

DOI <https://doi.org/10.30695/zrmo/2019.1484.02>

© Почетный член *Р. И. КОНЕЕВ*,* *Р. А. ХАЛМАТОВ*,** *А. Н. КРИВОШЕЕВА**

ФОРМЫ НАХОЖДЕНИЯ И МИКРО-НАНОАНСАМБЛИ ЗОЛОТА — ИНДИКАТОРЫ УСЛОВИЙ ОБРАЗОВАНИЯ, РАЗМЕЩЕНИЯ И ТИПИЗАЦИИ ОРОГЕННЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ УЗБЕКИСТАНА (ЮЖНЫЙ ТЯНЬ-ШАНЬ)

* *Национальный университет Узбекистана, 100174, Ташкент, ул. Университетская, 4;
e-mail: ri.koneev@gmail.com*

** *Центр передовых технологий, 100174, Ташкент, ул. Университетская, 3а;
e-mail: r.khalmatov@yahoo.com*

Золоторудные месторождения Кызылкумского и Нуратинского районов Узбекистана приурочены к Южно-Тяньшанскому орогенному поясу. Они размещаются в черных сланцах (Мурунтау, Мютенбай), карбонатных, терригенных и вулканогенных породах (Кокпатас, Балпантау), в интрузивных образованиях (Зармитанская зона). Возраст золотого оруденения совпадает с возрастом постколлизийного гранитоидного магматизма и составляет 280—290 млн лет. Золото наблюдается в виде микро-наночастиц и входит в состав разнообразных соединений (Au_2Bi , AuTe_2 , AuAg_2Te_3 , AuAgS , AuAg_2Se_3 , AuSb_2 и др.), образующих включения в пирите, арсенопирите, антимоните, кварце. Эти соединения формируют закономерные микро-наноансамбли, являющиеся прямыми признаками поиска и оценки золотых руд выделенных минерально-геохимических типов.

Ключевые слова: золото, наноминералогия, орогенные месторождения, Узбекистан.

R. I. KONEEV,* *R. A. KHALMATOV*,** *A. N. KRIVOSHEEVA*.* FORMS OF OCCURRENCE
AND MICRO-NANO ENSAMBLES OF GOLD AS INDICATORS
OF FORMATION CONDITIONS, SPATIAL DISTRIBUTION,
AND TYPE OF OROGENIC DEPOSITS IN UZBEKISTAN (SOUTH TIEN SHAN)

* *National University of Uzbekistan, Tashkent, Uzbekistan*

** *Center of Advanced Technologies, Tashkent, Uzbekistan*

Gold ore deposits of Uzbekistan are confined to the South Tien Shan orogenic belt. They are located in black shales (Muruntau, Amantaytau, Daugyzttau), terrigenous sedimentary (Kokpatas), volcanic (Balpantau), and intrusive (Zarmitan, Guzhumsai) rocks. Their age is 280—290 Ma and coincides with the age of post-collision granitoid magmatism. The deposits form Kyzylkum and Nurata mining districts. Gold forms micro-nanoparticles and is incorporated into diversified compounds with Bi, Sb, As, Te, Se, S, Ag, Hg in primary quartz-sulfide and sulfide ores. Seven mineral and geochemical types of ores are recognized: Au—W with scheelite and molybdenite; Au—Bi—Te with maldonite, tellurides, bismuth sulpho-tellurides; Au—As with pyrite, arsenopyrite, Ni—Co minerals; Au—Ag—Te with calaverite, petzite, hessite, etc.; Au—Ag—Se with fichterserite, acanthite, freibergite, agvilarite, petrovskite, etc.; Au—Sb—Ag with aurostibite, boulangerite, burnonite, cinnabar, chalcocite, tetrahedrite, etc.; Au—Hg with cinnabar, consbergite, Hg-bearing native gold. Recoverable resources are determined by 2—3 types of ores. Three main types of gold deposits are

proposed on the base of outlined mineralogical and geochemical types: Au—W—Bi—Te (Muruntau, Myutenbay, Zarmitan); Au—As—Sb—Ag (Amantaytau, Kokpatas, Daugyztau); Au—Ag—Sb—Se (Kosmanachi, Okzhetpes). The emphasis on the nanomineral approach in the study of gold, its compounds, and micro-nano ensembles increases the efficiency of searching, typifying and evaluating the prospects of hidden mineralization, and is favorable to determine the conditions of formation and technological properties of gold ores.

Key words: gold, nanomineralogy, orogenic deposits, Uzbekistan.

Республика Узбекистан по запасам и золотодобыче входит в первую десятку стран мира. Многолетние поисково-разведочные работы привели к открытию крупнейших орогенных месторождений золота — Мурунтау, Мютенбай, Амантайтау, Зармитан и др. (Кызылкумо-Нуратинский регион). В настоящее время перед геологической наукой Узбекистана стоит задача прогноза и поиска скрытых и нетрадиционных объектов, а перед горно-обоганительной отраслью — проблема перехода от окисленных руд с относительно крупным свободным золотом к переработке упорных сульфидных руд с «невидимым» золотом. Очевидно, что минералогия, геохимия и технологические свойства руд верхних уровней месторождений будут отличаться от состава руд на глубинах десятки-сотни метров. Все это требует разработки новых концепций и методов поиска, оценки перспектив и технологических свойств промышленных руд. В связи с тем, что в первичных сульфидных рудах золото преимущественно тонкодисперсное, одним из эффективных подходов к его изучению становится использование идей и методов нанотехнологий, активное развитие которых в начале XXI века повлияло на развитие минералогии и привело к формированию нового направления — наноминералогии. Стало возможным говорить об естественных нанотехнологиях — природных физико-химических процессах, происходящих в масштабах нанощкалы (10^{-6} — 10^{-9} м) в рудообразующих системах (Roco et al., 2001; Наноминералогия, 2005; Конеев, 2006).

НАНОМИНЕРАЛОГИЯ

Наноминералогия — раздел минералогии, изучающий условия формирования и физико-химические свойства природных соединений, размер которых не превышает 10^{-6} м. Все минералы проходят этап наносостояния при кристаллизации и многие из них остаются «карликами». Наноминералы возникают в магматогенных, гидротермальных, коллоидных и осадочных системах, но не по классической схеме кристаллизации из перенасыщенных растворов, а при диффузии и локализации примесей на дефектах структуры или распаде твердых растворов и неустойчивых соединений. Наночастицы формируются в тектогенных и взрывных процессах, при брекчировании, выветривании, обогащении руд. Необычные свойства наноминералов и наночастиц определяются большой удельной поверхностной энергией, которая начинает быстро возрастать, когда размер частиц становится меньше 100 мкм и стремится к бесконечности при образовании нанообъектов — фуллеренов, нанотрубок или послойно формирующихся кристаллических индивидов (Конеев, 2006). В результате «размерных эффектов» наночастицы и наноминералы приобретают высокую химическую, каталитическую, сорбционную активность. Само же золото, известное как «благородный», химически инертный металл, в наносостоянии становится чрезвычайно активным и в рудах встречается не только в виде самородного металла, но и в виде соединений с Bi, As, S, Sb, Hg, Cu, Te, Se и другими элементами.

