 2).

Fig. 8. Microimage of the surface area of spheroid 4 (see Fig. 5a) (Fe,Cr,Ni,Mn)-composition with mercury gold (Au,Ag,Hg) secretions (spectrum 1) and the inclusion of antimony mineral (Sb,Fe,O)* (spectrum 2). Shot in BSE.

Antimony mineral (Sb, Fe, O)* contains impurities Cr, Na, Ni, Mn (Table 6, spectrum 2).

Таблица 6. Состав сфероида 4 (см. рис. 5а) и минеральных включений на нем (см. рис. 8), мас. %

Table 6. Composition of spheroid 4 (see Fig. 5a) and mineral inclusions on it (see Fig. 8), wt %

Спектр	C	O	Na	Si	Cr	Mn	Fe	Ni	Ag	Sb	Au	Hg
1	6.04	1.92	–	–	–	–	1.36	–	5.53	–	73.74	11.42
2	3.08	20.79	5.25	–	6.49	1.37	23.97	3.66	–	35.39	–	–
3	2.63	–	–	0.56	22.20	4.13	63.14	7.33	–	–	–	–

сп. 2 – $(\text{Fe}_{0.49}\text{Cr}_{0.14}\text{Ni}_{0.08}\text{Mn}_{0.03}\text{Na}_{0.26})[\text{Sb}_{0.33}\text{C}_{0.29}\text{O}_{1.49}]$ – железосурьмяной оксид сложного состава (вероятно, трипугиит) с примесями ряда элементов и УВ;

сп. 3 – $(\text{Fe}_{0.67}\text{Cr}_{0.23}\text{Ni}_{0.06}\text{Mn}_{0.03}\text{Si}_{0.01})\text{C}_{0.13}$ – никель-хром-железный сплав с примесями Mn и УВ.

Следует отметить, что в сфероидах 1 и 3 есть относительно крупные включения углеродистого вещества разного состава С*, С**, С***, содержание углерода в которых 25.85, 84.60, 55.34 мас. % соответственно. Кроме того, углерод есть в самом составе всех четырех шариков. В углероди-

стых включениях присутствуют примеси серы (S) и хлора (Cl).

Ультратонкое сфероидное золото Октябрьского золотоносного узла (ОЗУ).

Октябрьский золотоносный узел занимает водораздельную часть рек Джелтулак, Джелтулак 1-й, Бол. Джелтулак и относится к Зее-Селемджинскому золотоносному району (Мельников и др., 2006).

При изучении самородного золота из докембрийских известняковых отложений ОЗУ в одном из образцов обнаружено ультратонкое золото (рис. 9а).

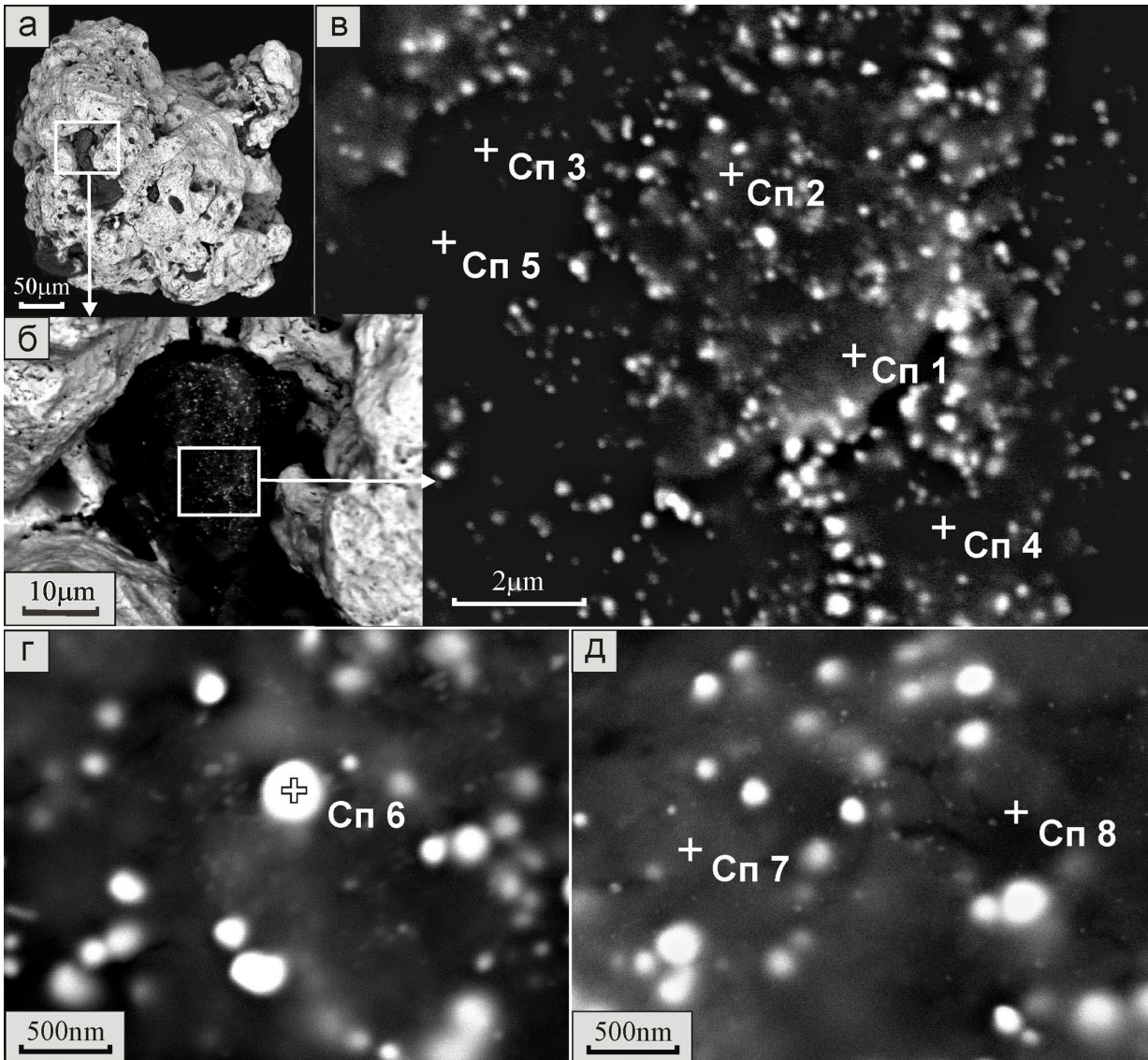


Рис. 9. Самородное золото (а) и ассоциирующая с ним порода (б) ОЗУ, содержащая сфероидные частицы золота (в–д). Снято в BSE.

Fig. 9. Native gold (a) and associated rock (б) RAM containing spheroidal gold particles (в–д). Shot in BSE.

Исследован один из участков зерна (рис. 9б), в котором закапсулирована порода с многочисленными включениями в ней преимущественно сфероидальных частиц золота размером от 300 нм до ≈ 50 нм и менее (рис. 9в–д).

Участок минеральной матрицы, в пределах которой сосредоточены сфероидные частицы золота, состоит преимущественно из глинистых минералов. Состав отдельных частиц Au равен 100 мас. % (табл. 7, сп. 6), т.е. проба составляет 1000 ‰. Порода содержит примесь Au, что указывает на присутствие в ней ультратонкого золота (см. рис. 9г; табл. 7, сп. 7, 8), а в ряде случаев и Ag, вместе с которым в этих же точках отмечаются повышенные

содержания Au – 11.53 и 13.35 мас. % (см. рис. 9б, табл. 7, сп. 1, 4). Помимо того, в породе регистрируется примесь ртути \approx от 1.5 до 2.5 мас. %.

Эмпирические формулы:

сп. 1 – 0.98 алюмосиликатная матрица + 0.02 ($\text{Au}_{0.79}\text{Ag}_{0.11}\text{Hg}_{0.1}$) – среднепробное ртутьсодержащее золото;

сп. 2 – 0.99 алюмосиликатная матрица + 0.01 ($\text{Au}_{0.82}\text{Hg}_{0.18}$) – среднепробное ртутьсодержащее золото;

сп. 3 – 0.995 алюмосиликатная матрица + 0.005 ($\text{Au}_{0.64}\text{Hg}_{0.36}$) – низкопробное ртутьсодержащее золото;

сп. 4 – 0.98 алюмосиликатная матрица + 0.02 ($\text{Au}_{0.79}\text{Ag}_{0.04}\text{Hg}_{0.17}$) – среднепробное ртутьсодержащее золото;

Таблица 7. Состав ультратонкого самородного золота и породной матрицы (см. рис. 9в–д), мас. %

Table 7. Composition of Ultrafine Native Gold and Breeding Matrix (see Fig. 9в–д), wt %

Спектр	O	Mg	Al	Si	K	Ti	Fe	Ag	Au	Hg
1	44.16	–	15.45	14.48	–	8.14	1.74	1.05	13.35	1.62
2	53.11	0.04	17.34	16.73	–	3.35	1.27	–	6.64	1.51
3	50.91	0.08	19.07	18.57	0.07	5.35	1.76	–	2.68	1.51
4	41.08	0.05	16.30	15.83	0.41	9.66	2.29	0.33	11.53	2.52
5	58.23	0.16	16.10	15.77	–	2.17	1.49	–	4.50	1.57
6	–	–	–	–	–	–	–	–	100.0	–
7	50.26	–	17.42	19.15	–	3.08	2.11	–	7.99	–
8	56.04	–	16.74	18.39	–	3.19	1.31	–	4.32	–

сп. 5 – 0.99 алюмосиликатная матрица + 0.01 (Au_{0.75}Hg_{0.25}) – относительно низкопробное ртутьсодержащее золото;

сп. 6 – Au – высокопробное самородное золото (проба 1000 ‰);

сп. 7 – 0.99 алюмосиликатная матрица + 0.01 Au;

сп. 8 – 0.996 алюмосиликатная матрица + 0.004 Au.

Другой образец самородного золота (рис. 10а) из той же зоны ОЗУ, что и предыдущий, также содержит включения метасоматической породы (см. рис. 10а, б), в которой обнаружено ультратонкое золото (см. рис. 10в, г) ртутистого состава (см. рис. 10б; табл. 8, сп. 4, 5). Величина частиц варьируется от первых десятков нанометров до 500–600 нм.

