

УДК 553.411.071: 553.064.32

ТИПОМОРФИЗМ САМОРОДНОГО ЗОЛОТА ИЗ СКАРНОВ ТЫРНЫАУЗСКОГО РУДНОГО УЗЛА (КАБАРДИНО-БАЛКАРСКАЯ РЕСПУБЛИКА)

© 2016 г. В.В. Столяров¹, С.Г. Парада¹, Ю.В. Попов², А.В. Назаренко³

Аннотация. Изучены типоморфные особенности самородного золота, выделенного из скарновых руд Зыгыркольской зоны Тырныаузского рудного узла. Впервые для изучения морфологии и морфометрии минеральных частиц мелких классов применен метод лазерной конфокальной сканирующей микроскопии. Используемый для этого микроскоп KEYENCE VK-9700 (Япония) позволяет выделять детали нанорельефа и нанообъекты с точностью измерений в горизонтальной плоскости 100 нм, по вертикали 10 нм, с увеличением от 200× до 16000×. Изображение строится путем последовательной съемки частей объекта, находящихся в фокусе на разной высоте, что позволяет сформировать 3D-визуализацию исследуемых частиц. Для изучения структуры минеральных агрегатов и элементного состава рудных фаз использован растровый электронный микроскоп Tescan Vega LMU и система рентгенофлуоресцентного микроанализа INCA Energy 450, INCA Wave 700 (OXFORD Instruments Analytical). Полученные в результате исследования морфометрические данные позволили предложить количественные критерии оценки изометричности частиц самородного золота, вычисляемые: а) как коэффициент уплощенности (отношение средней по длине оси к самой короткой); б) как коэффициент удлиненности (отношение самой длинной оси к средней по длине). По этим коэффициентам исследованные частицы объединены в три группы: 1) изометричные (1,0–1,1 (*a*); 1,0–1,4 (*b*)); 2) уплощенно-удлиненные (1,0–1,4 (*a*); 2,0–3,7 (*b*)); 3) уплощенно-изометрические (1,9–2,6 (*a*); 1,0–1,8 (*b*)). По морфогенетическим признакам самородное золото в изученных скарновых рудах проявлено в виде идиоморфных кристаллических и плохо ограниченных и округлых зерен, ксеноморфных комковатых массивных, ячеистых и петельчатых частиц цементационного, а также интерстициального морфогенетического видов. Самородное золото в минеральных агрегатах тесно связано с самородным висмутом, совместно с которым оно отлагалось в скарновых рудах, содержит в своем составе Ag (5,6–9,9%) и типичные для золото-скарновых месторождений примеси Bi (0,12–0,67%) и Te (0,04–0,41%), характеризуется высокой пробностью (897–939). Идиоморфные частицы самородного золота сформировались в начале поздней стадии процесса рудообразования, когда в пустотах среди вмещающих мелкозернистых агрегатов могли существовать условия для его кристаллизации и роста. Их образование происходило в условиях средних или малых глубин на фоне низкого давления и резкого падения температуры. Частицы самородного золота неправильного типа выделились в конце процесса рудообразования.

Ключевые слова: самородное золото, скарны, частицы мелких классов, типоморфизм, морфология, морфометрия, химический состав.

¹Институт аридных зон Южного научного центра Российской академии наук (Institute of Arid Zones, Southern Scientific Centre, Russian Academy of Sciences, Rostov-on-Don, Russian Federation), Российская Федерация, 344006, г. Ростов-на-Дону, пр. Чехова, 41, e-mail: parada@ssc-ras.ru.

²Институт наук о Земле Южного федерального университета (Institute of Earth Sciences, Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russian Federation), Российская Федерация, 344090, г. Ростов-на-Дону, ул. Зорге, 40, e-mail: popov@sfned.ru.

³Южный научный центр Российской академии наук (Southern Scientific Centre, Russian Academy of Sciences, Rostov-on-Don, Russian Federation), Российская Федерация, 344006, г. Ростов-на-Дону, пр. Чехова, 41.

TYPOMORPHISM OF NATIVE GOLD FROM THE SKARNS OF THE TYRNY-AUZ ORE NODE
(KABARDINO-BALKARIAN REPUBLIC)V.V. Stolyarov¹, S.G. Parada¹, Yu.V. Popov², A.V. Nazarenko³

Abstract. The typomorphic peculiarities of native gold isolated from the skarn ores of the Zygyrkol' zone of the Tyrny-auz ore node have been studied. The confocal laser scanning microscopy method was used for the first time to study the morphology and morphometry of small-class mineral particles. KEYENCE VK-9700 microscope (Japan) used for the study allows distinguishing the details of nano-relief and nano-objects with the precision of measurement in horizontal plane of 100 nm, on vertical 10 nm, with a zoom from 200× to 16000×. The image is constructed by consequent photography of object's parts being focused at various heights, allowing the formation of 3D visualization of the investigated particles. To study the structure of mineral aggregates and elemental composition of ore phases, Tescan Vega LMU raster electronic microscope and the system of x-ray fluorescent microanalysis INCA Energy 450, INCA Wave 700 (OXFORD Instruments Analytical) were used. The morphometric data obtained as a result of investigation allowed proposing quantitative criteria for the assessment of isometricity of native gold particles calculated as: a) a coefficient of flatness (ratio of the mean length axis to the shortest one) and b) a coefficient of elongation (ratio of the longest axis to the mean length one). By these coefficients, the studied particles are united into three groups: 1) isometric ($a - 1.0-1.1$; $b - 1.0-1.4$); 2) flattened-elongated ($a - 1.0-1.4$; $b - 2.0-3.7$); 3) flattened-isometric ($a - 1.9-2.6$; $b - 1.0-1.8$). By morphogenetic features the native gold in the studied skarn ores is in the form of idiomorphic crystalline and badly faceted and rounded grains, xenomorphic lumpy massive, cellular and looped particles of cementation, and also interstitial morphogenetic types. The native gold in the mineral aggregates is closely associated with the native bismuth, together with which it was deposited in the skarn ores, contains Ag (5.6–9.9%), and typical of the golden-skarn deposits admixtures of Bi (0.12–0.67%) and Te (0.04–0.41%), and is characterized by high fineness (897–939). The idiomorphic particles of native gold were formed at the beginning of the late stage of the ore formation process, when the conditions for its crystallization and growth could exist in the hollows among the containing fine-grained aggregates. Their formation took place under the conditions of middle or small depths against the low pressure and abrupt fall of temperature background. The particles of native gold of irregular type were excreted at the end of the ore formation process.

Keywords: native gold, skarns, particles of small classes, typomorphism, morphology, morphometry, chemical composition.