Размер наноминералов может выходить за пределы нанoshкалы, если они формируются атомами тяжелых металлов с большими радиусами (Bi, Pb, Sb, Te, Au, Hg и др). В арсенопирите из Мурунтау размер нановключений золота составляет 0.07—0.1 мкм, в пирите Бақырчыка (Казахстан) — 0.5—1.5 мкм.

МЕТОДОЛОГИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

При изучении золотых руд речь, чаще всего, идет о наночастицах золота, которые исследователи непременно стремятся «увидеть». Современные высокоразрешающие приборы — сканирующие электронные, атомно-силовые и другие микроскопы позволяют визуализировать морфологию наночастиц размером менее 1 мкм, но, к сожалению, не определяют химический состав, который имеет важнейшее значение при поисках, типизации и оценки перспектив новых объектов.

Методика исследования золотых руд, названная методом минералого-геохимической нанотехнологии, базируется на следующих методологических положениях.

1. Золото в первичных рудах коренных месторождений — это типичный микро-наноминерал размером от 100 до 0.001 мкм, выделяющийся в виде частиц самородного металла, либо соединений. Эти соединения образуются при распаде сложных комплексов золота с As, S, Bi, Sb, Te, Se, Hg, в виде которых золото транспортируется в гидротермальных растворах (Некрасов, 1991).

2. Форма нахождения золота, состав его соединений и микро-наноансамблей сопутствующих элементов, последовательность выделения минералов и минеральных ассоциаций определяются физико-химическими законами процессов рудообразования. Как показали А. А. Кременецкий и Э. Ф. Минцер (1995), на всех месторождениях золота, независимо от состава вмещающих пород, формы рудных тел и других геологических характеристик, проявлен единый ряд минеральных типов, включающий: золото-пирит-арсенопиритовый, золото-полисульфидный, золото-теллуридный, золото-антимонитовый, золото-киноварный типы. Д. В. Рундквист (1997) выделяет более детальный ряд геохимических парагенезисов: /Au—W/Au—Mo/Au—As/Au—Cu—Pb—Zn/Au—Te/Au—Ag/Au—Sb/Au—Sb—As—Hg/. В технологических исследованиях (Зеленов, 1989), используется аналогичный ряд типов руд, включающий золото-серебряный, золото-мышьяковый, золото-сурьмяный, золото-теллуристый, золото-висмутовый типы.

В применяемых нами методах исследования (электронно-зондовый микроанализ, Superprobe-8800R (Jeol), сканирующая электронная микроскопия, Carl Zeiss с приставкой EDX Oxford instrument) основной акцент был сделан на изучении грави- и флотоконцентратов. Это главные промышленные продукты, из которых извлекается золото. Предварительно пробы анализировались методом ICP MS.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Золоторудные месторождения Кызылкумо-Нуратинского региона приурочены к Южно-Тяньшанскому орогенному поясу (рис. 1). Возраст золотого оруденения, определенный Os—Re методом по арсенопириту и пириту, совпадает с возрастом постколлизийного гранитоидного магматизма, определенного

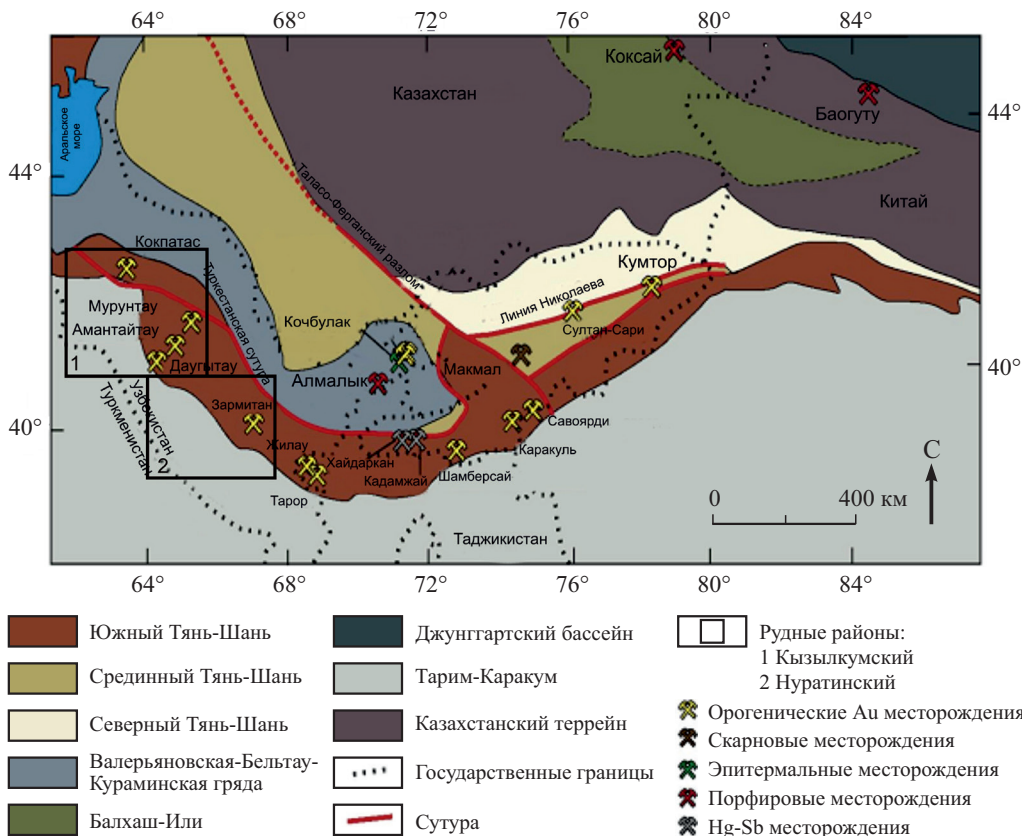


Рис. 1. Геологическая схема размещения золоторудных месторождений в геодинамических структурах Центральной Азии (Goldfarb et al., 2014).