Эмпирические формулы:

сп. 1 – 0.99 алюмосиликатная матрица + 0.01 (Au_{0.67}Hg_{0.33}) – амальгама золота;

сп. 2 – 0.99 алюмосиликатная матрица + 0.01 (Au_{0.92}Hg_{0.08}) – высокопробное ртутьсодержащее золото;

сп. 3 – Cu самородная медь;

сп. 4 – Au_{0.81}Hg_{0.19} – амальгама золота;

сп. 5 – Au_{0.72}Hg_{0.28} – амальгама золота;

сп. 6 – Au_{0.97}Cu_{0.03} – весьма высокопробное золото;

сп. 7 – 0.99 алюмосиликатная матрица + 0.01 (Au_{0.91}Hg_{0.09}) – высокопробное золото;

сп. 8 – Au_{0.96}Cu_{0.04} – весьма высокопробное золото;

сп. 9 – Au_{0.97}Cu_{0.03} – весьма высокопробное золото.

Обнаружено небольшое выделение самородной меди (см. рис. 10б; табл. 8, сп. 3). Включение породы имеет гидратированный алюмосиликатный состав и представляет собой ультратонкодисперсную смесь глинистых минералов (см. табл. 8, сп. 1, 2, 7). В породной матрице есть примеси Au и Hg, что указывает на присутствие в ней ультратонкого невидимого золота и кластеров ртути либо кластеров соединений Au с Hg (см. табл. 8, сп. 1, 2, 7). Состав видимых частиц отвечает медистому золоту – 98.66–99.00 мас. % Au, 1.34–1.00 мас. % Cu (см. рис. 10в; табл. 8, сп. 6; рис. 10г, табл. 8, сп. 8, 9), его проба ≈987–990 ‰.

Экспериментальные данные по концентрированию рудных металлов

Под руководством академика РАН В.Г. Моисеенко проведены экспериментальные работы по концентрированию и укрупнению благородных металлов в различном горнорудном сырье (Моисеенко, 2007; Моисеенко, Кузнецова, 2010). Исходный материал, как правило, не содержал макроскопическое (различаемое невооруженным глазом человека) золото. В результате экспериментов происходило разрушение минералов-концентраторов и высвобождение закапсулированных в них частиц золота, серебра и свинца. На заключительной стадии опытов эти металлы агрегировались и образовывали крупные, вплоть до самородков, сростки благородного металла. Часть из них имели фрактально-кластерную структуру, а часть сфероидную (рис. 11а–в). Иногда благородные металлы по сумме превосходили количество свинца в шаровидных образованиях, а золото полностью замещало свинец (табл. 9). При этом в результате экспериментов образовывались не только золотоносные округлые образования, но и шарики свинца, железа и хрома. Наличие тех или иных примесей в новообразованиях зависит от минерального состава исходного материала (т. е. присутствия минералов свинца, меди, олова, железа и тд.).

Эмпирические формулы:

а – Pb_{0.48}Au_{0.25}Ag_{0.07}Fe_{0.1}Cu_{0.07}Sn_{0.03} – золотосвинцовый сплав;

б – Au_{0.75}Pb_{0.12}Ag_{0.07}Cu_{0.02}Sn_{0.02}Hg_{0.01}Fe_{0.01} – свинцово-золотой сплав;

в – Au_{0.81}Ag_{0.15}Pb_{0.02}Cu_{0.01}(Hg,Sn,Fe)_{0.01} – среднепробное золото с примесями ряда элементов.

Сфероидные формы минералов в живой природе. Металлосиликатные шарики из желудочно-кишечного тракта плоского морского ежа

Этот краткий материал приведен, чтобы показать, что даже в живой природе вещество часто приобретает сфероидные формы. Так, при изучении продуктов переработки в желудочно-кишечном

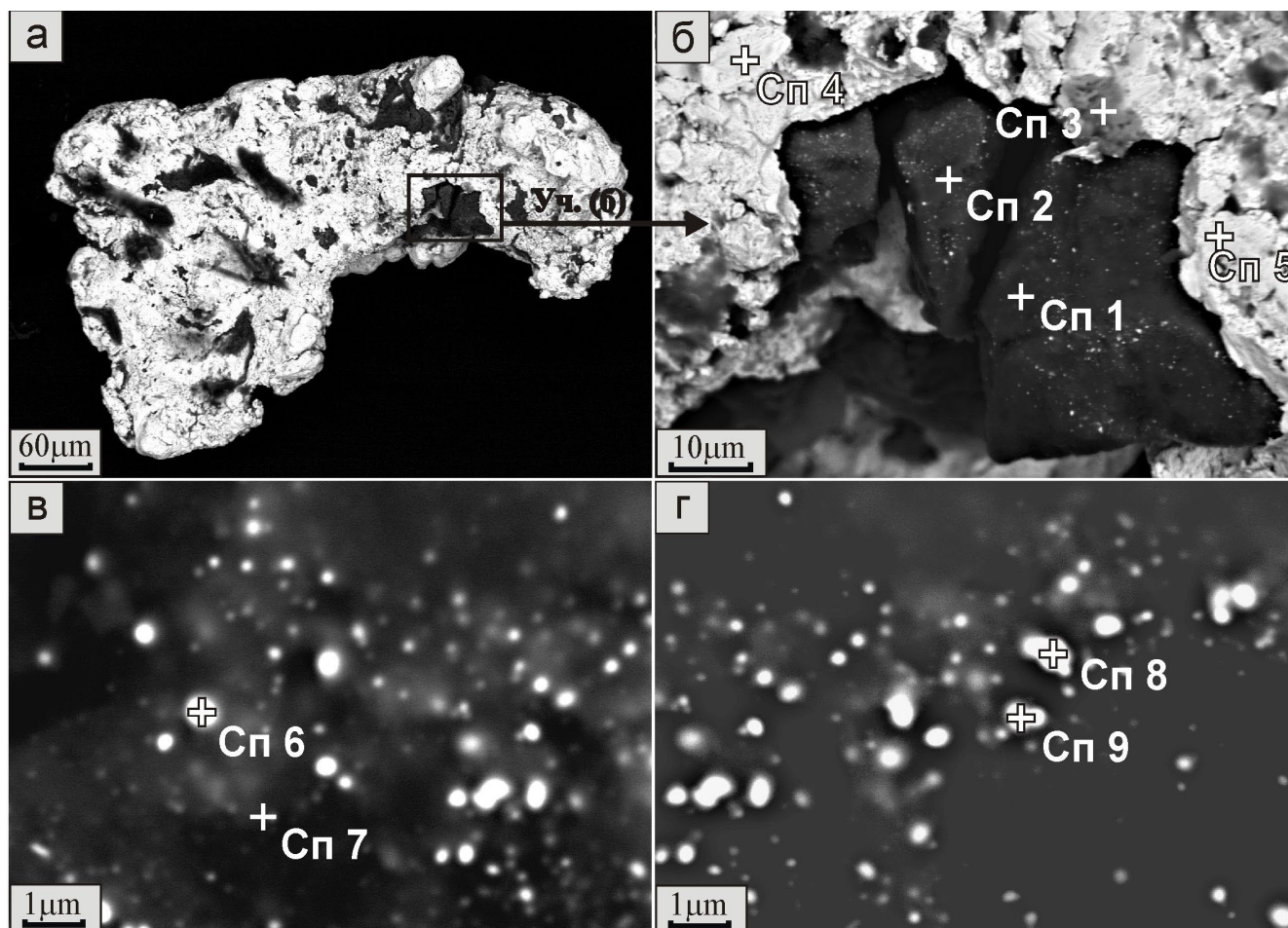


Рис. 10. Самородное золото (а) и участки метасоматической породы (б–г) с включениями сфероидного золота при различных увеличениях. Снято в BSE.

Fig. 10. Native gold (a) and sites of metasomatic rock (б–г) with spheroidal gold inclusions at various increases. Shot in BSE.

Таблица 8. Состав фаз в зерне самородного золота и сфероидных частиц золота (см. рис. 10б–г), мас. %

Table 8. Phase composition in native gold grains and spheroidal gold particles (see Fig. 10б–г), wt %

Спектр	O	Na	Mg	Al	Si	Cl	Ca	K	Ti	Fe	Cu	Au	Hg
1	56.48	0.31	0.49	18.29	17.61	0.35	1.32	–	0.64	1.11	–	2.28	1.12
2	52.27	0.21	0.11	16.75	15.77	0.36	–	–	1.95	1.18	–	10.42	0.97
3	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	100.00	–	–
4	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	80.34	19.66
5	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	71.93	28.07
6	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	1.09	98.91	–
7	50.82	0.34	0.23	17.91	16.94	0.30	–	0.24	3.15	1.36	–	7.92	0.79
8	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	1.34	98.66	–
9	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	1.00	99.00	–