ВВЕДЕНИЕ

На Юге России в последние годы активно проводятся геолого-разведочные работы по выявлению не традиционных для региона золоторудных месторождений. В результате поисковых работ в пределах Тырнаузского рудного узла (Кабардино-Балкарская Республика) открыты и в настоящее время оцениваются несколько рудопроявлений золота. Наиболее перспективные из них располагаются к северо-западу от крупнейшего молибден-вольфрамового месторождения Тырнауз и приурочены к скарнам Зыгыркольской тектонической зоны. Апробированные прогнозные ресурсы золота составляют более 50 т, что соответствует крупному месторождению.

Подробная характеристика и условия локализации рудопроявлений изложены в [1–3]. Золотые руды, отвечающие современным требованиям к параметрам оруденения, локализуются в пироксен-гранатовых скарнах. Данные спектральных

анализов бороздовых и керновых проб по золотоносным интервалам свидетельствуют об отсутствии в них промышленно значимых концентраций серебра и цветных металлов. Таким образом, золото является единственным полезным компонентом. По минералогическим и химико-аналитическим данным, а также по результатам изучения технологической пробы установлено, что основное богатство этих руд определяется частицами самородного золота мелких классов (менее 1 мм).

Важнейшими типоморфными признаками самородного золота, позволяющими определить генезис и геологические условия формирования руд, являются морфология и морфометрия его выделений (частиц), их внутренняя структура и химический состав [4–6]. На основе изучения этих признаков составлены соответствующие морфогенетические классификации самородного золота, наиболее известная приведена в [6]. В дальнейшем появлялись сводные работы, посвященные самородному золо-

ту отдельных регионов. Наиболее полное обобщение всего накопленного по типоморфизму самородного золота материала выполнено в недавней работе [4]. Однако в ней учтены результаты исследования в основном частиц относительно крупного размера (обычно более 1 мм). Изучение важнейших морфолого-морфометрических характеристик более мелких частиц сдерживается трудоемкостью их извлечения, но главное – ограниченными возможностями объемного изучения существующими методами оптической и электронной микроскопии, которые дают качественное изображение только плоской поверхности образца.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Задача изучения морфолого-морфометрических особенностей частиц самородного золота из скарновых руд Зыгыркольской зоны Тырнаузского рудного узла решена нами методом лазерной конфокальной сканирующей микроскопии (ЛКСМ).

Использован ЛКСМ KEYENCE VK-9700 (Япония), который позволяет выделять детали нанорельефа и нанобъекты с точностью измерений в горизонтальной плоскости 100 нм, по вертикали 10 нм, с увеличением от 200× до 16000×. Изображение строится методом конфокальной микроскопии, в процессе последовательной съемки частей объекта, находящихся в фокусе на разной высоте. Сканирование происходит сверху вниз, после чего все полученные изображения на разных высотах «сшиваются», образуя четкую двумерную картину, а данные о «высоте» (т.е. вертикальном положении окуляра) позволяют сформировать 3D-визуализацию исследуемых частиц.

Частицы самородного золота для последующего изучения выделены из остатков бороздовых и керновых проб, в которых по результатам пробирного анализа обнаружено повышенное содержание Au, путем последовательного их сокращения гравитационным и электромагнитным способами. Полученный остаток подвергался отдувке с последующим ручным отбором самородного золота и других минеральных агрегатов.

Изучение структуры минеральных агрегатов и элементного состава рудных фаз в составе агрегатов осуществлено методами растровой электронной микроскопии и рентгенофлуоресцентного микроанализа на оборудовании Центра исследований минерального сырья и состояния окружающей среды Южного федерального университета с использованием растрового электронного микроскопа Tescan Vega LMU и системы рентгенофлуоресцентного микроанализа INCA Energy 450, INCA Wave 700 (фирмы OXFORD Instruments Analytical) без обработки и напыления поверхности образцов.

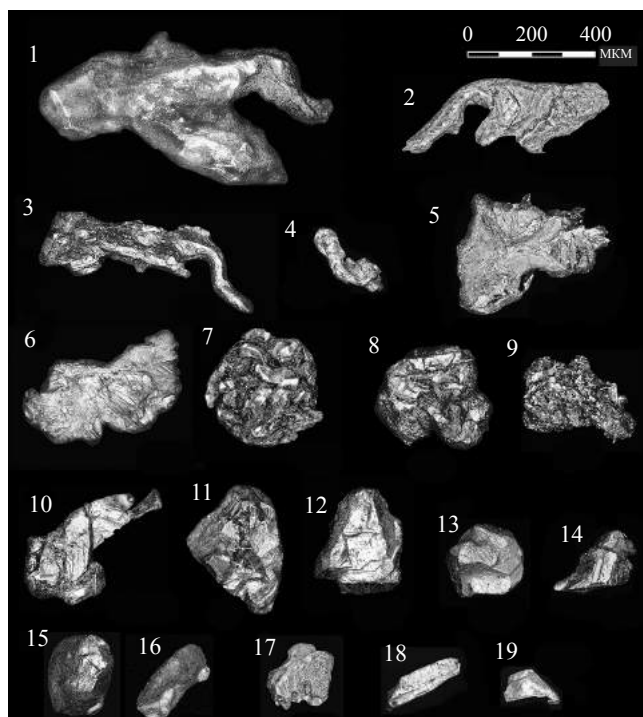


Рис. 1. 3D-визуализация частиц самородного золота, выделенных из скарнов Зыгыркольской зоны

Fig. 1. 3D visualization of the native gold particles singled out from the skarns of the Zygyrkol' zone

Электронно-микроскопическое исследование частиц самородного золота осуществлено в искусственных аншлифах, приготовленных на основе эпоксидной смолы. После затвердения смолы полученный образец шлифовали до проявления частиц самородного золота, затем полировали и очищали ультразвуком. На подготовленную поверхность напыляли углерод. Дальнейшее исследование проводили на том же растровом электронном микроскопе с системой рентгенофлуоресцентного микроанализа при ускоряющем напряжении 20 кВ.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Морфология и морфометрия частиц самородного золота

В соответствии с изложенной выше методикой осуществлена 3D-визуализация исследуемых частиц самородного золота (рис. 1). По результатам сканирования установлены также и морфометрические характеристики этих частиц, которые позволили вычислить вес каждой из них исходя из усредненной объемной массы золота 16 г/см³ (табл. 1). По приведенным в табл. 1 данным вычислены также коэффициенты изометричности выделенных частиц: коэффициент уплощенности как отношение средней по длине оси к самой короткой (ширина к

Таблица 1. Морфометрическая характеристика частиц самородного золота, выделенных из скарнов Зыгыркольской зоны
Table 1. Morphometric characteristics of the native gold particles singled out from skarns of the Zygyrkol' zone