Fig. 1. Geological scheme of gold deposit locations in geodynamic structures of the Central Asia (Goldfarb et al., 2014).

U—Pb методом по циркону и составляет 280—290 млн лет (Dolgopolova et al., 2016). Месторождения размещаются в черных сланцах (Мурунтау, Мютенбай), карбонатных, терригенных и вулканогенных породах (Кокпатас, Балпантау), в интрузивных образованиях (Зармитанская зона), в узлах пересечения орогенного пояса поперечными трансформными разломами (Koneev et al., 2010).

Микро-наноминералогические исследования проводились на месторождениях Мурунтау, Мютенбай, Амантайтау, Даугызтау, Аджибугут, Высоковольтное, Косманачи, Зармитан, Гужумсай, Урталик, Маржанбулак. Предварительные геохимические исследования выявили ряд новых особенностей золотых руд. Для сравнения геохимических типов руд были рассчитаны коэффициенты концентрации элементов относительно среднего содержания в земной коре и построены геохимические ряды интенсивности накопления элементов в рудах (Koneev et al., 2010):

I

Мурунтау Bi—As—Te—Au—Se—W—Ag—Sb—Mo—Hg—Pb—Cu—Sn—Zn—Co

Мютенбай As—Te—Bi—Au—Se—Sb—W—Ag—Hg—Mo—Cu—Pb—Sn—Ni—Zn

Зармитан As—Te—Bi—Au—Sb—Ag—Se—W—Pb—Hg—Mo—Sn—Cu—Co—Zn

Урталик Te—Bi—Au—As—Sb—Ag—Pb—W—Se—Hg—Mo—Zn—Cu—Sn—Co

II

Амантайтау Au—As—Te—Sb—Bi—Se—Ag—Hg—Pb—W—Cu—Co—Ni—Sn—Mo
Даугызтау Au—As—Te—Sb—Bi—Ag—Se—Pb—Hg—W—Mo—Zn—Cu—Sn

III

Косманачи Ag—Sb—Te—Se—Au—Pb—As—Bi—Mo—Cu—Hg—Zn—W—Sn—Ni
Высоковольное Ag—Sb—Te—Se—As—Bi—Au—Pb—Hg—Sn—W—Cu—Mo—Zn—Ni

Вместе с Au в рудах прежде всего накапливаются Bi, Te, As, Sb, Ag, Se, образуя три группы месторождений. Коэффициенты концентрации этих элементов в рудах составляют тысячи и сотни. Среди лидеров важнейшими во всех рудах являются Te, As, Sb и Bi. Далее следуют Se, Ag, Hg, в некоторых объектах высокие коэффициенты концентрации имеют W и Pb; для остальных элементов эти коэффициенты не превышают десятков. Заметим, что набор ведущих элементов в одной группе месторождений не зависит от вмещающей среды. Так, месторождения Мурунтау, Мютенбай размещаются в «черных сланцах», а Зармитан, Урталик в граносиенитах. В обоих случаях золото накапливается вместе с Bi, As и Te.

Микро-наноминералогические исследования позволили установить, что формы нахождения золота в рудах гораздо более разнообразны, чем это представлялось ранее. Кроме свободного золота, электрума и кюстелита, установлены мальдонит (Au_2Bi), аурустибит ($AuSb_2$), калаверит ($AuTe_2$), петцит ($AuAg_2S_3$), петровскит ($AuAgS$), фишессерит ($AuAg_3Se_2$), ртутистое золото, золотосодержащие арсенопирит и пирит (табл. 1). Эти соединения образуют в матрице кварца, арсенопирита, пирита, антимонита, редко других минералов закономерные микро-наноансамбли включений теллуридов, сульфосолей, селенидов Bi, Sb, Ag, Pb, реже других элементов вместе с Au (рис. 2). Состав их чаще всего нестехиометричен из-за влияния «размерных эффектов». Самородное золото имеет широкий диапазон пробности (от 300 до 1000 ‰). Гистограмма частоты встречаемости самородного золота различной пробности имеет многомодальный характер с отдельными интервалами пробности для различных типов руд (рис. 3). Каждый максимум показателен для устойчивых соединений Au и Ag, тогда как промежуточные значения соответствуют неупорядоченным твердым растворам. Пробность снижается от ранних к поздним типам руд или от глубоких уровней месторождений к близповерхностным.

Характерные соединения золота и его микро-наноансамбли являются прямыми поисковыми признаками определенных минерально-геохимических типов руд. Всего выделено семь подобных типов.

Au—W, редкометалльный тип с шеелитом, молибденитом, пиритом. Является ранним гидротермально-метасоматическим. Последующие золотоносные ассоциации накладываются на этот тип.

Au—Bi—Te, висмут-теллуридный, ведущий продуктивный на Мурунтау, Мютенбае, Зармитане. В качестве минералов-индикаторов показательны мальдонит, теллуриды и сульфотеллуриды висмута — теллуровисмутит, цумоит и другие (табл. 2). Вместе с шеелитовой, висмут-теллуридная минерализация характерна для скарновых вольфрамовых месторождений.

Au—As—(Ni, Co), арсенопирит-пиритовый с меняющимся отношением арсенопирита и пирита. Присутствует во всех месторождениях и составляет

Таблица 1

Химический состав минералов (мас. %), содержащих золото, в рудах месторождений Кызылкум-Нурагинского региона
 Chemical composition (wt %) of gold-bearing minerals in ores of deposits in the Kyzylkum-Nurata region