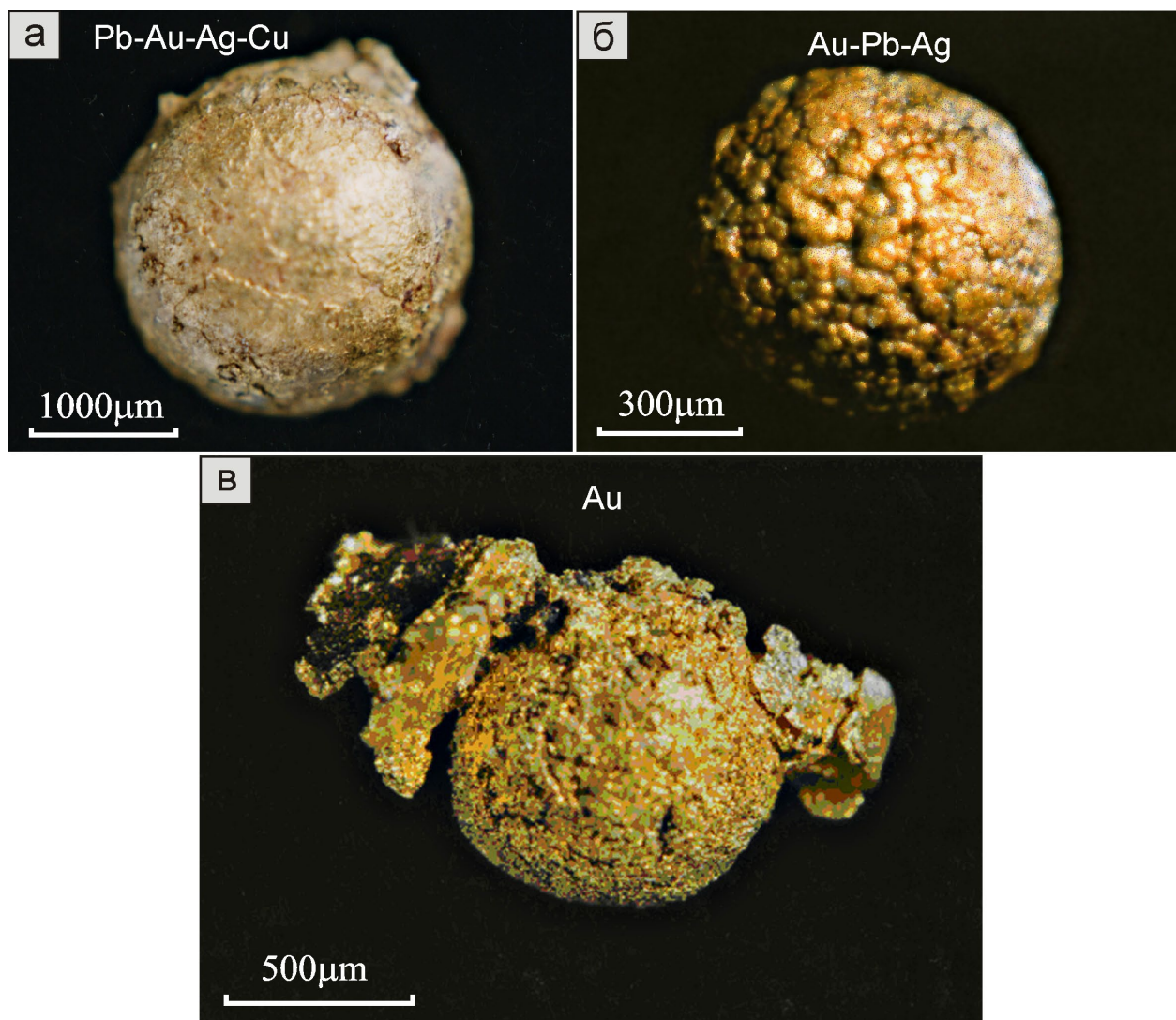


Рис. 11. Сфероидные образования – продукты экспериментов по обогащению и концентрированию рудных элементов. Снято в BSE.

а – свинцовый шарик, обогащенный Au, Ag, Cu и другими элементами; б – низкопробный золотой шарик, обогащенный Pb, Ag и другими элементами и состоящий из многочисленных сфероидных обособлений; в – шарик высокопробного золота с пластинчатыми наростами одноименного состава на нем.

Fig. 11. Spheroidal formations - products of enrichment experiments and concentration of ore elements. Shot in BSE.

а – lead ball enriched Au, Ag, Cu, etc. elements; б – base gold ball enriched with Pb, Ag, etc. by elements, and consisting of numerous spheroidal detachments; в – a ball of high-grade gold with plate-like derivations of the same composition on it.

тракте плоского морского ежа (Елькин и др., 2013) обнаружены шаровидные металлосиликатные образования размером от 10 до 25 мкм, содержащие многочисленные микрочастицы серебра (рис. 12).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В целом изученные образования по химическому составу подразделяются на металлические, металлоидные, металлооксидные, силикатные и ме-

таллосиликатные. Размеры сфероидов (в диаметре), укладываемые в нанометровый диапазон, составляют ~от 50 до 500–600 нм, в микрометровом диапазоне – от нескольких десятков до сотен микрометров, самые крупные могут достигать ≈1–2 мм.

Группу металлических и металлоидных сфероидальных и близких к ним по форме образований из техногенных россыпей НЗУ Приамурья в качестве примера представляют два подобных объекта – свинцовый (см. рис. 1) и сурьмяной (см. рис. 2),

Таблица 9. Элементный состав новообразованных золотосодержащих сфероидов (исходный материал – отходы шлихообогащательной фабрики, Софийский золотоносный узел, Приамурье) по данным ААА (см. рис. 11), мас. %

Table 9. The elemental composition of the newly formed gold-containing spheroids (starting material waste from the grinding and concentrating factory, Sofia gold-bearing unit, Amur region) according to AAA (see Fig. 11), wt %

Рис. 11	Состав	Au	Ag	Pb	Cu	Sn	Hg	Fe	∑ эл-в
а	Pb-Au-Ag-Cu	29.60	4.84	56.57	2.53	2.00	0.10	3.22	1.23
б	Au-Pb-Ag	68.03	3.28	11.29	0.74	1.00	1.00	0.32	14.34
в	Au	81.65	8.18	1.71	0.41	0.05	1.50	0.07	6.43

Примечание. ∑ эл-в – сумма примесных элементов Ni, Bi, Sb, Na, Cr, Co, Pt, Pd, Ir, Rh, Ru, K, Mn, Mg, Zn, Ca, Si, Cd, Al, Sr.

Note. ∑ эл-в – sum of impurity elements Ni, Bi, Sb, Na, Cr, Co, Pt, Pd, Ir, Rh, Ru, K, Mn, Mg, Zn, Ca, Si, Cd, Al, Sr.

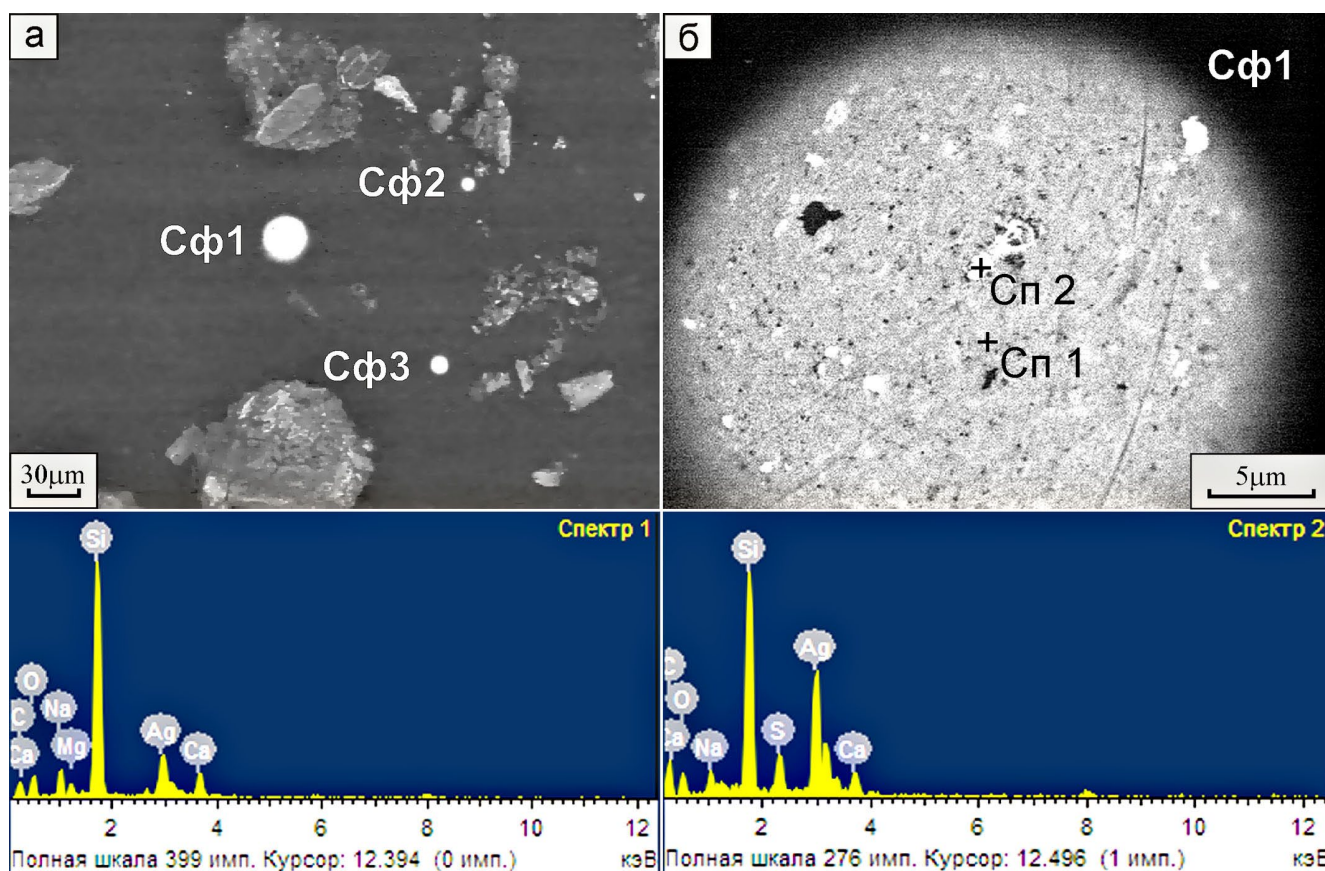


Рис. 12. Сфероидные Ag-содержащие образования (Сф1, Сф2, Сф3) – продукты переработки желудочно-кишечным трактом плоского морского ежа (а) и сфероид 1 при большем увеличении с точками EDX анализа (б). Снято в BSE.

Под снимками приведены соответствующие спектры.

Fig. 12. Spheroidal Ag-containing formations (Sf1, Sf2, Sf3) – products processing gastrointestinal tract flat sea urchin (a) and spheroid 1 with a greater increase with points of EDX analysis (b). Shot in BSE.

The corresponding spectra is shown below the images.

выделенные из шлихов повторно переработанной россыпи р. Некля. В их составе есть сходные черты: в свинцовом шарике содержится сурьма, а на

сурьмяном шарике запечатлены фазы, содержащие свинец. Из этого может следовать вывод о том, что источник их происхождения единый. Растворы, из

которых они кристаллизовались, содержали, наряду с другими рудными компонентами (в том числе благородными), комплексы свинца и сурьмы. Во всех сфероидедах в том или ином количестве присутствует углерод, из чего можно сделать вывод, что данный элемент, так же как Pb, Sb, Cl и др., участвовал в образовании установленных фаз. Наличие различных алюмосиликатных включений и новообразованных С-Pb-Sb и С-Pb-Cl микрошаров на поверхности сфероидов свидетельствует о вторичных процессах, происходящих в россыпи, в результате которых они образовались (Гамянин и др., 2000). Кроме того, нельзя исключать и механическую обработку ковких материалов в россыпи, о чем свидетельствуют вмятины и включения других минералов на поверхности сфероидов (см. рис. 1–3).