№ частицы на рис. 1	Длина, мкм	Ширина, мкм	Высота, мкм	Вес, мг	Объем, куб. мкм	Площадь рельефа, кв. мкм	Площадь проекции на горизонтальную плоскость, кв. мкм	Коэффициент неровности
1	900	450	334	0,55	34 297 871	13 083 540	238 468	55
2	850	220	276	0,17	10 763 286	5765028	83 839	69
3	680	200	262	0,18	11 384 746	7364672	85 315	86
4	260	100	60	0,02	1 437 648	242190	20 484	12
5	450	350	367	0,35	22 117 550	2490278	108 796	23
6	530	250	175	0,19	11715827	884728	110 564	8
7	350	350	382	0,33	20737493	3562927	96 710	37
8	350	300	366	0,34	21270715	5781590	86 713	67
9	350	250	252	0,15	9127506	3096124	64 855	48
10	430	280	200	0,11	7052563	1507888	74 498	20
11	410	280	300	0,22	13905640	2804744	77 260	36
12	330	250	134	0,09	5676990	1182161	67 755	17
13	150	220	160	0,06	3949340	485829	42 615	11
14	300	150	148	0,04	2565238	696793	28 702	24
15	250	200	178	0,07	4523418	358386	44 246	8
16	280	110	248	0,07	4558141	530971	29 129	18
17	220	210	107	0,03	1740734	262208	30 027	9
18	270	70	74,3	0,01	758 360	150 746	18 886	8
19	180	100	39	0,005	282 169	64 761	12 521	5

высоте) (*a*) и коэффициент удлиненности как отношение самой длинной оси к средней по длине (длина к ширине) (*b*). Эти коэффициенты позволяют количественно оценить степень изометричности частиц самородного золота. По этим коэффициентам выделенные частицы можно объединить в три группы: 1) изометричные (1,0–1,1 (*a*); 1,0–1,4 (*b*)); 2) уплощенно-удлиненные (1,0–1,4 (*a*); 2,0–3,7 (*b*)); 3) уплощенно-изометрические (1,9–2,6(*a*); 1,0–1,8(*b*)). Из представленных на рисунке 1 частиц к изометричной группе относятся частицы под номерами 5, 7, 8, 9, 11, 13, 15; к уплощенно-удлиненной 1, 2, 3, 4, 6, 18; к уплощенно-изометричной 10, 12, 14, 16, 17, 19. Ни одна из этих групп не попадает в наиболее распространенный в природе трещинный вид выделений самородного золота, даже если в качестве коэффициента уплощенности взять отношение самой длинной оси к самой короткой, как предлагается в [6]. И даже тогда полученные значения (от 1,1 до 4,6) ни для одной из выделенных нами частиц не достигают необходимых для этого величин от 5 до 20. Поэтому ни одна из изученных частиц самородного золота не может быть названа таблитчатой, пластинчатой, чешуйчатой или пленочной и не может быть отнесена к трещинному морфогенетическому виду.

Поверхность около половины изученных золотин (наиболее крупных) неровная, шероховатая, ямчатая, что отражается повышенным коэффициентом неровности (см. табл. 1). Многочисленные понижения в рельефе золотин (ямки, поры и т.п.) заполнены оксидами и гидроксидами железа, а также органическими пленочками и кристаллическими агрегатами инородных минеральных фаз. Две частицы представляют собой агрегат двух минералов – самородного золота и самородного висмута (см. 15 и 16 на рис. 1).

Все выделенные частицы самородного золота в соответствии с классификацией [6] и уточнениями, приведенными в [7], можно отнести к двум морфологическим типам: 1) идиоморфный (кристаллы, их сростки, дендриты) и 2) неправильный (подчиненный формам заполняемых золотом полостей). В составе идиоморфного типа нами выделяются частицы, которые можно отнести к следующим морфогенетическим видам: 1) кристаллы и 2) плохо ограниченные и округлые индивиды и их сростки; в составе неправильного типа выделяются частицы, которые можно отнести к 3) цементационному и 4) интерстициальному морфогенетическим видам.

Кристаллы. Из всех выделенных частиц самородного золота к кристаллам можно отнести только одну, представленную на рис. 1 под номером 13. По форме это ромбододекаэдр, образованный гранями 110. Он представляет правильную (изометричную) разновидность данного морфогенетического вида, что обусловлено свободным ростом в пустотах или метасоматическим замещением вмещающей среды.

Плохо ограниченные и округлые индивиды и их сростки. К этому морфогенетическому виду можно отнести почти половину из выделенных частиц самородного золота (см. 1, 2, 3, 4, 6, 15 и 16 на рис. 1), которые представляют все разновидности данного вида. Общим критерием отнесения этих частиц к данному виду послужили их округленные формы, контуры которых обычно не подчиняются формам трещин или интерстиций. Предполагается, что такие округленные формы возникают, если вершины и ребра октаэдров притупляются в связи с развитием множества граней. К изометричным (каплевидным) отнесена частица под номером 15, к лепешковидной – частица под номером 6. Частицы под номерами 4 и 16 можно отнести к вытянутой (пальцевидной), а три частицы (см. 1, 2, 3 на рис. 1) – к амебовидной разновидности. В работе [6] установлено, что округлые кристаллы и их сростки более характерны для глубинных месторождений, где имеют метасоматическое происхождение. В рудах близповерхностных месторождений они почти отсутствуют, сменяясь более четко ограниченными индивидами. Вместе с тем амебовидные формы также характерны для золота, кристаллизующегося совместно с сульфидами поздних генераций, где они располагаются в интерстициях минеральных агрегатов и в слагающих их зернах вдоль трещин спайности, а округлые изометричные, удлиненные (пальцевидные) и лепешковидные индивиды золота имеют метасоматическое происхождение.

Цементационный вид. Образуется, как известно, в брекчиях и на пересечениях трещин и более всего характерен для малоуглубленных месторождений [6]. Золотины, располагающиеся в брекчиях кварца и сульфидов ранних ассоциаций, обычно имеют угловатые, близкие к изометричной форме, повторяющие формы межобломочных полостей. Сходный вид имеют частицы золота, приуроченные к пересечениям различно ориентированных трещин в рудных телах, где агрегаты более ранних минералов также испытали дробление. Поэтому основным критерием отнесения выделенных нами частиц самородного золота к данному цементационному морфогенетическому виду является их изометричность. Таких частиц пять (см. 5, 7, 8, 9 и 11 на рис. 1). Среди них отмечаются следующие разновидности: 5 – комковидная плотная, с угло-

ватыми ограничениями и небольшим количеством коротких ответвлений, придающим частице паукообразность, что характерно для золота, образовавшегося в слабдеформированных агрегатах силикатных минералов; 7, 8, 9 и 11 – комковидные частицы ячеистого и петельчатого строения. Эти четыре частицы представляют собой сростки мелких ксеноморфных золотин, между которыми заключены зерна и обломки вмещающих золото минералов. Петельчатые выделения представляют как бы крайние члены ряда усложняющихся по морфологии комковидных частиц золота, связанные с другими разновидностями постепенными переходами.