№ п/п	Минерал	Тип руды, месторождение	Au	Ag	Hg	Bi	Sb	As	Fe	Ni	Te	Se	S	Σ
1	Мальдонит	$\underline{\text{Au}}-\underline{\text{Bi}}-\underline{\text{Te}}$	62.08	0.63	—	34.29	—	—	—	—	0.34	2.09	—	99.43
2	Au_2Bi	Мюntenбай	64.68	—	—	34.80	—	0.72	—	—	—	—	0.18	100.38
3		Триада	64.25	—	—	35.32	—	—	—	—	—	—	0.76	100.33
4		Зармиган	66.60	—	—	38.61	—	—	—	—	0.27	—	—	99.48
5	Золотоносный арсенинит	Мюntenбай	0.49	—	—	—	—	49.01	31.40	—	—	—	18.72	99.62
6	Золотоносный пирит	—	0.27	—	—	—	—	1.58	46.43	—	—	—	52.16	100.44
7	Калаверит AuTe_2	$\underline{\text{Au}}-\underline{\text{Ag}}-\underline{\text{Te}}$	44.48	0.35	—	—	—	—	—	—	55.27	—	0.40	100.5
8		Амантайгау	44.18	0.17	—	—	—	—	—	—	55.96	—	—	100.31
9	Петлит AuAg_3Te_2	Гужумсай	23.59	42.70	—	—	—	—	0.93	—	33.14	—	—	100.83
10		—	23.24	42.32	—	—	—	—	0.80	—	33.51	—	—	100.3
11	Филлессерит	$\underline{\text{Au}}-\underline{\text{Ag}}-\underline{\text{Se}}$	29.17	46.76	—	—	—	0.27	—	—	—	23.85	—	100.05
12	AuAg_3Se_2	Аджибугут	28.71	46.57	—	—	—	0.41	—	—	—	23.30	—	98.99
13		—	28.34	48.47	—	—	—	0.22	—	—	—	22.89	—	99.92
14	Петровскит	—	54.29	36.42	—	—	—	—	—	—	—	—	8.92	99.92
15	AuAgS	—	53.40	36.73	—	—	—	—	—	—	—	—	9.48	100.46
16	Ауростибит	$\underline{\text{Au}}-\underline{\text{Sb}}-\underline{\text{Ag}}$	44.02	—	—	—	52.44	0.56	0.75	1.71	—	—	0.53	100.01
17	AuSb_2	Амантайгау	43.14	—	—	—	53.44	0.56	0.75	1.71	—	—	0.53	100.13
18		Зармиган	45.93	—	—	2.50	50.03	—	—	—	—	—	—	100.46
19	Рутитное золото ($\text{Au}, \text{Ag}, \text{Hg}$)	$\underline{\text{Au}}-\underline{\text{Hg}}$	90.70	5.70	2.87	—	—	—	—	—	—	—	—	99.27
		Амантайгау	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

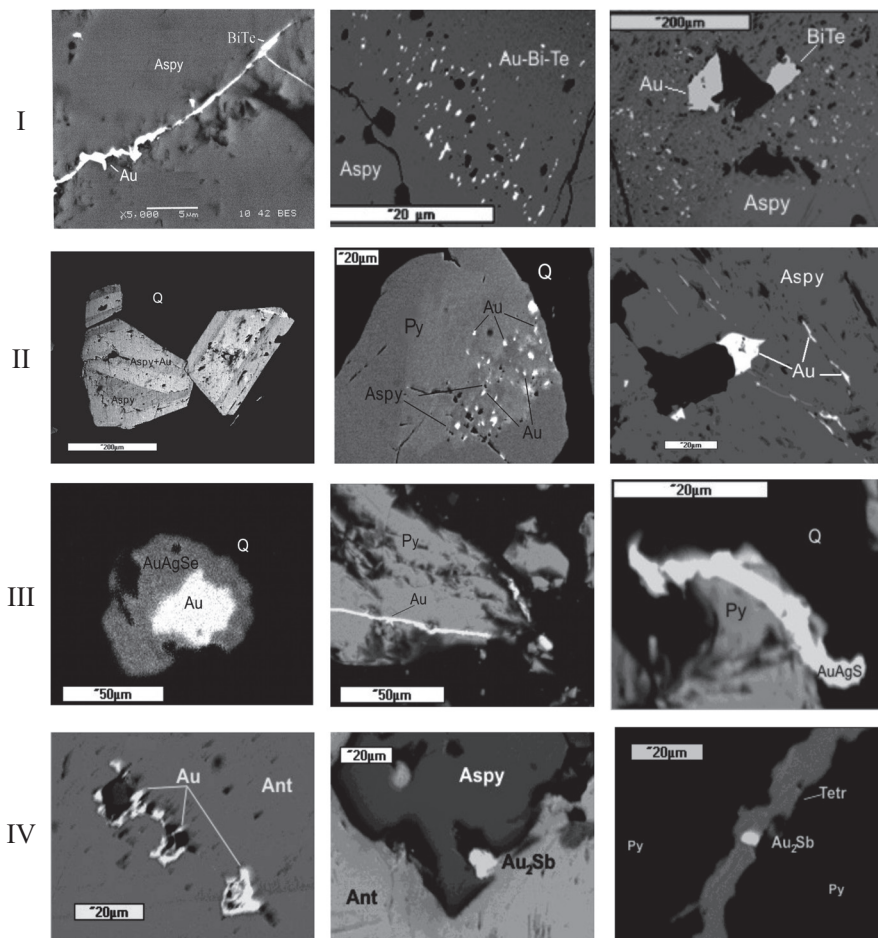


Рис. 2. Микро-наноминеральные формы выделения золота и его соединений в различных типах руд: I — Au—Bi—Te, II — Au—As, III — Au—Ag—Se, IV — Au—Sb.

Aspy — арсенопирит, Q — кварц, Py — пирит, AuAgS — петровскит, AuAgSe — фишессерит, Au—Bi—Te — мальдонит и теллуриды Bi, Ant — антимонит, Au₂Sb — ауристит, Au — золото.

Fig. 2. Micro-nanomineral forms of gold and its compounds in different types of ores: I — Au—Bi—Te; II — Au—As; III — Au—Ag—Se; IV — Au—Sb.

основную сульфидную часть руд. В рудах этого типа присутствуют пирротин, Ni—Co сульфиды и арсениды. Пирит содержит примесь As (до 5—7 %), арсенопирит — примесь Sb (до 1 %) (табл. 3).

Au—Ag—Te, серебро-теллуридный. В регионе распространен мало, характеризуется присутствием гессита, штюцита, калаверита, петцита, Te-содержащего канфильдита, кервеллеита (табл. 4). Один из ведущих типов в Чаткало-Кураме (Конеев, 2006).

Au—Ag—Se, сульфосольно-селенидный. Аналогичен эпитермальной Au—Ag минерализации Чаткало-Кураминского региона. Показательны Ag—Sb сульфосоли, сульфиды, селениды серебра, в том числе «редкие»: науманит, агвиларит, клаусталит, антимонселит (табл. 4).

Au—Sb, антимонит-сульфоантимонидный. Очень распространены Pb—Sb сульфосоли типа буланжерита, тетраэдрита и др. (табл. 5). Уменьшение кон-

Рис. 3. Объединенная гистограмма пробности золота в орогенных месторождениях Кызылкум-Нуратинского района. $N = 203$.

Выделяется 5 интервалов пробности, характерных для разных типов руд: I — 1000—850 ‰, Au—Bi—Te; II — 850—740 ‰, Au—As и Au—Ag—Te; III — 740—640 ‰, Au—Sb и Au—Ag; IV — 640—480 ‰, Au—Ag—Se и Au—Sb; V — 480—320 ‰, Au—Ag—Se.