Следует отметить, что в процессе окислительно-восстановительных реакций в техногенных россыпях происходит разрушение рудных минералов с образованием оксидов и гидроксидов металлов и частичным восстановлением до самородного металла (Myagkaya et al., 2016). Этим процессам способствует деструкция органического вещества, заболоченность и отсутствие кислорода.

Органический/неорганический углерод, повсеместно присутствующий в составе сфероидов, являлся восстановителем при их формировании. Свинцово-углеродистые пленки на поверхности сурьмяных сфероидов, вероятно, играли роль осадителя и (или) точек роста для новообразованных С-Pb-Sb и С-Pb-Cl микрошаров (см. рис. 2).

В то же время часть сфероидов, в основном мономинеральных (см. рис. 3а–в; рис. 4), представляющих собой металлооксиды и силикаты из палеороссыпи и гранитоидов НЗУ, возможно, образовались в результате газового метаморфизма (Новгородова и др., 1989). Подобные природные гидротермально-металлургические процессы, при которых возможны капельножидкое состояние вещества и (или) высокое давление газово-флюидной фазы, приводящие к образованию сфероидальных форм минералов, описаны в работах (Гамянин и др., 2000; Гамянин, Жданов, 2001; Гебенников, 2011; Прибавкин и др., 2023; Маршинцев и др., 2018; Рычагов и др., 1996). Наличием выходов гранитоидов подтверждается вероятность подобного процесса.

Возможно, магматогенные процессы привели к образованию металлических сфероидов из россыпи Уркима (см. рис. 5–8). Судя по составу изученных сфероидов (Fe; Fe,Cr,Cu; Fe,Cr,Ni,Mn) и составу обнаруженных в них фаз, они, по-видимому, образовались в высокотемпературной гидротермальной системе предполагаемого коренного источника. В их образовании, по всей вероятности, участвовали газонасыщенные флюиды с температурой не ниже 500°C (Тян и др., 1976; Малич и др.,

1991; Рычагов и др., 1996; Пушкарев др., 2002; Новоселов, 2015; Кориневский и др., 2018). Впоследствии в результате частичного разрушения рудоносной жилы шарики попали в россыпь. Сразу отметим, что матрица сфероидов не содержит золота. А это означает, что рудоносные Fe-содержащие и Au-содержащие жилы были разнесены в пространстве, а возможно, и во времени, хотя их содержимое со временем оказалось в одной и той же россыпи. Это согласуется с тем, что, как уже отмечалось ранее, УЗУ характеризуется наличием рудопроявлений железа, титана, золота и других металлов (Мельников и др., 2006; Кошеленко и др., 2020).

Если пока не принимать во внимание выделения на поверхности сфероидов ртутистого золота, которые, очевидно, образовались в последующий период после попадания этих объектов в россыпь, а все внимание сосредоточить непосредственно на первичном составе шариков, то можно заключить следующее. Все они, за исключением чисто железного сфероидеда 3, представляют собой сплавы Fe-Cr-Ni-Mn и Fe-Cr-Cu с преимущественным содержанием в них железа. В этих сфероидедах встречаются фазы-включения углеродистого вещества С*, С**, С*** с содержанием углерода в них 25.85, 84.60 и 55.34 мас. % соответственно. В сфероиде 2 в одном из участков зафиксированы агрегаты железвольфрам-сурьмяного оксида (Fe,W,Sb,O), а в сфероиде 4 – фаза-включение кристалла сурьмяно-железистого оксида (Sb,Fe,O)*, вероятно, трипугиита – тетрагонального минерала со структурным типом рутила. Кроме того, во всех шариках в кристаллической структуре матрицы содержится атомарный углерод, концентрации которого колеблются в пределах ≈2–28 мас. %. Все приведенное выше может свидетельствовать о сложном составе гидротермальных растворов, из которых они кристаллизовались. Основными рудоносными комплексами во флюидах были, очевидно, комплексы металлов Fe, Cr, Ni, Mn, Cu, W, Sb и углерод (последний, вероятно, в виде углеводородных газов).

Теперь о факторах, обеспечивающих формирование сфероидов. Один из них, самый главный, связан с процессами кристаллизации из высокотемпературных флюидов, насыщенных газами (Рычагов и др., 1996), прежде всего углеводородными, поскольку в сфероидедах отмечаются высокие содержания элементного углерода. Вероятно, центрами кристаллизации (зародышеобразования) становились пузырьки такого газа, при схлопывании (кавитации) (Новгородова и др., 2003; Галимов и др., 2004) которых и возникающей в этот момент в локальных местах турбулентности (завихрения) (Брэдшоу, 1974; Обухов, 1988; Фрик, 2010) уже изначально зарождались ничтожно малые частицы округлой (или близкой к ней) формы. Затем за счет самоэпитаксии происходило наращивание кристаллического объекта и формирования

ние им наиболее выгодной сфероидальной формы (Адамсон, 1979; Железняк, Иоффе, 1974), обладающей минимальной поверхностной энергией. При этом кристаллизации также способствовали восстановительные свойства углерода, присутствующего во флюиде.

Другой фактор связан с гипергенными процессами: а) разрушение одних и образование других минералов; б) отложение на поверхности вторичных ксеноморфных, изометричных и шаровидных выделений ртутистого золота, а также других минералов (типа трипугиита); в) механическое воздействие при перемещении водными потоками, приводящее к частичному истиранию и возникновению следов волочения и наклепа.

Обращает на себя внимание то, что ртутистое золото при более высоком содержании в нем Hg приобретает форму идеальных шариков (см. рис. 7б). То есть высокое содержание в этом соединении ртути, обладающей высокой смачиваемостью по отношению к золоту, способствует формированию на поверхности железистого сфероидальных образований ртутистого золота.

Следует отметить, что в углеродистых включениях, содержащихся в сфероидах, есть примеси серы (S) и хлора (Cl), что может свидетельствовать об участии этих элементов в комплексообразовании.

Сфероидальные частицы золота нанометровых размеров обнаружены в породе, ассоциирующей с золотом из коры выветривания ОЗУ (см. рис. 9, 10). Их состав высокопробный – $\approx 990\text{--}1000\%$. Минеральная матрица, по-видимому, представляет собой тонкодисперсную смесь глинистых минералов (см. табл. 7, 8), дефектность которых играла роль геохимических барьеров для образования наносфероидов золота (Сафронов, 2023). Толчком к начальному образованию округлых форм служили вакансии, группы вакансий (пустоты) в кристаллической структуре матрицы, которые близки к сферической форме и в которых нарушены химические связи. При подпитке растворами благородных компонентов в этой рыхлой матрице происходил рост частиц Au с приобретением сферичности, обладающей минимальной поверхностной энергией. Видимо, в этой гетерогенной системе с ансамблем частиц Au нанометрового диапазона в конечном счете достигалось термодинамическое равновесие. Там же, наряду с видимыми частицами золота, фиксируется EDX-анализом невидимое ультратонкое золото, состоящее, по-видимому, из кластеров Au и Au-Hg, иногда с примесью Ag. Подобные кластеры могут являться своего рода зародышами для образования нано-, микро- а затем и макроминералов (Асхабов, 2005, 2011). Причем эти ртутисто-золотые соединения нанометрового уровня, вероятно, аналогичны тем микрофазам, которые были установлены в самородном золоте техногенных россыпей (Сафронов, Кузнецова, 2017).

Обращают на себя внимание сфероиды (шары), полученные искусственным путем при экспериментальной обработке рудных шлихов (см. рис. 11а–в). Опыты показывают, что в ходе расплавления и последующего концентрирования рудных элементов полученные продукты часто приобретают сфероидную форму. Причем в зависимости от конечного состава микроструктура этих объектов формируется разная. У сфероидов, в составе которых превалирует свинец, поверхность более гладкая (см. рис. 9а). У сфероидов с наибольшим содержанием Au поверхность имеет мелкодисперсную структуру, т.е. состоящую из мельчайших частиц размером в единицы и даже десятки микрометров (см. рис. 9в). Наиболее специфическую микроструктуру поверхности имеет сфероид, содержащий Au $\approx 68\%$ (см. рис. 9б), и в нем самая высокая концентрация примесных элементов. Чем больше содержание в сфероиде примесей, тем крупнее у него микроструктура, а чем меньше концентрация примесных элементов, тем более гладкая поверхность.

Предлагается к рассмотрению один из возможных механизмов формирования сфероидов, образующихся во время опытов по обогащению рудного вещества. Учитывая большое различие шариков по составу, а в особенности по суммарному количеству примесных элементов (см. табл. 9), напрашивается следующий вариант их образования. При остывании золотоносного расплава происходит его расслоение (распад) на наноуровне: те атомы примесных элементов, которые не могут изоморфно входить в атомно-кристаллическую структуру вновь образованного золотоносного твердого раствора, будут группироваться в кластеры, и чем большая концентрация примесей в расплаве, тем крупнее эти кластеры. Последние становятся центрами кристаллизации золотоносного вещества. При дальнейшем остывании происходит эпитаксиальное нарастание на них атомов благородных и родственных им элементов, частицы приобретают округлые (или близкие к ним) формы с наименьшей поверхностной энергией (Адамсон, 1979). Одновременно с этим за счет неравновесного процесса самоорганизации вещества, состоящего из множества округлых частиц, т.е. в соответствии с законом синергетики (Летников, 1992; Хакен, 1986, 2014; Николис, Пригожин, 1979; Пригожин, Стенгерс, 1986), происходит формирование более крупных энергетически устойчивых сфероидов, также обладающих минимальной поверхностной энергией. Это мы и наблюдаем в ходе опытов. При всем этом немалую роль играла ртуть, небольшие количества которой (в одном случае 0.1 мас. %, в других 1.0 и 1.5 мас. %) входили в состав расплава. Этот элемент, обладая высокой смачиваемостью (и капиллярной постоянной) по отношению к золоту, способствовал слипанию нарастающих

частиц. По существу, здесь имеем дело с неравновесным процессом роста агрегированной (поликристаллической) частицы (шарика) с участием активных адсорбционных явлений, включающих и процесс амальгамации.