В [6] отмечается, что ячеистые и петельчатые комковидные агрегаты представляют собой одну из характерных для эпитермальных руд морфологическую разновидность выделений золота. Ячеистые сростки комковидных золотин характерны для богатых руд умеренно сульфидных формаций; петельчатые формы менее распространены и развиты преимущественно в зонах рудных столбов.

Интерстициальный вид. Все выделенные нами частицы этого вида отнесены к разновидности неправильных выделений с отпечатками кристаллов других минералов (см. 10, 12, 14, 17, 18 и 19 на рис. 1). Главными критериями такого отнесения стали слабоуплощенная клиновидная форма (коэффициент уплощенности 1,9–2,6) и наличие отпечатков вмещающих минералов. Хорошо видны отпечатки на золоте кристаллов граната и кальцита. Таковыми являются ромбической формы углубления, оставшиеся от граней ромбододекаэдрических кристаллов граната (см. 12 и 19 на рис. 1). Следы кристаллов карбоната проявляются на поверхности золота в виде ромбодоэдрических углублений (см. 10 и 14 на рис. 1). Частицы, отнесенные к интерстициальной разновидности, являются наиболее мелкими из всех выделенных нами.

Таким образом, свободное золото в изученных скарновых рудах Зыгыркольской зоны проявилось в виде идиоморфных кристаллических, плохо ограниченных и округлых форм, а также ксеноморфных комковатых массивных, ячеистых и петельчатых частиц и интерстициальных выделений. Изометричные формы золота сформировались, вероятно, в начальный период поздней стадии, когда в пустотах среди вмещающих мелкозернистых агрегатов могли существовать условия для его кристаллизации и роста. Их образование происходило в условиях средних или малых глубин на фоне низкого давления и резкого падения температуры. Неправильный тип золота выделился в конце процесса рудообразования в уже сформировавшейся среде. Реже самородное золото отлагалось в местах, где тектонические подвижки приводили к локальному растрескиванию и дроблению ранее образовавшихся минеральных агрегатов.

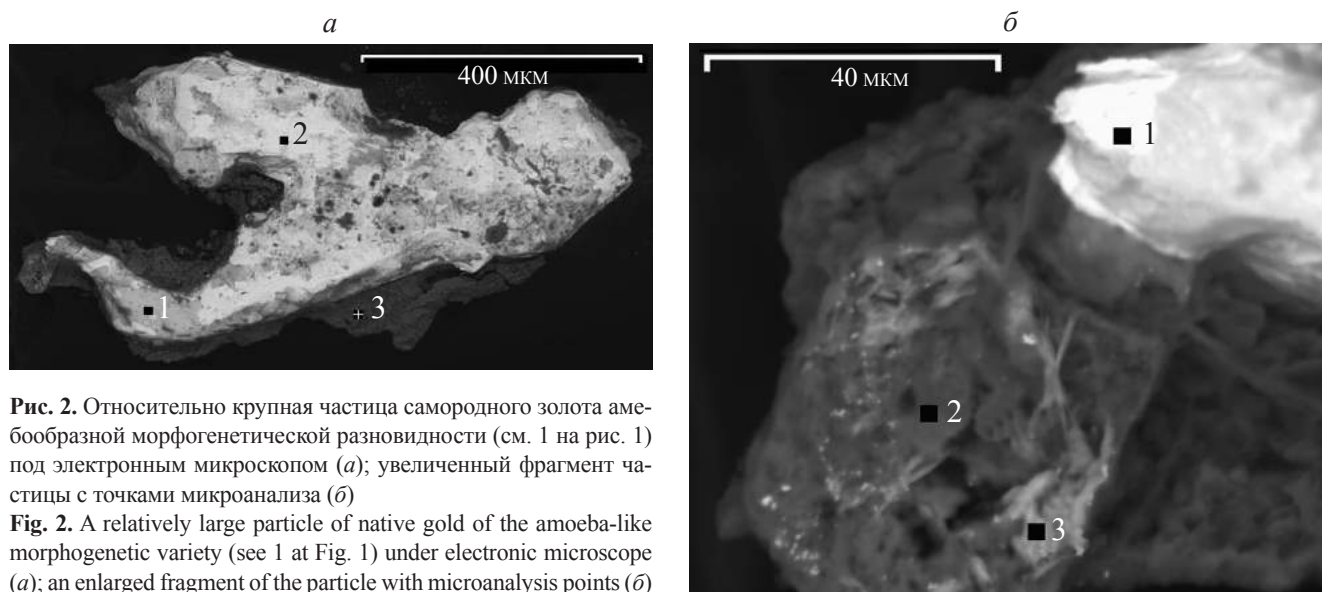


Рис. 2. Относительно крупная частица самородного золота амёбообразной морфогенетической разновидности (см. 1 на рис. 1) под электронным микроскопом (а); увеличенный фрагмент частицы с точками микроанализа (б)

Fig. 2. A relatively large particle of native gold of the amoeba-like morphogenetic variety (see 1 at Fig. 1) under electronic microscope (a); an enlarged fragment of the particle with microanalysis points (b)

Таблица 2. Содержание химических элементов в точках, представленных на рисунке 2а (в мас. %)

Table 2. Contents of chemical elements at the points presented at Fig. 2a (in weight %)

Спектр	C	O	Al	Si	Ca	Mn	Fe	Ag	Te	Au	Bi	Сумма
1	9,26	35,07	0,78	1,05	0,65	2,46	2,96	5,78	–	41,99	–	100
2	4,60	44,01	1,41	3,63	0,55	–	42,42	–	1,01	–	2,37	100
3	–	28,75	1,46	1,82	4,10	2,02	19,70	–	–	5,88	36,27	100

Внутренняя структура и химический состав самородного золота

По методике и на оборудовании, охарактеризованных выше, изучали структуры минеральных агрегатов и элементный состав рудных фаз в составе выделенных частиц самородного золота.

Наиболее крупная частица (рис. 2), согласно микроанализу, практически целиком представлена Au (спектр 1), местами покрыта частицами соединений Al-Mn-Ca-Fe (спектр 2) и имеет небольшие реликты сростков с оксигидратами железа (спектр 3).