Fig. 3. Combined histogram of gold content for orogenic deposits in the Kyzylkum-Nurata region. $N = 203$.

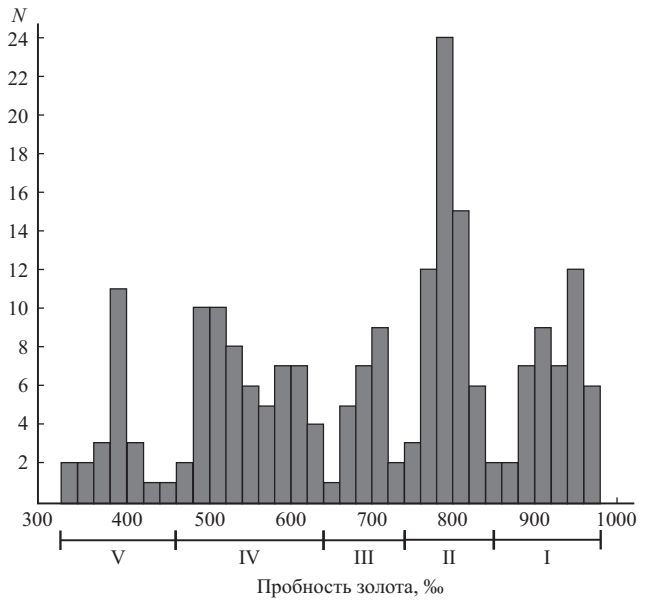


Таблица 2

Химический состав (мас. %) теллуридов и сульфотеллуридов висмута из Au—Bi—Te типа руд месторождений Кызылкум-Нуратинского региона

Chemical composition (wt %) of tellurides and sulphotellurides of bismuth from Au—Bi—Te type of ores in the Kyzylkum-Nurata region

№ п/п	Минерал	Месторождение	Au	Ag	Bi	Sb	As	Pb	Te	Se	S	Σ
1	Хедлейит	Мурунтау	—	—	77.00	—	—	—	22.98	0.27	—	100.25
2	Bi ₇ Te ₃	Мютенбай	0.26	0.22	76.96	0.38	—	—	20.23	1.45	—	99.02
3		Триада	—	—	74.23	—	—	—	23.37	2.43	—	100.03
4	Se-содержащий хедлейит	Мютенбай	0.21	0.87	78.32	—	—	—	11.62	7.98	0.94	98.86
5	Bi ₇ (Te,Se) ₃		0.23	0.81	76.48	—	—	—	12.51	8.67	1.08	98.74
6	Пильзенит	Мурунтау	—	—	65.15	0.70	—	—	32.79	1.70	0.26	100.6
7	Bi ₄ Te ₃	Мютенбай	0.61	0.25	65.50	0.63	—	—	33.37	1.21	0.23	100.94
8	Цумоит	Мурунтау	—	—	61.85	—	—	—	38.31	—	0.66	100.82
9	BiTe	Мютенбай	—	—	61.87	—	—	—	35.03	3.62	—	100.52
10		Гужумсай	—	0.39	62.15	—	—	—	36.57	—	0.51	99.23
11			—	0.82	61.12	0.49	—	—	36.72	—	0.56	98.89
12	Теллуrowисмутит	Мурунтау	—	—	55.14	—	—	—	43.75	—	0.26	99.15
13		Мютенбай	—	—	52.97	—	—	—	45.08	2.91	—	100.96
14	Bi ₂ Te ₃	Зармитан	—	1.96	51.69	—	—	0.73	46.00	—	0.44	98.96
15			—	2.36	51.59	—	—	0.94	45.30	—	0.98	98.81
16		Гужумсай	—	3.28	51.24	—	—	—	45.86	—	—	100.38
17			—	2.48	52.75	—	—	—	44.67	—	—	99.90
18	Волынскит	Зармитан	—	16.15	40.12	—	—	0.72	42.10	—	0.20	99.29
19	AgBiTe ₂		—	15.09	40.68	—	—	0.74	41.78	—	0.28	98.57
20	Жозеит А	Мютенбай	—	—	81.60	—	—	—	9.78	1.46	7.16	100.00
21	Bi ₄ TeS		—	—	81.81	—	—	—	9.56	2.54	6.09	100.00

Таблица 2 (продолжение)

№ п/п	Минерал	Месторождение	Au	Ag	Bi	Sb	As	Pb	Te	Se	S	Σ
22	Жозеит В	Мурунтау	—	—	74.16	—	1.42	—	20.58	—	2.64	98.80
23	Ві ₄ Te ₂ S	Мютенбай	—	—	74.69	—	—	—	21.83	0.24	2.93	99.69
24		Гужумсай	—	—	74.62	—	—	0.72	22.29	0.30	2.82	100.75
25	Ингодит	Мурунтау	—	—	72.70	—	2.40	—	22.10	0.20	4.11	101.51
26	Ві ₂ TeS	Мютенбай	—	—	72.06	—	—	—	22.13	—	5.03	99.22
27	Сульфоцу- монт	Мютенбай	—	—	68.19	—	—	—	26.83	1.63	3.59	100.24
28	Ві ₃ Te ₃ S		—	—	68.45	—	—	—	26.52	1.39	3.84	100.20
29	Тетради- мит	Мурунтау	—	—	58.06	—	0.62	—	36.03	1.63	4.31	100.65
30	Ві ₂ Te ₂ S		—	—	58.03	—	0.57	—	35.29	1.14	4.55	99.58

Таблица 3

Химический состав (мас. %) сульфидов и арсенидов
из Au—As (Ni, Co) типа руд месторождений Кызылкум-Нуратинского региона

Chemical composition (wt %) of sulphides and arsenides
from Au—As (Ni, Co) type of ores in the Kyzylkum-Nurata region