Относительно биогенных сфероидов отметим, что минеральные частицы в результате неравновесного биогенеза (Масленникова и др., 2015; Шадрина и др., 2022) часто приобретают сферическую форму, поскольку задача организма – выделить продукты жизнедеятельности в максимально компактном виде, с минимальной поверхностью контакта с живой клеткой, а это сфера.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в зависимости от обстановки, в которой формировались изучаемые сфероиды, действовали различные факторы, обуславливающие образование округлых форм минерального вещества.

1. Газовый метаморфизм – природный гидротермально-металлургический процесс, приводящий к образованию сфероидальных форм минералов.

2. Кластерное формирование агрегированных (поликристаллических) шариков в условиях неравновесного процесса самоорганизации частиц вещества.

3. Геохимические барьеры, которые становились центрами зарождения сфероидальных наночастиц золота; в итоге за счет достижения термодинамического равновесия в этой гетерогенной системе формировался целый ансамбль округлых наночастиц золота.

4. Вторичные процессы, влияющие на состояние поверхностного слоя сфероидальных частиц после формирования их основного состава: а) гипергенез, ведущий к разрушению одних и образованию других минералов; б) механическая обработка ковких материалов в россыпях.

5. Неравновесный биогенез (для биоорганизмов).

В целом типоморфные признаки изученных сфероидов указывают на основные механизмы их образования. И, несмотря на различия, во всех случаях действует закон минимизации потенциальной энергии при образовании округлых форм.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Адамсон А. (1979) Физическая химия поверхностей. М.: Мир, 568 с.
- Асхабов А.М. (2011) Кватаронная концепция: основные идеи и некоторые приложения. *Изв. Коми НЦ УрО РАН*, **3**(7), 70-77.
- Асхабов А.М. (2005) Кватаронная модель образования фуллеренов. *Физика твердого тела*, **47**(6), 1147-1150.
- Баженов А.И., Полуэктова Т.И., Новоселов К.Л. (1991) Ферротитанистые оксидные глобулы из гранитоидов Элекмонарского массива. *Геология и геофизика*, (12), 50-57.
- Бердников Н.В., Невструев В.Г., Кепежинская П.К., Крутикова В.О., Коновалова Н.С., Астапов И.А. (2021) Силикатные, железо-окисные и золото-медь-серебряные микросферулы в рудах и пирокластике Костеньгинского железорудного месторождения (Дальний Восток России). *Тихоокеан. геол.*, **40**(3), 67-84.
- Брэдшоу П. (1974) Введение в турбулентность и ее измерение. (Пер. с англ. В.Ф. Алымова, В.В. Альтова, В.С. Войтешонка, А.М. Дуюбинского, А.М. Кудина. Под ред. Г.С. Глушко). М.: МИР, 278 с.
- Галимов Э.М., Кудин А.М., Скоробогатский В.Н., Плотниченко В.Г., Бондарев О.Л., Зарубин Б.Г., Страздовский В.В., Аронин А.С., Фисенко А.В., Быков И.В., Баринов А.Ю. (2004) Экспериментальное подтверждение синтеза алмаза в процессе кавитации. *Докл. РАН*, **395**(2), 187-191.
- Гамянин Г.Н., Жданов Ю.Я. (2001) Сфероиды золота и сульфидов в рудопроявлении Интаховского рудного узла (Верхне-Индигорский район, Якутия). *Докл. РАН*, **377**(5), 663-666.
- Гамянин Г.Н., Жданов Ю.Я., Мойсенко В.Г. (2000) Природные и техногенные сфероиды минералов. *Тихоокеан. геол.*, **19**(4), 52-60.
- Главатских С.Ф., Генералов М.Е. (1996) Когенит из минеральных ассоциаций, связанный с высокотемпературными газовыми струями БТТИ (Камчатка). *Докл. АН*, **346**(6), 796-799.
- Грачев А.Ф., Цельмович В.А., Корчагин О.А. (2008) Космическая пыль и странные шарики в древних земных слоях. *Земля и Вселенная*, (5), 59-67.
- Гребенников А.В. (2011) Эндогенные сферулы мелпалеогеновых игнимбритовых комплексов Якутинской вулcano-тектонической структуры (Приморье). *Зап. Росс. Минералог. об-ва*, **140**(3), 56-68.
- Елькин Ю.Н., Сафронов П.П., Артюков А.А., Карабцов А.А. (2013) Деструкция минералов морского дна в кишечнике плоского морского ежа *Scaphechinus mirabilis* Agazzis, 1863 (Echinodea: scutellidae). *Докл. РАН*, **453**(4), 1-5.
- Ермолов П.В., Королюк В.Н. (1978) Состав и строение магнитных шариков гранитоидов. *Докл. АН СССР*, (240)1, 155-158.
- Железняк А.С., Иоффе И.И. (1974) Методы расчета многофазных жидкостных реакторов. Л.: Химия, 320 с.
- Захарова Е.М. (1997) Ферромагнитные сферулы в терригенных отложениях и россыпях. *Зап. РМО*, (126)3, 61-66.
- Кориневский В.Г., Кориневский Е.В., Блинов И.А., Котляров В.А. (2018) Металлические микросферулы в карбонатитах Южного Урала. *Вестн. ИГ Коми НЦ УрО РАН*, (10), 39-46.
- Корчагин О.А. (2010) Присутствие микрокристаллических микросфер и микрочастиц в раннем сеномане Крыма – “космическое пылевое событие”. *Докл. РАН*, (431)6, 733-738.
- Корчагин О.А., Цельмович В.А., Дубинина С.В. (2007) Метеоритные микросферы и частицы из глубоководных известняков верхнего кембрия (Батырбай, Южный Казахстан). *Изв. вузов. Геол. и разведка. Минералогия, петрография, литология*, (3), 17-22.
- Кощеленко В.В., Волкова Ю.Р., Мясик А.В. и др. (2020) Государственная геологическая карта Российской Федерации м-ба 1 : 200 000. Изд-е второе. Сер. Становая. Лист N-51-X (Усть-Уржима). Объяснит. запи-

- ска [Электронный ресурс]. Минприроды России, Роснедра, ВСЕГЕИ, 257 с.
- Кузнецова И.В. (2011) Геология, тонкодисперсное и наноразмерное золото в минералах россыпей Нижнеселемджинского узла (Приамурье). Автореф. ... канд. геол.-мин. наук. Красноярск: СФУ, 21 с.
- Кузнецова И.В., Сафронов П.П. (2021) Самородное золото кор выветривания Нижнеселемджинского золотоносного узла (Приамурье). *Литосфера*, **21**(2), 239-255.
- Кузнецова И.В., Сафронов П.П., Моисеенко Н.В. (2019) Вещественно-минеральная характеристика россыпей – потенциальных источников благородного металла (на примере Нижнеселемджинского золотоносного узла Приамурья, Россия). *Георесурсы*, **21**(1), 2-14.
- Кузнецова И.В., Сафронов П.П., Моисеенко Н.В., Харитонов В.И. (2015) Особенности самородного микро- и нанозолота в зоне гипергенеза (Приамурье). *Естеств. и техн. науки*, **11**(89), 225-230.
- Летников Ф.А. (1992) Синергетика геологических систем. Новосибирск: Наука, 230 с.
- Лукин А.Е. (2013) Минеральные сферулы – индикаторы специфического флюидного режима рудообразования и нефтидогенеза. *Геофиз. журн.*, **(35)**6, 10-53.
- Малич К.Н., Рудашевский Н.С., Соколова Н.И. (1991) Микросферулы из ультрабазитов концентрически-зональных массивов Алданского щита, их генетическое и прикладное значение. *Минералог. журн.*, **(13)**4, 52-71.
- Маршинцев В.К., Яценко И.Г., Зинченко В.Н. (2018) Силикатные сферулы из кимберлитовых и лампроитовых формаций мира. *Наука и техника в Якутии*, **(35)**2, 7-11.
- Масленникова А.В., Блинов И.А., Удачин В.Н. (2015) Фрамбоидальный пирит в донных отложениях озер Южного Урала. Миасс: ИМин УрО РАН, 215-218.
- Мельников В.Д., Мельников А.В., Ковтонюк Г.П. (2006) Россыпи золота Амурской области. Благовещенск: АмГУ, 297 с.
- Моисеенко В.Г. (2007) От атомов золота через кластеры, нано- и микроскопические частицы до самородков благородного металла. Благовещенск: ДВО РАН, Амурское отд-е РМО, 187 с.
- Моисеенко В.Г., Кузнецова И.В. (2010) Роль наночастиц золота, серебра и свинца в образовании месторождений благородных металлов. *Докл. АН*, **430**(3), 377-381.
- Моисеенко В.Г., Моисеенко Н.В., Сафронов П.П. (2010) Наноразмерное золото в рудах Покровского месторождения. *Докл. АН*, **435**(4), 527-530.
- Моисеенко Н.В., Сафронов П.П. (2012) Наноминералы золота в рудах Покровского месторождения. *Современные проблемы связи геодинамики, магматизма и оруденения*. Мат-лы науч. конф. Ташкент: Изд-во "Фан" АН РУЗ, 243-244.
- Моисеенко Н.В., Сафронов П.П., Воропаева Е.Н. (2013) Особенности самородного золота месторождения Пионер (Приамурье). *Естеств. и техн. науки*, **1**(63), 136-139.
- Моисеенко В.Г., Сафронов П.П., Моисеенко Н.В. (2010) Электронномикроскопическое изучение нанозолота в минералах Покровского месторождения Средне-го Приамурья. *XXIII Росс. конф. по электронной микроскопии*. Тез. докл. Черногловка, 303 с.
- Николис Г., Пригожин И. (1979) Самоорганизация в неравновесных системах: От диссипативных структур к упорядоченности через флуктуации. М.: Мир, 512 с.
- Новгородова М.И., Андреев С.Н., Самохин А.А., Гамянин Г.Н. (2003) Кавитационные эффекты в образовании минеральных микросферул в гидротермальных растворах. *Докл. РАН*, **(389)**5, 669-671.
- Новгородова М.И., Боярская Р.В., Юсупов Р.Г. (1989) Рост и коррозия самородного цинка в газовой среде. *Зап. Всесоюз. минер. об-ва*, **115** (1), 16-25.
- Новгородова М.И., Гамянин Г.Н., Жданов Ю.Я., Агаханов А.А., Дикая Т.В. (2003) Микросферулы алюмосиликатных стекол в золотых рудах. *Геохимия*, (1), 83-93.
- Новоселов К.Л. (2015) Генетические особенности самородного железа и продуктов его окисления в девонских гранитоидах алейско-змеиногорского комплекса (северо-западная часть Рудного Алтая). *Изв. Томск. политехн. ин-та. Инжиниринг георесурсов*, **(326)**9, 56-67.
- Обухов А.М. (1988) Турбулентность и динамика атмосферы. Л.: Гидрометеиздат, 414 с.
- Орлова Н.И. (1995) Карта кор выветривания Амурской области масштаба 1:500.000. М.: ВИМС, 329 с.
- Палажченко В.И., Неронский Г.И. (2006) Минеральные сфероиды. *Федоровская сессия*. Тез. докл. Междунар. науч. конф. СПб., 29-31.
- Прибавкин С.В., Пушкарев Е.В., Ханьжин А.С., Чебыкин Н.С. (2023) Минералогия сульфидных глобул а пироксенитах Шигирских сопок Уфалейского комплекса, Южный Урал. Ультрамафит-мафитовые комплексы: геология, строение, рудный потенциал. *Мат-лы VIII Всеросс. науч. конф.* Новосибирск: Изд-во ННИГУ, 152-153.
- Пригожин И., Стенгерс И. (1986) Порядок из хаоса. Новый диалог человека с природой. М.: Прогресс, 432 с.
- Пушкарев Е.В., Аникина Е.В., Гарути Дж., Заккарини Ф., Кононкова Н.Н. (2002) Металлические и силикатно-оксидные сферулы из ультраосновных пегматитов в дунитах Нижнетагильского платиноносного массива на Среднем Урале (первые данные). *Докл. РАН*, **383**(1), 90-94.
- Рудашевский Н.С., Дмитренко Г.Г., Мочалов А.Г., Меньшиков Ю.П. (1987) Самородные металлы и карбиды в альпинотипных ультрамафитах Корякского нагорья. *Минералог. журн.*, **9**(4), 71-82.
- Рычагов С.Н., Главатских С.Ф., Сандиминова Е.И. (1996) Рудные и силикатные магнитные шарики как индикаторы структуры, флюидного режима и минералорудообразования в современной гидротермальной системе Баранского (о-в Итуруп). *Геол. руд. месторожд.*, **(38)**1, 31-40.
- Сандиминова Е.И. (2008) Сферические минеральные образования вулканических пород Курильских островов и Камчатки. Автореф. дисс. ... канд. геол.-мин. наук. Владивосток, 25 с.
- Сандиминова Е.И., Главатских С.Ф., Рычагов С.Н. (2003) Магнитные сферулы из вулканогенных пород Курильских островов и Южной Камчатки. *Вестн. КРАУНЦ*, (1), 135-140.
- Сафронов П.П. (2023) О происхождении наноразмерного золота в природе. *Геологические процессы в обстановках субдукции, коллизии и скольжения литосферных плит*. Мат-лы VI Всеросс. науч. конф. Владивосток: Изд-во ДВФУ, 442-446.