Приведенные результаты микроанализа химических элементов следует рассматривать как весьма приближенные, в связи с тем что частицы самородного золота были помещены под микроскоп без какой-либо предварительной очистки. Тем не менее ясно, что спектр 1 соответствует самородному золоту, а спектр 3 – самородному висмуту. Наличие в этих спектрах (табл. 2) таких элементов, как Al, Si, Ca, Mn и Fe, характеризует остатки частиц силикатных минералов, а таких элементов, как C и O, указывает на наличие органических (возможно, бактериальных) пленок экзогенного происхождения на поверхности исследованных золотин.

На средней по размеру частице самородного золота (рис. 3 и 4) удалось обнаружить свободные от примесных пленок участки и определить содержания Au и Ag в ней без каких-либо примесей (табл. 3, спектр 1), а также установить, что в сростках с золотом действительно находится самородный висмут (спектр 2). Спектр 3 соответствует, скорее всего, частичке плагиоклаза, оставшейся на поверхности частицы самородного золота.

Более детальное исследование агрегата самородного висмута (рис. 3в) показало, что он также содержит налипшие остатки силикатных минералов и органических веществ, что не позволяет получить стопроцентное содержание висмута по результатам микрозондирования (табл. 4–6, спектры 1 и 3). То же касается и самородного золота (спектр 2 в табл. 4, спектры 3–5 в табл. 6).

Дальнейшее электронно-микроскопическое исследование частиц самородного золота осуществлено в искусственных аншлифах в соответствии с методикой, изложенной выше. Исследованы полированные срезы искусственных аншлифов с девятью частицами самородного золота и двумя частицами самородного висмута (рис. 5, 6). Содержания химических элементов приведены в табл. 7.

Таким образом, химический состав изученного самородного золота соответствует составу золота из скарновых месторождений, характеристики которого приведены в работах [4, 7–10] и др.

Представляется, что тесная связь самородного золота и самородного висмута в скарновых рудах Зыгыркольской зоны вполне закономерна, так как для плутоногенных месторождений золота характерна геохимическая специализация Au-Bi-Te±As-Mo-W [11]. Кроме того, один из возможных механизмов совместной миграции этих компонентов связан с относительно низкими температурами плавления многих самородных металлов, в частности Bi, а также соединений золота с Bi и Te [12]. Возможность переноса таких металлов в виде относительно легкоплавких соединений и низкотемпературных сплавов показана в работе [13]. К этому следует добавить, что заметные примеси Bi и Te в изученном нами самородном золоте также понижают температуру плавления. Так, по данным [14], в системе Au-Bi-Te имеется 10 низкотемпературных эвтектик в интервале 234–475 °С. Все это согласуется с определением условий образования ассоциации Au-Bi по имеющимся фазовым диаграммам [8], в соответствии с которыми самородный висмут стабилен при температурах 450–275 °С.

Отсутствие в изученных нами золото-скарновых рудах мальдонита (Au_2Bi), который при температурах выше 371 °С разлагается на самородное золото и самородный висмут, суживает температурный интервал формирования выявленной нами золото-висмутовой ассоциации пределами 371–450 °С. Давление при этом, по изложенным в работе [15] данным, не может превышать 3 кбар.

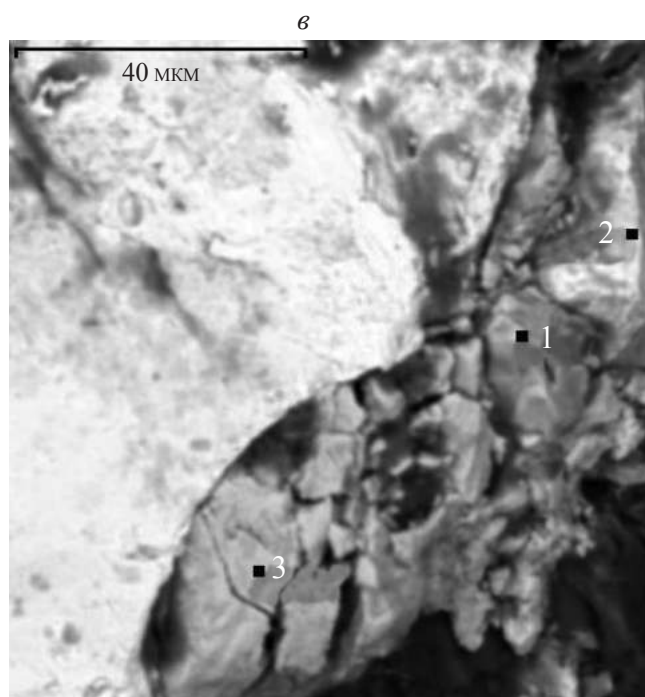
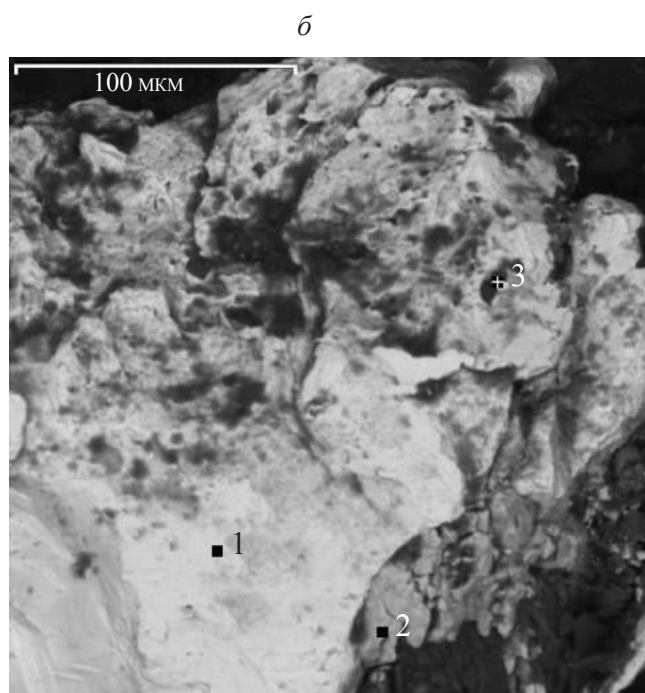
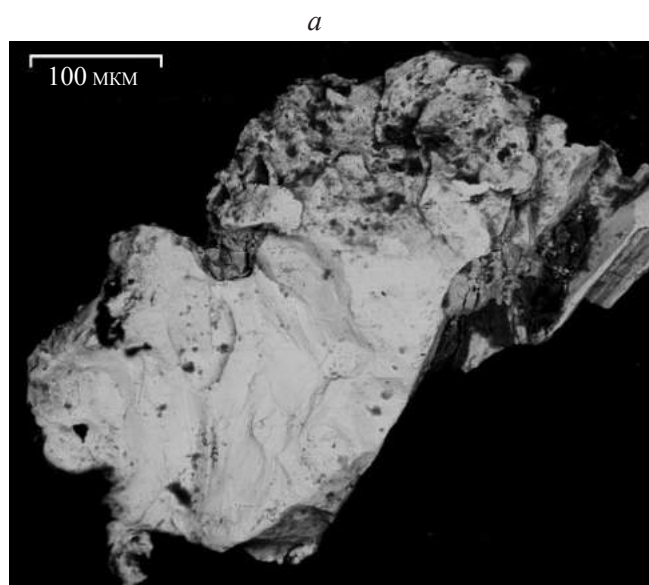