№ п/п	Минерал	Месторождение	As	Sb	Cu	Fe	Ni	Co	S	Σ
1	Пирит	Мурунтау	0.94	—	—	46.71	—	—	53.01	100.66
2	FeS ₂	Кокпатас	4.98	—	—	46.45	—	—	49.45	100.88
3		Амантайтау	2.89	—	—	46.24	—	—	50.90	100.03
4		Аджибугут	1.29	—	—	46.57	—	—	52.98	100.84
5	Арсенопи- рит	Мурунтау	46.67	0.27	—	33.97	—	—	18.85	99.76
6	FeAsS	Мютенбай	47.44	0.25	—	33.95	—	—	18.79	100.43
7		Зармитан	43.63	0.33	—	34.39	—	—	22.32	100.67
8		Гужумсай	44.61	0.28	—	34.94	—	—	20.24	100.07
9	Пирротин	Мютенбай	0.18	—	—	60.18	—	—	39.46	99.82
10	Fe _{1-x} S		0.49	—	—	60.02	—	—	38.67	99.18
11		Кокпатас	—	—	—	58.88	0.23	—	39.85	98.96
12		Ургалик	—	—	—	58.89	—	—	40.47	99.36
13		Гужумсай	—	—	—	59.78	—	0.45	39.35	99.58
14	Кобальтин	Мурунтау	46.93	0.21	0.32	4.77	4.12	24.71	19.13	100.19
15	CoAsS	Мютенбай	47.06	0.29	0.25	5.21	4.29	24.04	18.83	99.97
16	Пентландит	Мурунтау	—	—	—	29.13	32.56	—	38.31	100.00
17	(Fe,Ni) ₉ S ₈		—	—	—	24.15	39.12	—	36.84	100.11
18			—	—	—	25.29	40.89	—	33.25	99.43
19			—	—	—	22.55	44.71	—	31.81	99.07
20	Лёллингит	Мютенбай	73.95	—	0.49	17.49	7.00	0.20	1.11	100.24
21	(Fe,Ni)As ₂		74.36	—	0.31	16.95	6.18	0.21	1.01	99.02
22	Герсдорфит	Зармитан	43.85	0.38	—	8.59	21.53	5.58	19.16	99.09
23			44.26	0.47	—	7.01	22.79	6.20	18.99	99.72
24	NiAsS	Кокпатас	45.96	1.42	—	2.73	27.22	3.83	20.15	101.31
25			43.44	0.87	—	5.98	25.23	4.84	19.37	99.73
26		Аджибугут	46.61	—	—	7.67	15.81	10.77	19.14	100.00
27			45.92	—	—	8.57	14.58	11.42	19.20	99.69

**Химический состав (мас. %) теллуридов и селенидов серебра
из Au—Ag—Te и Au—Ag—Se типов руд месторождений Кызылкум-Нуратинского региона**

**Chemical composition (wt %) of silver tellurides and selenides
from Au—Ag—Te and Au—Ag—Se types of ores in the Kyzylkum-Nurata region**

№ п/п	Минерал	Месторождение	Au	Ag	Bi	Sb	Pb	Sn	Te	Se	S	Σ
1	Гессит	Амантайтау	—	63.52	—	—	—	—	37.22	—	0.23	100.97
2	Ag ₂ Te	Окжетпес	—	62.77	—	—	—	—	36.43	—	0.84	100.04
3		Гужумсай	—	60.35	—	—	3.36	—	36.13	—	0.16	100.00
4			—	60.57	1.63	—	2.49	—	34.93	—	0.39	100.01
5		Зармитан	—	62.85	—	—	—	—	37.66	—	0.20	100.71
6			—	62.05	—	—	—	—	37.63	—	0.39	100.07
7	Штютцит	Зармитан	—	58.53	—	—	—	—	40.46	—	0.32	99.31
8	Ag ₅ Te ₃		—	58.12	—	—	—	—	41.56	—	—	99.68
9		Гужумсай	—	58.12	—	—	—	—	41.56	—	—	99.68
10			—	59.60	—	—	—	—	40.77	—	—	100.37
11	Te-содержащий канфильдит	Мурунтау	—	65.13	—	—	—	8.46	19.44	—	7.80	100.83
12	Ag ₈ Sn(S,Te) ₆	Гужумсай	—	63.08	—	—	—	9.33	19.16	—	9.42	100.99
13	Кервеллит	Зармитан	—	72.52	—	—	—	—	20.06	—	6.52	99.10
14	Ag ₄ TeS		—	72.97	—	—	—	—	20.19	—	6.80	99.96
15	Науманнит	Аджибугут	—	73.68	—	—	—	—	0.42	25.29	—	99.39
16	Ag ₂ Se		—	73.54	—	—	—	—	0.25	25.38	—	99.17
17		Мютенбай	0.10	73.72	—	—	—	—	0.15	27.72	0.14	101.83
18			0.11	73.09	—	—	—	—	0.17	26.59	0.13	100.09
19		Окжетпес	—	73.91	—	—	—	—	0.24	26.99	—	101.14
20	Агвиларит	Мютенбай	0.15	80.65	—	—	—	—	0.18	11.90	8.09	100.97
21	Ag ₄ SeS		—	80.42	—	—	—	—	0.14	10.17	8.19	98.92
22	Ag-содержащий клаусталит	Мютенбай	—	7.31	—	—	63.61	—	0.31	26.39	1.92	99.54
23	(Pb,Ag)SeS		—	9.40	—	—	63.55	—	0.22	26.02	1.53	100.72
24	Клаусталит	Мютенбай	—	0.35	—	—	71.88	—	—	26.42	1.74	100.39
25	PbSe		—	0.50	—	—	71.15	—	—	26.18	1.80	99.63
26	Se-содержащий галенит	Высоковольтное	—	—	—	—	78.91	—	—	10.21	10.24	99.36
27	Pb(Se,S)		—	—	—	—	79.17	—	—	9.37	10.61	99.15
28	Антимонселит	Мютенбай	—	—	—	59.42	—	—	—	33.60	6.98	100.00
	Sb ₂ (Se,S) ₃											
29	Se-содержащий миаргирит	Мютенбай	—	30.31	—	40.45	—	—	—	20.56	8.01	99.33
	AgSb(Se,S) ₂											

Химический состав (мас. %) сульфопантимонидов из Au—Sb типа руд месторождений Кызылкум-Нуратинского региона
 Chemical composition (wt %) of sulfopantimonides from Au—Sb type of ores in the Kyzylkum-Nurata region