- Сафронов П.П. (2011) Способ проведения на SEM с EDX-спектрометрией приближенно количественных рентгеноспектральных измерений состава наноразмерных минеральных фаз. *VII Всеросс. конф. по рентгеноспектральному анализу. (г. Новосибирск, 19–23 сентября 2011г.)*. Тез. докл. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 71.
- Сафронов П.П., Гаврилов А.А., Максимов С.О. (2009) Микроструктуры поверхности Fe-оксидных сфероидов из базитовых комплексов острова Попова (Приморье). *Мат-лы XVI РЭМ-2009*. Черногловка, 206.
- Сафронов П.П., Кузнецова И.В. (2021) Аутигенное минералообразование как объективный фактор трансформации техногенных россыпей. *Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири*, **3**(47), 83-93.
- Сафронов П.П., Кузнецова И.В. (2016) Нанозолото в породах, ассоциирующих с самородным золотом в техногенных россыпях Приамурья. *Вопросы геологии и комплексного освоения природных ресурсов Восточной Азии*. IV Всеросс. науч. конф. Благовещенск: ИГиП ДВО РАН, 112-115.
- Сафронов П.П., Кузнецова И.В. (2017) Особенности состава самородного золота техногенных россыпей на примере Нижнеселенгинского золотоносного узла (Приамурье). *Изв. Томск. политехн. ун-та. Инжиниринг георесурсов*, **328**(2), 46-58.
- Сафронов П.П., Максимов С.О., Чекрыжов И.Ю. (2024) Сферические формы вещества в минеральных комплексах Приморья. *Вестн. ДВО РАН*, (5), 103-123.
- Сафронов П.П., Моисеенко Н.В., Моисеенко В.Г. (2011) Наноразмерное самородное золото в минералах месторождения Пионер (Приамурье) по данным электронномикроскопических исследований. *Мат-лы XVII РЭМ-2011*. Черногловка, 206.
- Сафронов П.П., Сахно В.Г. (2012) Результаты электронномикроскопического изучения микроструктуры и состава Fe-оксидных сфероидов метеоритного происхождения. *XXIV РКЭМ-12*. Тез. докл. Черногловка, 375-376.
- Силаев В.И., Карпов Г.А., Аникин Л.П., Вергасова Л.П., Филлипов В.Н., Тарасов К.В. (2019) Минерально-фазовый парагенезис в эксплозивных продуктах современных извержений вулканов Камчатки и Курил. Ч. 2. Минералы-спутники алмазов Толбачинского типа. *Вулканология и сейсмология*, (6), 36-49.
- Силаев В.И., Чайковский И.И., Харитонов Т.В., Филлипов В.Н., Хазов А.Ф. (2009). К проблеме атипичных и нетрадиционных минералов-спутников алмаза (на примере Урала). Сыктывкар: Геопринт, 65 с.
- Сорокин А.П. (1989) Морфоструктуры и россыпи золота Приамурья. Дисс. ... докт. геол.-мин. наук. Благовещенск: АмурКНИИ, 394 с.
- Сунгатуллин Р.Х., Сунгатуллина Г.М., Закиров М.И., Цельмович В.А., Глухов М.С., Бахтин А.И., Осин Ю.Н., Воробьев В.В. (2017) Микросферы космического происхождения в каменноугольных породах разреза Усолка, Предуральский прогиб. *Геология и геофизика*, (58)1, 74-85.
- Татаринцев В.И., Цымбал С.Н., Гаранин В.К. (1983) Закаленные частицы из кимберлитов Якутии. *Докл. РАН*, (270)5, 1199-1203
- Томиленко А.А., Ковязин С.В., Похиленко Л.Н., Соболев Н.В. (2011) Силикатные глобулы в кианите гроспидитов из кимберлитовой трубки Загадочная, Якутия: проблема происхождения. *Докл. РАН*, (436)2, 243-246.
- Трубкин Н.В., Горшков А.И., Некрасов И.Я. (1983) Строение и состав сферических магнитных образований из аллювия Северо-Востока СССР. *Докл. АН СССР*, (269)6, 712-714.
- Тян В.Д., Ермолов П.В., Попов Н.В., Рафиков Т.К. (1976) О магматической природе самородного железа в гранитоидах и продуктах его окисления. *Геология и геофизика*, (5), 48-54.
- Филимонова Л.Г., Арапова Г.А., Боярская Р.В., Трубкин Н.В. (1989) О типоморфных особенностях магнитных сферул орогенных вулканитов Южного Сихотэ-Алиня. *Тихоокеан. геол.*, (4), 78-84.
- Филимонова Л.Г., Трубкин Н.В., Бортников Н.С. (2003) Наночастицы рудных минералов в рассеянной мнометальной минерализации Дукацкого рудного района (Северо-Восток России). *Докл. РАН*, (392)4, 521-525.
- Флоренский К.П., Иванов А.В., Ильин Н.П. (1968) Химический состав космических шариков из района Тунгусской катастрофы и некоторые вопросы дифференциации вещества космических тел. *Геохимия*, (10), 1163-1173.
- Фрик П.Г. (2010) Турбулентность: подходы и модели. Изд. 2-е, испр. и доп. М.; Ижевск: НИЦ, Регулярная и хаотическая динамика, 332 с.
- Хакен Г. (2014) Информация и самоорганизация. Макроскопический подход к сложным системам. М., 317 с.
- Хакен Г. (1986) Синергетика. М.: Прогресс, 405 с.
- Цельмович В.А., Корчагин О.А., Некрасов А.Н., Старченко С.В. (2010) Диагностика происхождения магнитных микросфер. Палеомагнетизм и магнетизм горных пород. *Мат-лы Междунар. семинара по проблемам палеомагнетизма и магнетизма горных пород*. СПб.: Петродворец, 165-171.
- Чайковский И.И., Коротченкова О.В. (2012) Эксплозивные минеральные фазы алмазных вишеритов Западного Урала. *Литосфера*, (2), 125-140.
- Шадрина О.С., Кондратьева Л.М., Литвиненко З.Н., Голубева Е.М., Крутикова В.О. (2022) Образование сфероидов in vitro при участии микроорганизмов кастовых спелеотем. *Speleol. Spelestol.*, (2), 34-42.
- Шумилов Т.Г., Юшкин Н.П., Пушкарев Е.В. (2007) Серебряные сфероиды в графитоносных породах Максютовского комплекса, Южный Урал. *Докл. РАН*, **417**(5), 682-684.
- Myagkaya I.N., Lazareva, E.V., Gustaytis, M.A., Zhmodik S.M. (2016) Gold and Silver in a system of sulfide tailings. Pt 2. Reprecipitation on natural peat. *J. Geochem. Explor.*, (165), 8-22. DOI: 10.1016/j.geochem.2016.01.016
- Nystrom J.O., Henriquez f., Naranjo J.A., Nasuland R. (2016) Magnetite spherules in pyroclastic iron ore at El Laco, Chile. *Amer. Miner.*, (101), 587-595.