Рис. 3. Частица самородного золота комковидно-массивной разновидности цементационного вида (см. 5 на рис. 1) (а); ее увеличенный фрагмент (б); увеличенный фрагмент агрегата самородного висмута на контакте с частицей самородного золота (в)
Fig 3. A particle of native gold of the lumpy-massive variety, cementation type (see 5 at Fig. 1) (a); its enlarged fragment (b); an enlarged fragment of the native bismuth aggregate at the contact with a particle of native gold (c)

Таблица 3. Содержание химических элементов в точках, представленных на рис. 3б (в мас. %)
Table 3. Contents of chemical elements at the points presented at Fig. 3б (in weight %)

Спектр	C	O	Al	Si	Ca	Na	Fe	Ag	Au	Bi	Сумма
1	–	–	–	–	–	–	–	7,32	92,68	–	100
2	–	20,95	–	1,02	1,00	–	–	–	–	77,03	100
3	4,41	50,56	9,77	22,58	1,4	8,4	0,37	–	2,51	–	100

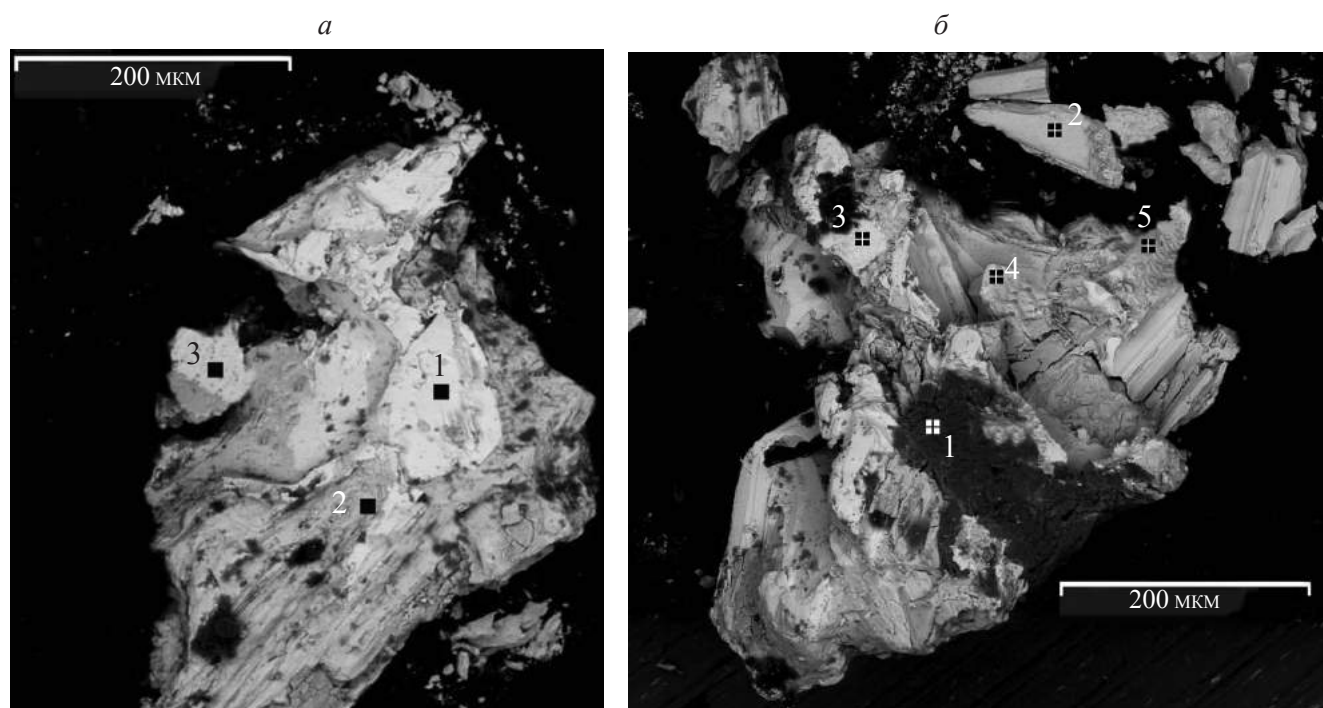


Рис. 4. Частица комковидно-петельчатой разновидности цементационного вида самородного золота (см. 9 на рис. 1) под электронным микроскопом (а); частица комковидно-ячеистой разновидности цементационного вида самородного золота (см. 11 на рис. 1), в агрегате с самородным висмутом и силикатами (б)

Fig. 4. A particle of the lumpy-loop variety, cementation type of native gold (see 9 at Fig. 1) under electronic microscope; (а) particle of the lumpy-cellular variety, cementation type of native gold (see 11 at Fig. 1), in aggregate with native bismuth and silicates (б)

Таблица 4. Содержание химических элементов в точках, представленных на рис. 3в (в мас. %)
Table 4. Contents of chemical elements at the points presented at Fig. 3в (in weight %)

Спектр	C	O	Al	Si	Ca	Fe	Ag	Au	Bi	Сумма
1	8,82	18,51	0,64	1,1	0,41	0,74	–	–	69,78	100
2	–	12,7	0,7	0,9	–	0,8	7,3	77,6	–	100
3	–	21,49	0,39	1,12	0,48	0,68	–	–	75,86	100

Таблица 5. Содержание химических элементов в точках, представленных на рис. 4а (в мас. %)
Table 5. Contents of chemical elements at the points presented at Fig. 4а (in weight %)

Спектр	O	Si	Ag	Au	Bi	Сумма
1	–	–	13,94	86,06	–	100
2	19,02	0,78	–	–	80,11	100
3	–	–	10,14	89,86	–	100

Таблица 6. Содержание химических элементов в точках, представленных на рис. 4б (в мас. %)
Table 6. Contents of chemical elements at the points presented at Fig. 4б (in weight %)