№ п/п	Минерал	Месторождение	Sb	Pb	Bi	As	Cu	Fe	Ni	Ag	Zn	S	Σ
1	Бертьерит FeSb ₂ S ₄	Зармиган	57.98	—	—	—	—	12.71	—	0.31	—	29.57	100.57
2			57.28	—	—	—	—	13.23	—	0.45	—	29.78	100.74
3	Цинксит PbSb ₂ S ₄	Амангайтау	45.74	32.04	—	—	0.41	0.49	—	—	—	21.70	100.38
4		Даугызтау	46.81	31.69	—	—	0.50	—	—	0.51	—	20.52	100.03
5	Плагинит Pb ₃ Sb ₈ S ₁₇	Амангайтау	37.96	40.22	—	—	0.62	—	—	—	—	20.55	99.35
6			37.60	41.49	—	—	0.22	—	—	—	—	20.92	100.23
7	Джемсонит Pb ₄ FeSb ₆ S ₁₄	Даугызтау	33.96	39.68	—	—	—	4.48	—	—	—	22.25	100.37
8			34.67	38.50	—	—	—	4.41	—	—	—	21.73	99.31
9		Зармиган	35.61	38.11	—	0.21	—	3.25	—	0.30	—	21.70	99.18
10			35.85	38.79	—	0.89	—	3.09	—	0.37	—	21.01	100.00
11	Овихит Ag ₂ Pb ₃ Sb ₆ S ₁₅	Зармиган	28.91	47.03	—	—	—	—	—	5.13	—	19.35	100.42
12			29.12	46.87	—	—	—	—	—	5.57	—	19.07	100.63
13	Семсейт Pb ₉ Sb ₈ S ₂₁	Даугызтау	26.62	52.87	—	—	—	0.26	—	—	—	20.16	99.91
14			27.13	52.75	—	—	—	0.37	—	—	—	20.21	100.46
15	Буланжерит Pb ₃ Sb ₄ S ₁₁	Кокпагас	24.89	55.63	—	—	—	—	—	—	—	18.28	98.80
16			25.52	55.86	—	—	—	—	—	—	—	18.63	100.01
17	Ag-содержащий буланжерит Pb ₅ Sb ₄ S ₁₃	Зармиган	23.31	53.98	—	—	—	—	—	5.14	—	17.93	100.36
18			23.16	54.56	—	—	—	—	—	4.37	—	17.92	100.01
19			23.73	54.71	—	—	—	—	—	4.31	—	16.85	99.60
20	Бурнонит PbCuSbS ₃	Кокпагас	24.92	42.19	—	—	12.87	—	—	—	—	20.00	99.98
21			24.71	42.72	—	—	12.53	—	—	—	—	19.66	99.62

22	Андорит $Ag_5Pb_8Sb_7S_{18}$	Даугызтау	41.91	23.99	—	—	—	0.39	0.30	—	10.63	—	22.69	99.91
23	Халькостибит $CuSbS_2$	Амантайтау	40.20	24.69	—	—	—	0.47	0.23	—	11.08	—	23.07	99.74
24	Тетраэдрит $Cu_2Sb_4S_{13}$	Даугызтау	48.69	—	—	—	—	25.96	—	—	—	—	25.88	100.53
25	Аг-содержащий тетраэдрит $(Cu,Ag)_2Sb_4S_{13}$	Даугызтау	49.24	—	—	—	—	24.86	—	—	—	—	25.80	99.90
26	Кокпагас	Кокпагас	29.91	—	—	—	—	37.48	0.21	—	0.82	6.68	24.62	99.72
27	Амантайтау	Амантайтау	29.39	—	—	—	—	36.23	1.08	—	0.43	6.18	25.99	99.30
28	Аг-содержащий тетраэдрит $(Cu,Ag)_2Sb_4S_{13}$	Амантайтау	28.98	—	—	—	—	35.40	4.86	—	1.87	2.00	26.16	99.27
29	Зармитан	Даугызтау	28.37	—	—	—	—	34.65	4.89	—	4.47	0.95	25.71	99.04
30	Аг-содержащий сахароваит $PbBiSbS_4$	Зармитан	20.86	30.12	20.91	0.39	—	—	—	—	8.67	—	19.68	100.63
31	Аг-содержащий кобеллит $Pb_6Bi_4Sb_2S_{16}$	Гужумсай	21.41	31.08	21.41	0.68	—	—	—	—	7.36	—	19.82	101.76
32			10.62	42.56	26.31	—	—	—	—	—	2.35	—	17.87	100.54
33			11.56	41.85	24.94	—	—	—	—	—	0.91	—	18.11	99.70

Таблица 6

Главные типы промышленных орогенных золоторудных месторождений Кызылкум-Нуратинского региона Узбекистана
The main types of industrial orogenic gold ore deposits in the Kyzylkum-Nurata region of Uzbekistan

Тип руды	Тип месторождения									
	Au—Bi—Te—W			Au—Ag—Sb—Se				Au—As—Sb—Ag		
Au—Hg киноварный	Киноварь, конгсбергит, ртутистое золото			Киноварь, конгсбергит, ртутистое золото				Киноварь, конгсбергит, ртутистое золото		
Au—Sb антимонит-сульфоантимонидный	Антимонит, буланжерит, бурнонит, джемсонит, миаргирит			Антимонит, буланжерит, джемсонит, миаргирит,				Антимонит, буланжерит, бурнонит, джемсонит, цинкениг, тетраэдрит, миаргирит, андорит, семсейит, самородное золото (850—640 %), ауристибит		

Тип руды	Тип месторождения		
	Au—Bi—Te—W	Au—Ag—Sb—Se	Au—As—Sb—Ag
Au—Ag—Se сульфосольно-селенидный	Акантит, полибазит, фрейберит, пирарипирит, науманнит, клаусталит, электрум	Самородное серебро, акантит, полибазит, фрейберит, стефанит, штромейрит, науманнит, агиларит, электрум, кюстелит, петровскаит, фишессерит	Самородное серебро, акантит, пирарипирит, фрейберит, науманнит, электрум
Au—Ag—Te серебро-теллуридный	Гессит, штюццит, алтаит	Гессит, штюццит	Гессит, алтаит, калаверит, петцит
Au—As (Ni, Co) арсенопирит-пиритовый	Арсенопирит, мышьковистый пирит, пирротин, никелин, кобальтин, герсдорфит, пентландит, лёллинит, золотоносный арсенопирит, золотоносный пирит	Мышьковистый пирит, арсенопирит, пирротин, герсдорфит, золотоносный арсенопирит, золотоносный пирит	Мышьковистый пирит, арсенопирит, пирротин, никелин, герсдорфит, кобальтин, лёллинит, золотоносный арсенопирит, золотоносный пирит
Au—Bi—Te висмут-теллуридный	Самородные Bi, Te, хедлейт, пильзенит, цумоит, теллуровисмутит, сульфопумоит, жозеит A, B, ингодит, вольнскит, кобеллит, сахароваит, кавачулит, густавит, матильдит, висмутин, самородное золото (1000—850 ‰), мальдо-нит	Матильдит	Сахароваит, кобеллит
Au—W редкометалльный	Шеелит, молибденит, пирит, арсенопирит, моноцит, ксенотим	Шеелит	Шеелит
Элементы-индикаторы Месторождения	Bi, Te, As, W Мурунтау, Мютенбай, Триада, Зармитанская зона (Зармитан, Ургалик, Гужумсай)	Ag, Sb, Se, Te, As Косманачи, Высоковольное, Аджибу-гут, Ожкетпес	As, Sb, Pb, Te, Ag, Se Кокпатаг, Амантайтау, Даугызтау, Зармитанская зона, Марджанбулак

центрации Pb в растворе приводит к образованию самостоятельных антимонитовых жил.