REFERENCES

- Adamson A. (1979) Physical chemistry of surfaces. Moscow, Mir Publ., 568 p. (In Russ.)
- Askhabov A.M. (2011) Kvatron concept: basic ideas and some applications. *Izv. KomiNTs UrO RAN*, **3**(7), 70-77. (In Russ.)

- Askhabov A.M. (2005) Kvataronnaya model' obrazovaniya fullerenov. *Fizika Tverdogo tela*, 47(6), 1147-1150. (In Russ.)
- Bazhenov A.I., Poluektova T.I., Novoselov K.L. (1991) Ferritan oxide globules from granitoids of the Elecmonary massif. *Geol. Geofiz.*, (12), 50-57. (In Russ.)
- Berdnikov N.V., Nevstruev V.G., Kepezhinskas P.K., Krutikova V.O., Konovalova N.S., Astapov I.A. (2021) Silicate, iron oxide and gold-copper-silver microspherules in ores and pyroclastics of the Kostenginsky iron ore deposit (Far East of Russia). *Tikhookean. Geol.*, **40**(3), 67-84. (In Russ.)
- Bredshou P. (1974) Introduction to turbulence and its measurement. (Transl. from Engl. by V.F. Alymov, V.V. Altov, V.S. Voyteshonka, A.M. Dubinsky, A.M. Kudin). (Ed. G.S. Glushko). Moscow, MIR Publ., 278 p. (In Russ.)
- Chaikovskii I.I., Korotchenkova O.V. (2012) Explosive mineral phases of diamond-bearing visherites of the Western Urals. *Litosfera*, (2), 125-140. (In Russ.)
- Filimonova L.G., Arapova G.A., Boyarskaya R.V., Trubkin N.V. (1989) Typomorphic features of magnetic spheres of orogenic volcanics of Southern Sikhote-Alin. *Tikhookean. Geol.*, (4), 78-84. (In Russ.)
- Filimonova L.G., Trubkin N.V., Bortnikov N.S. (2003) Nanoparticles of ore minerals in the dispersed multimetal mineralization of the Dukatsky ore region (Northeastern Russia). *Dokl. RAN*, **392**(4), 521-525. (In Russ.)
- Florenskii K.P., Ivanov A.V., Il'in N.P. (1968). The chemical composition of space balls from the Tunguska disaster area and some issues of differentiation of the matter of cosmic bodies. *Geokhimiya*, (10), 1163-1173. (In Russ.)
- Frick P.G. (2010) Turbulence: approaches and models. 2nd edition, ispr. and add. Moscow; Izhevsk, NITs. *Regulyarnaya i chaoticheskaya dinamika*, 332 p.
- Gamyranin G.N., Zhdanov Yu.Ya. (2001) Spheroids of gold and sulfides in the ore occurrence of the Intakhsky ore node (Verkhne-Indigirsky district, Yakutia). *Dokl. RAN*, **377**(5), 663-666. (In Russ.)
- Gamyranin G.N., Zhdanov Yu.Ya., Moiseenko V.G. (2000) Natural and technogenic spheroids of minerals. *Tikhookean. Geol.*, **19**(4), 52-60. (In Russ.)
- Galimov E.M., Kudin A.M., Skorobogatskii V.N., Plotnichenko V.G., Bondarev O.L., Zarubin B.G., Strazdovskii V.V., Aronin A.S., Fisenko A.V., Bykov I.V., Barinov A.Yu. (2004) Experimental confirmation of diamond synthesis during cavitation. *Dokl. RAN*, **395**(2), 187-191. (In Russ.)
- Glavatskikh S.F., Generalov M.E. (1996) Cogenite from mineral associations associated with high-temperature gas jets of the BTTI (Kamchatka). *Dokl. AN*, **346**(6), 796-799. (In Russ.)
- Grachev A.F., Tsel'movich V.A., Korchagin O.A. (2008) Cosmic dust and strange balls in the ancient layers of the earth. *Zemlya i Vseleennaya*, (5), 59-67. (In Russ.)
- Grebennikov A.V. (2011) Endogenous spherules of Cretaceous-Paleogene ignimbrite complexes of the Yakutinsky volcanic-tectonic structure (Primorye). *Zap. Ross. Mineralog. Obshchestva*, **140**(3), 56-68. (In Russ.)
- El'kin Yu.N., Safronov P.P., Artyukov A.A., Karabtsov A.A. (2013) Destruction of seabed minerals in the intestines of the flat sea urchin *Scaphechinus mirabilis* Agazzis, 1863 (Echinodea: scutellidae). *Dokl. RAN*, **453**(4), 1-5. **453**(4), 1-5. (In Russ.)
- Ermolov P.V., Korolyuk V.N. (1978) Composition and structure of magnetic granitoid balls. *Dokl. AN SSSR*, (**240**)1, 155-158. (In Russ.)
- Khaken G. (1986) Synergetics. Moscow, Progress Publ., 405 p. (In Russ.)
- Khaken G. (2014) Information and self-organization. A macroscopic approach to complex systems. Moscow, 317 p. (In Russ.)
- Korchagin O.A., Tsel'movich V.A., Dubinina S.V. (2007) Meteoritic microspheres and particles from deep-sea limestones of the Upper Cambrian (Batyrbai, South Kazakhstan). *Izv. vuzov. Geologiya i razvedka. Mineralogiya, petrografiya, litologiya*, (3), 17-22. (In Russ.)
- Korinevskii V.G., Korinevskii E.V., Blinov I.A., Kotlyarov V.A. (2018) Metallic microspherules in carbonates of the Southern Urals. *Vestn. IG Komi NTs UrO RAN*, (10), 39-46.
- Koshelenko V.V., Volkova Yu.R., Myalik A.V. et al. (2020) State geological map of the Russian Federation scale 1 : 200,000. Edition 2. Series Stanaya. Sheet N-51-X (Ust-Urkima). Explanatory note [Electronic resource] Ministry of Nature of Russia, Rosnedra, VSEGEI Publ., 257 p. (In Russ.) ISBN 978-5-93761-644-9.
- Kuznetsova I.V. (2011) Geology, finely dispersed and nano-sized gold in the deposits of the Nizhselemdzhinsky node (Amur Region). Abstr. cand. geol.-min. sci. diss. Krasnoyarsk, SibFU Publ., 21 p. (In Russ.)
- Kuznetsova I.V., Safronov P.P. (2021) Native gold of the weathering crust of the Nizhselemdzhinsky gold-bearing node (Amur region). *Lithosphere (Russia)*, **21**(2), 239-255. (In Russ.)
- Kuznetsova I.V., Safronov P.P., Moiseenko N.V. (2019) Material and mineral characteristics of placers – potential sources of precious metal (on the example of the Nizhselemdzhinsky gold-bearing node of the Amur region, Russia). *Georesursy*, **21**(1), 2-14. (In Russ.)
- Kuznetsova I.V., Safronov P.P., Moiseenko N.V., Kharitonov V.I. (2015) Features of native micro- and nanogold in the hypergenesis zone (Amur region). *Estestv. i Tekhnich. Nauki*, **11**(89), 225-230. (In Russ.)
- Letnikov F.A. (1992) Synergetics of geological systems Science. Novosibirsk, 230 p. (In Russ.)
- Lukin A.E. (2013) Mineral spherules are indicators of a specific fluid regime of ore formation and naphthydogensis. *Geofizich. Zhurnal*, 35(6), 10-53. (In Russ.)
- Malich K.N., Rudashevskii N.S., Sokolova N.I. (1991) Microspherules from ultrabasites of concentric-zonal massifs of the Aldan shield, their genetic and applied significance. *Mineralog. Zhurnal*, (**13**)4, 52-71. (In Russ.)
- Marshintsev V.K., Yatsenko I.G., Zinchenko V.N. (2018) Silicate spheres from kimberlite and lamproite formations of the world. *Nauka i Tekhnika v Yakutii*, (**35**)2, 7-11. (In Russ.)
- Maslennikova A.V., Blinov I.A., Udachin V.N. (2015) Framboidal pyrite in bottom sediments of lakes in the Southern Urals. Miass, IMin UrO RAN Publ., 215-218. (In Russ.)
- Mel'nikov V.D., Mel'nikov A.V., Kovtonyuk G.P. (2006) Placers of gold of the Amur region. Blagoveshchensk, AmSU Publ., 297 p. (In Russ.)
- Moiseenko V.G. (2007) From gold atoms through clusters, nano- and microscopic particles to precious metal nuggets. Blagoveshchensk, FEB RAS, Amur branch of the RMO Publ., 187 p. (In Russ.)
- Moiseenko V.G., Kuznetsova I.V. (2010) The role of gold, silver and lead nanoparticles in the formation of depos-