Спектр	C	O	Mg	Al	Si	Ca	Mn	Fe	Ag	Te	Au	Bi	Сумма
1	5,96	36,73	4,52	7,13	11,23	0,41	0,53	31,24	–	–	–	2,26	100
2	12,15	22,52	–	0,46	1,01	0,69	–	0,63	–	1,36	–	61,18	100
3	4,93	10,26	–	0,55	–	–	–	0,56	6,25	–	77,45	–	100
4	24,12	6,38	–	0,56	–	–	–	–	2,50	–	66,44	–	100
5	45,37	24,34	–	1,14	1,02	0,49	–	1,03	1,40	–	25,20	–	100

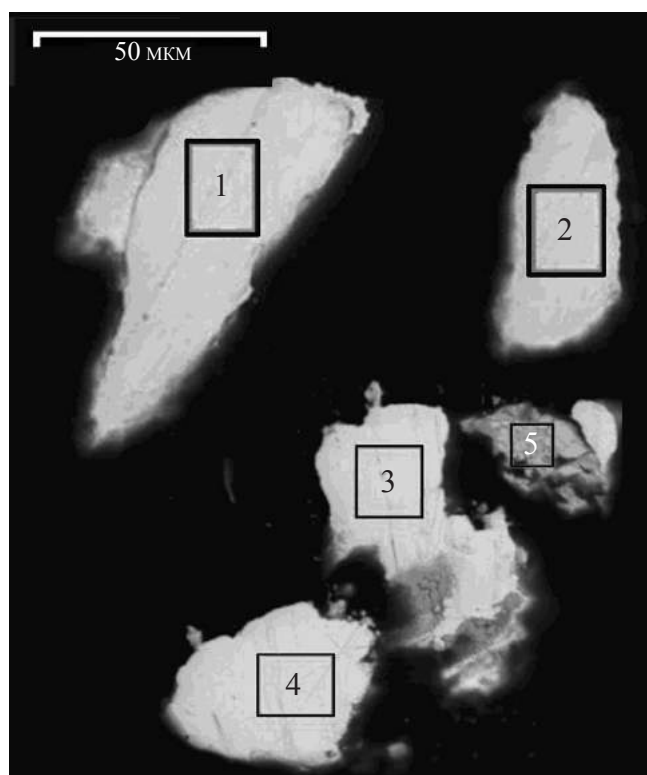


Рис. 5. Размер частиц 90×40 мкм (1), 50×25 мкм (2), 65×40 мкм (3), 45×40 мкм (4) и 15×30 мкм (5). Идентификация химических элементов в точках микроанализа частиц приведена в табл. 7
Fig. 5. A particles' sizes of 90×40 mkm (1), 50×25 mkm (2), 65×40 mkm (3), 45×40 mkm (4), and 15×30 mkm (5). The identification of chemical elements at the points of microanalysis of the particles is at Table 7

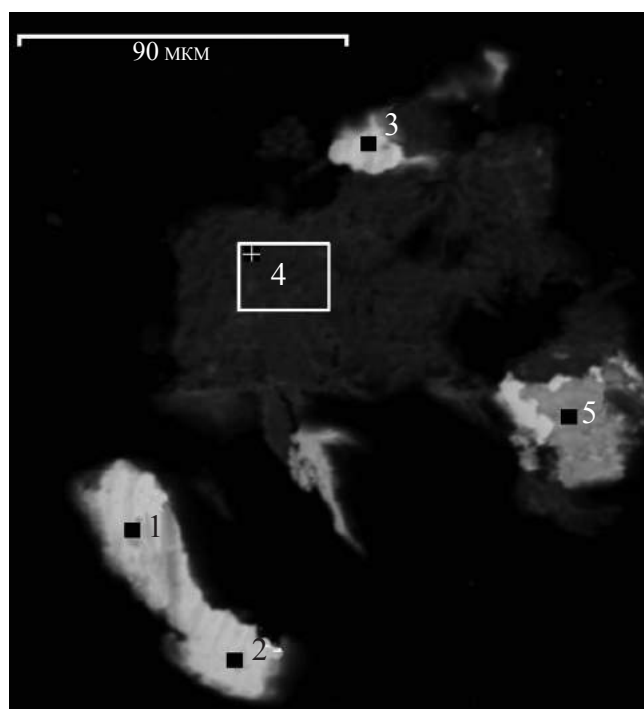


Рис. 6. Фрагменты частицы комковидно-ячеистой разновидности цементационного вида самородного золота (см. 11 на рис. 1) в агрегате с самородным висмутом, приведенной на рис. 4б: 1–3 – золото, 4 – силикатный минерал, 5 – фаза с составом: O 14,71; Ca 0,62; V 0,53; Bi 51,73
Fig. 6. Fragments of the particle of the lumpy-cellular variety, cementation type of native gold (see 11 at Fig. 1), in aggregate with native bismuth, given at Fig. 4б: 1–3 – gold, 4 – silicate mineral, 5 – a phase with composition: O 14.71; Ca 0.62; V 0.53; Bi 51.73

Таблица 7. Содержание химических элементов в точках, представленных на рис. 5 (в мас. %)
Table 7. Contents of chemical elements at the points presented at Fig. 5 (in weight %)

Спектр	O	Ca	Au	Ag	Te	Bi	Сумма
1	–	–	89,97	9,87	0,04	0,12	100
2	–	–	89,75	9,58	0,14	0,53	100
3	–	–	93,88	5,66	0,15	0,23	100
4	–	–	92,93	5,99	0,41	0,67	100
5	23,12	0,64	–	–	–	76,24	100

ВЫВОДЫ

1. Впервые для минералогических исследований использован лазерный конфокальный сканирующий микроскоп, что позволило получить морфометрические характеристики и выявить морфологические особенности частиц самородного золота мелких классов.

2. На основе полученных морфометрических характеристик предложены количественные критерии оценки изометричности частиц самородного золота, вычисляемые: как а) коэффициент уплощенности (отношение средней по длине оси к самой короткой) и б) коэффициент удлиненности (отношение самой длинной оси к средней по длине).

3. По коэффициентам изометричности исследованные частицы объединены в три группы: 1) изометричные (1,0–1,1 (а); 1,0–1,4 (б)); 2) уплощенно-удлиненные (1,0–1,4 (а); 2,0–3,7 (б)); 3) уплощенно-изометрические (1,9–2,6 (а); 1,0–1,8 (б)).

4. По морфогенетическим признакам самородное золото в изученных скарновых рудах проявлено в виде идиоморфных кристаллических и плохо

ограниченных и округлых зерен, ксеноморфных комковатых массивных, ячеистых и петельчатых частиц цементационного, а также интерстициального морфогенетического видов.

5. Самородное золото в минеральных агрегатах тесно связано с самородным висмутом, совместно с которым оно отлагалось в скарновых рудах. Частицы самородного золота содержат в своем составе серебро и типичные для золото-скарновых месторождений примеси висмута и теллура, характеризуется высокой пробностью (897–939).

6. По времени формирования идиоморфные частицы самородного золота отнесены к началу поздней стадии процесса рудообразования, когда в пустотах среди вмещающих минеральных агрегатов могли существовать условия для его кристаллизации и роста. Их образование происходило в условиях средних или малых глубин на фоне низкого давления и резкого падения температуры. Частицы самородного золота неправильного типа сформировались в заключительную стадию процесса рудообразования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Маркин М.Ю., Столяров В.В., Шишкалов И.Ю. 2014. Геологические условия локализации золотого оруденения северного фланга Тырнаузского рудного поля. *Вестник Южного научного центра*. 10(2): 44–51.
2. Парада С.Г., Столяров В.В. 2012. О роли палеозойских интрузий в локализации золотоносных минерализаций на северном фланге Тырнаузского рудного поля. *Вестник Южного научного центра*. 8(2): 33–40.
3. Парада С.Г., Столяров В.В. 2012. О связи золотого оруденения северного фланга Тырнаузского месторождения с интрузивными комплексами (Кабардино-Балкарская Республика). *Доклады Академии наук*. 445(4): 437–440.
4. Николаева Л.А., Яблокова С.В. 2007. Типоморфные особенности самородного золота и их использование при геолого-разведочных работах. *Руды и металлы*. (6): 41–57.
5. Парада С.Г. 2008. Геоморфологический аспект гранулометрического состава золота в россыпях. *Геоморфология*. (4): 48–54.
6. Петровская Н.В. 1973. *Самородное золото. Общая характеристика, типоморфизм, вопросы генезиса*. М., Наука: 346 с.
7. Гамянин Г.Н. 2001. *Минералого-генетические аспекты золотого оруденения Верхояно-Колымских мезоид*. М., ГЕОС: 222 с.
8. Некрасов И.Я. 1991. *Геохимия, минералогия и генезис золоторудных месторождений*. М., Наука: 302 с.

9. Gusev A.I. 2013. Typezation of gold-bearing skarns objects of mountain Altai. *Advances in current natural sciences. Geographical sciences*. 11: 108–112.
10. Theodore T.G., Orris G.J., Hammarstrom J.M. 1991. *Gold-bearing skarn*. U.S., "Geological Survey Bulletin 1930": 61 p.
11. Lang J.R., Baker T. 2001. Intrusion related gold systems: the present level of understanding. *Mineralium Deposita*. 36: 477–489.
12. Frost B.R., Mavrogenes J.A., Tomkins A.G. 2002. Partial melting of sulfide ore deposits during medium- and high-grade metamorphism. *The Canada Mineral*. 40(1): 1–18.
13. Tomkins A.G., Pattison D.R., Frost B.R. 2007. On the initiation of metamorphic sulfide anatexis. *J. Petrol.* 48(3): 511–535.
14. Cook N.J., Ciobanu C.L., Spry P. 2009. Understanding gold-(silver)-telluride-(selenide) mineral deposits. *Episodes*. 32(4): 249–263.
15. Гармаев Б.Л., Дамдинов Б.Б., Миронов А.Г. 2013. Золото-висмутовое проявление пограничное (Восточный Саян): состав и связь с магматизмом. *Геология рудных месторождений*. 55(6): 533–545.

REFERENCES

1. Markin M.Yu., Stolyarov V.V., Shishkalov I.Yu. 2014. [Geological conditions of localization of golden mineralization at the northern flank of the Tyrny-Auz ore field]. *Vestnik Yuzhnogo Nauchnogo Tsentra*. 10(2): 44–51. (In Russian).

2. Parada S.G., Stolyarov V.V. 2012. [On the role of Paleozoic intrusions in localization of golden mineralization on the northern slope of the Tyrnyauz ore field]. *Vestnik Yuzhnogo Nauchnogo Tsentra*. 8(2): 33–40. (In Russian).
3. Parada S.G., Stolyarov V.V. 2012. Relation of gold mineralization on the northern flank of the Tyrnyauz deposit to intrusive complexes, Kabardino-Balkar Republic. *Doklady Earth Sciences*. 445(2): 939–942.
4. Nikolaeva L.A., Yablokova S.V. 2007. [Specific typomorphic features of native gold and their use in prospecting works]. *Rudy i metally*. (6): 41–57. (In Russian).
5. Parada S.G. 2008. [Geomorphological aspect of gold granulometric composition in auriferous alluvials]. *Geomorfologiya*. (4): 48–54. (In Russian).
6. Petrovskaya N.V. 1973. *Samorodnoe zoloto. Obshchaya kharakteristika, tipomorfizm, voprosy genezisa*. [Native gold. General characteristics, typomorphism, questions of genesis]. Moscow, Nauka Publishers: 346 p. (In Russian).
7. Gamyarin G.N. 2001. *Mineralogo-geneticheskie aspekty zolotogo orudneniya Verkhoyano-Kolymskikh mezoid*. [Mineralogical-genetic aspects of gold mineralization of the Verkhoyansk-Kolyma mesozoides]. Moscow, GEOS Publishers: 222 p. (In Russian).
8. Nekrasov I.Ya. 1991. *Geokhimiya, mineralogiya i genezis zolotorudnykh mestorozhdeniy*. [Geochemistry, mineralogy and genesis of gold deposits]. Moscow, Nauka Publishers: 302 p. (In Russian).
9. Gusev A.I. 2013. Typezation of gold-bearing skarns objects of mountain Altai. *Advances in current natural sciences. Geographical sciences*. (11): 108–112.
10. Theodore T.G., Orris G.J., Hammarstrom J.M. 1991. *Gold-bearing skarn*. U.S., “Geological Survey Bulletin 1930”: 61 p.
11. Lang J.R., Baker T. 2001. Intrusion related gold systems: the present level of understanding. *Mineralium Deposita*. (36): 477–489.
12. Frost B.R., Mavrogenes J.A., Tomkins A.G. 2002. Partial melting of sulfide ore deposits during medium- and high-grade metamorphism. *The Canada Mineral*. 40(1): 1–18.
13. Tomkins A.G., Pattison D.R., Frost B.R. 2007. On the initiation of metamorphic sulfide anatexis. *J. Petrol*. 48(3): 511–535.
14. Cook N.J., Ciobanu C.L., Spry P. 2009. Understanding gold-(silver)-telluride-(selenide) mineral deposits. *Episodes*. 32 (4): 249–263.
15. Garmaev B.L., Damdinov B.B., Mironov A.G. 2013. Boundary Au-Bi Occurrence, the Eastern Sayan Mountains: Composition and Link to Magmatism. *Geology of Ore Deposits*. 55(6): 455–466.

Поступила 13.10.2015