- its of precious metals. *Dokl. Earth Sci.*, **430**(3), 377-381. (In Russ.)
- Moiseenko V.G., Moiseenko N.V., Safronov P.P. (2010) Nanoscale gold in the ores of the Pokrovsky deposit. *Dokl. Earth Sciences*, **435**(2), 1614-1617. (In Russ.) ISSN 1028_334X.
- Moiseenko N.V., Safronov P.P. (2012) Nanominerals of gold in the ores of the Pokrovsky deposit. *Modern problems of the connection of geodynamics, magmatism and mineralization*. Materials of the scientific conference. Tashkent, Publishing house "Fan" of the Academy of Sciences of Uzbekistan, 243-244.
- Moiseenko V.G., Safronov P.P., Moiseenko N.V. (2010) Electron microscopic study of nanozolite in the minerals of the Pokrovsky deposit of the Middle Amur region. *XXIII Russ. Conf. on Electron Microscopy*. Chernogolovka, 303. (In Russ.)
- Moiseenko N.V., Safronov P.P., Voropaeva E.N. (2013) Features of native gold of the Pioneer deposit (Amur region). *Estestv. i Tekhnich. Nauki*, **1**(63), 136-139. ISSN 1684-2626. (In Russ.)
- Myagkaya I.N., Lazareva, E.V., Gustaytis, M.A., Zhmodik S.M. (2016) Gold and Silver in a system of sulfide tailings. Part 2: Re-precipitation on natural peat. *J. Geochem. Explor.*, (165), 8-22. DOI: 10.1016/j.gexplo.2016.01.016
- Nikolis G., Prigozhin I. (1979) Self-organization in nonequilibrium systems: From dissipative structures to orderliness through fluctuations. Moscow, Mir Publ., 512 p. (In Russ.)
- Novgorodova M.I., Andreev S.N., Samokhin A.A., Gamyanin G.N. (2003) Cavitation effects in the formation of mineral microspherules in hydrothermal solutions. *Dokl. RAN*, **(389)**5, 669-671. (In Russ.)
- Novgorodova M.I., Boyarskaya R.V., Yusupov R.G. (1989) Growth and corrosion of native zinc in a gaseous medium. *Zap.Vsesoyuzn. Miner.Obshchestva*, **115** (1), 16-25.
- Novgorodova M.I., Gamyanin G.N., Zhdanov Yu.I., Agakhov A.A., Dikaya T.V. (2003) Microspherules of aluminosilicate glasses in gold ores. *Geokhimiya*, (1), 83-93. (In Russ.)
- Novoselov K.L. (2015) Genetic features of native iron and its oxidation products in Devonian granitoids of the Aleysko-Zmeinogorsky complex (northwestern part of Rudny Altai). *Izv. Tomskogo Politekhniceskogo In-ta. Inzhiniring Georesurov*, **(326)**9, 56-67. (In Russ.)
- Nystrom J.O., Henriquez f., Naranjo J.A., Nasuland R. (2016) Magnetite spherules in pyroclastic iron ore at El Laco, Chile. *Amer. Miner.*, (101), 587-595.
- Obukhov A.M. (1988) Turbulence and dynamics of the atmosphere. Leningrad, Hydrometeoizdat Publ., 414 p. ISBN 5-286-00059-2. (In Russ.)
- Orlova N.I. (1995) Map of the weathering crust of the Amur region scale 1:500.000. Moscow, VIMS Publ., 329 p. (In Russ.)
- Palazhchenko V.I., Neronskii G.I. (2006) Mineral spheroids. *Fedorovskaya session – 2006*. Thesis of the int. sci. conf. St.Petersburg, 29-31. (In Russ.)
- Pribavkin S.V., Pushkarev E.V., Khan'zhin A.S., Chebykin N.S. (2023) Mineralogy of sulfide globules in pyroxenites of the Shigir hills of the Ufaleysky complex, Southern Urals. *Ultramafic mafia complexes: geology, structure, ore potential*. Proceed. of the VIII All-Russ. Sci. Conf. Novosibirsk, NNIGU Publ., 152-153. (In Russ.)
- Prigozhin I., Stengers I. (1986) Order from chaos. A new dialogue between man and nature. Moscow, Progress Publ., 432 p. (In Russ.)
- Pushkarev E.V., Anikina E.V., Garuti Dzh., Zakkarini F., Kononkova N.N. (2002) Metallic and silicate oxide spherules from ultrabasic pegmatites in dunites of the Nizhny Tagil platinum-bearing massif in the Middle Urals (first data). *Dokl. RAN*, **383**(1), 90-94. (In Russ.)
- Rychagov S.N., Glavatskikh S.F., Sandimirova E.I. (1996) Ore and silicate magnetic beads as indicators of structure, fluid regime, and mineral ore formation in the modern Baranskoe hydrothermal system (Iturup Island). *Geol. Rudn. Mestorozhd.*, **(38)**1, 31-40. (In Russ.)
- Rudashevskii N.S., Dmitrenko G.G., Mochalov A.G., Men'shikov Yu.P. (1987) Native metals and carbides in alpinotypic ultramafic rocks of the Koryak highlands. *Mineralog. Zhurn.*, **9**(4), 71-82. (In Russ.)
- Safronov P.P. (2011) Method of conducting on SEM with EDX-spectrometry approximately quantitative X-ray spectrometric measurements of the composition of nanodimensional mineral phases. 7th All-Russian conference on X-ray spectrometry analysis. Novosibirsk, SO RAN Publ., 71. (In Russ.)
- Safronov P.P. (2023) On the origin of nanoscale gold in nature. *Geological processes in conditions of subduction, collision and sliding of lithospheric plates*. VI All-Russian Scientific Conf. Vladivostok, Publishing house of the FEFU, 442-446. (In Russ.) ISBN 978-5-7444-5547-7.
- Safronov P.P., Gavrilov A.A., Maksimov S.O. (2009) Microstructures of the surface of Fe-oxide spheroids from basite complexes of Popov Island (Primorye). *XVI-RCEM-09*, Chernogolovka, 206. (In Russ.)
- Safronov P.P., Kuznetsova I.V. (2021) Autigenic mineral formation as an objective factor of transformation of technogenic placers. *Geologiya i Mineral'no-syr'evye Resursy Sibiri*, **3**(47), 83-93. (In Russ.)
- Safronov P.P., Kuznetsova I.V. (2017) Features of the composition of native gold of technogenic placers on the example of the Nizhneselemdzhinsky gold-bearing node (Amur region). *Izv. Tomsk. Politekhnic. Universiteta. Enginiring Georesurov*, **328**(2), 46-58. (In Russ.)
- Safronov P.P., Kuznetsova I.V. (2016) Nanogold in rocks associated with native gold in technogenic placers of the Amur region. *Issues of geology and integrated development of natural resources of East Asia*. IV All-Russ. Sci. Conf. October 5-7, 2016. Blagoveshchensk [collection of materials]. Blagoveshchensk, IGIP FEB RAN Publ., 112-115. (In Russ.)
- Safronov P.P., Maksimov S.O., Chekryzhov I.Yu. (2024) Spherical forms of matter in the mineral complexes of Primorye. *Vestn. DVO RAN*, (5), 1147-1150. (In Russ.)
- Safronov P.P., Moiseenko N.V., Moiseenko V.G. (2011) Nanoscale native gold in the minerals of the Pioneer deposit (Amur region) according to electron microscopic studies. *XVII -RCEM-11*, Chernogolovka, 206. ISBN 978-5-89589-054-7. (In Russ.)
- Safronov P.P., Sakhno V.G. (2012) Results of electron microscopic study of the microstructure and composition of Fe-oxide spheroids of meteoritic origin. *XXIV-RCEM-12*. Chernogolovka, 375-376. (In Russ.) ISBN 978-5-89589-060-8
- Sandimirova E.I. (2008) Spherical mineral formations of volcanic rocks of the Kuril Islands and Kamchatka.

- Abstr. cand. geol.-min. sci. diss. Vladivostok, 25 p. (In Russ.)
- Sandimirova E.I., Glavatskikh S.F., Rychagov S.N. (2003) Magnetic spherules from volcanogenic rocks of the Kuril Islands and South Kamchatka. *Vestn. KRAUNTs*, (1), 135-140. (In Russ.)
- Shadrina O.S., Kondrat'eva L.M., Litvinenko Z.N., Golubeva E.M., Krutikova V.O. (2022) Formation of spheroids in vitro with the participation of microorganisms of caste speleothems. *Speleol. Spelestol.*, (2), 34-42. (In Russ.)
- Shumilov T.G., Yushkin N.P., Pushkarev E.V. (2007) Silver spheroids in graphite-bearing rocks of the Maksyutovsky complex, Southern Urals. *Dokl. RAN*, 417(5), 682-684. (In Russ.)
- Silaev V.I., Chaikovskii I.I., Kharitonov T.V., Fillipov V.N., Khazov A.F. (2009) On the problem of atypical and unconventional diamond satellite minerals (on the example of the Urals). Syktyvkar, Geoprint Publ., 65 p. (In Russ.)
- Silaev V.I., Karpov G.A., Anikin L.P., Vergasova L.P., Fillipov V.N., Tarasov K.V. (2019) Mineral-phase paragenesis in explosive products of modern volcanic eruptions in Kamchatka and Kuril Mountains. Pt 2. Satellite minerals of Tolbachinsky type diamonds. *Vulkanol. Seismol.*, (6), 36-49. (In Russ.)
- Sorokin A.P. (1989) Morphostructures and placers of gold of the Amur region. Dokt. geol.-min. sci. diss. Blagoveshchensk, AmurKNII Publ., 394 p. (In Russ.)
- Sungatullin R.H., Sungatullina G.M., Zakirov M.I., Tsel'movich V.A., Glukhov M.S., Bakhtin A.I., Osin Yu.N., Vorob'ev V.V. (2017) Microspheres of cosmic origin in the carboniferous rocks of the Usolka section, Predural-sky trough. *Geol. Geofiz.*, 58(1), 74-85. (In Russ.)
- Tatarintsev V.I., Tsymbal S.N., Garanin V.K. (1983) Hardened particles from kimberlites of Yakutia. *Dokl. RAN*, 270(5), 1199-1203 (In Russ.)
- Tomilenko A.A., Kovyazin S.V., Pokhilenko L.N., Sobolev N.V. (2011) Silicate globules in the kyanite of gropsidites from the kimberlite pipe Mysterious, Yakutia: the problem of origin. *Dokl. RAN*, 436(2), 243-246. (In Russ.)
- Trubkin N.V., Gorshkov A.I., Nekrasov I.Ya. (1983) The structure and composition of spherical magnetic formations from alluvium in the North-East of the USSR. *Dokl. AN SSSR*, 269(6), 712-714. (In Russ.)
- Tsel'movich V.A., Korchagin O.A., Nekrasov A.N., Starchenko S.V. (2010) Diagnostics of the origin of magnetic microspheres. Paleomagnetism and rock magnetism. Proceedings of the International Seminar on Paleomagnetism and Rock Magnetism. St.Petersburg, Petrodvorets Publ., 165-171. (In Russ.)
- Tyan V.D., Ermolov P.V., Popov N.V., Rafikov T.K. (1976) On the magmatic nature of native iron in granitoids and its oxidation products. *Geol. Geofiz.*, (5), 48-54. (In Russ.)
- Zakharova E.M. (1997) Ferromagnetic spherules in terrigenous deposits and placers. *Zapiski RMO*, (126)3, 61-66. (In Russ.)
- Zheleznyak A.S., Ioffe I.I. (1974) Calculation methods for multiphase liquid reactors. Leningrad, Khimiya Publ., 320 p. (In Russ.)