Au—Hg, киноварный тип развит в виде отдельных рудопроявлений и в рудах, представлен выделениями киновари, конгсбергита, ртутистого золота. Вместе с сурьмяным типом самостоятельные промышленные объекты образуют в восточной части орогенного пояса (Кадамжай, Хайдаркан).

Выделенный стандартный ряд минерально-геохимических типов руд одинаков и для Кызылкумского, и для Нурагинского районов несмотря на разный состав вмещающих пород. В зависимости от вертикальной и латеральной зональности, глубины формирования и уровня эрозионного среза конкретного месторождения, в рудах совмещаются и доминируют разные минерально-геохимические типы, что определяет, в свою очередь, выделение трех основных типов золоторудных орогенных месторождений (табл. 6):

Au—Bi—Te—W — Мурунтау, Мютенбай, Триада, Зармитан, Урталик. Золото высокопробное, в основном связано с теллуридами, сульфотеллуридами, реже селено-теллуридами висмута. Такой тип выделен за рубежом, как связанный с интрузивами (Baker et al., 2005);

Au—As—Sb—Ag — Амантайтау, Даугызтау, Кокпатас, Марджанбулак. Формируется в поперечных орогенному поясу структурах или совмещается с предыдущим типом. Очень характерны сульфоантимониды Pb, Ag, Fe, Cu и антимонит;

Au—Ag—Sb—Se — Косманачи, Высоковольное, Аджибугут, Окжетпес. Этот тип месторождений формируется в близповерхностных условиях. Чаще всего Au—Ag—Se и Au—Sb типы руд совмещаются, поэтому показательные Ag—Sb сульфосоли, селениды Ag и сульфоантимониды Pb—Sb—Ag. Преобладают электрум и кюстелит.

Используя данные экспериментальных методов изучения устойчивости определенных ансамблей минералов (Бартон, Скиннер, 1982) можно приблизительно определить температуру формирования разных руд: теллуровисмутит < 585 °С, цумоит < 540 °С, пирит + арсенипирит < 490 °С, петцит + калаверит + Au + гессит < 315 °С, Au + стефанит + аргентит + пираргирит < 175—197 °С. Учитывая, что на всех объектах присутствуют пирит-арсенипиритовые руды, причем в больших объемах, очевидно, что интенсивное рудообразование начиналось примерно с 500 °С; Au—W и Au—Bi—Te типы формировались при температуре выше 500 °С.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Микро-наноминералогические исследования первичных золотых руд орогенных месторождений Узбекистана позволяют сделать следующие выводы.

Золото наблюдается в виде самородных частиц разной пробы и входит в состав разнообразных соединений (Au_2Bi , $AuTe_2$, $AuAg_2Te_3$, $AuAgS$, $AuAg_2Se_3$, $AuSb_2$), образующих включения в пирите, арсенипирите, антимоните и кварце. Соединения золота формируют закономерные микро-наноансамбли, которые являются прямыми признаками поиска и оценки определенных минерально-геохимических типов руд.

Для золотых руд характерен стандартный геохимический ряд элементов, не зависящий от состава вмещающих пород (от ранних к поздним ассоциа-

циям): Au—W, редкометалльный; Au—Bi—Te, висмут-теллуридный; Au—As, арсенопирит-пиритовый; Au—Ag—Te, золото-серебро-теллуридный; Au—Ag—Se, сульфосольно-селенидный; Au—Sb, антимонит-сульфоантимонидный; Au—Hg, киноварный. Чем больше типов совмещается, тем богаче руды, но обычно промышленный ресурс определяют 2—3 типа при постоянном присутствии Au—As, кварц-пирит-арсенопиритовых руд. Поздние минерально-геохимические типы характеризуют верхние уровни золотого оруденения, фланги месторождений или рудных полей.

В зависимости от зональности формирования, совмещения доминирующих типов руд и уровня эрозионного среза выделяются следующие типы месторождений: Au—W—Bi—Te — Мурунтау, Мютенбай, Зармитан, Урталик; Au—As—Sb—Ag — Амантайтау, Даугызтау, Кокпатас, Марджанбулак, Зармитанская зона; Au—Ag—Sb—Se — Косманачи, Высоковольтное, Аджибугут, Окжетпес. Месторождения формируются последовательно в условиях от гипо- до мезо- и эпitherмальных.

Список литературы

Бартон П. Б., Скиннер Б. Д. Устойчивость сульфидных минералов / Геохимия гидротермальных рудных месторождений. М.: Мир, **1982**. С. 238—328.

Зеленов В. И. Методика исследования золото и серебросодержащих руд. М.: Недра, **1989**. 302 с.

Конеев Р. И. Наноминералогия золота- эпitherмальных месторождений Чаткало-Кураминского региона. СПб: Дельта, **2006**. 218 с.

Кременецкий А. А., Минцер Э. Ф. Универсальность золоторудных систем — ключевой критерий регионального прогноза промышленного оруденения // Отечественная геология. **1995**. № 1. С. 19—27.

Наноминералогия. Ультра- и нанодисперсное состояние минерального вещества. Под ред. Н. П. Юшкина, А. М. Асхабова, В. И. Ракина. СПб: Наука, **2005**. 581 с.

Некрасов И. Я. Геохимия, минералогия и генезис золоторудных месторождений. М.: Наука, **1991**. 302 с.

Рундквист Д. В. Фактор времени при формировании гидротермальных месторождений: периоды, эпохи, этапы и стадии рудообразования // Геология рудн. месторожд. **1997**. № 1. С. 8—19.

References

Barton P. B. Jr., Skinner B. J. Sulfide mineral stabilities. In: *Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits*. Ed. by H. L. Barnes. New York: Wiley Interscience, **1979**. P. 278—403.

Baker T., Pollar P. J., Mustard R., Mark G., Graham J. A comparison of granite-related tin, tungsten, and gold-bismuth deposits: implications for exploration. *Soc. Econ. Geol. Newsletter*. N 61. **2005**. P. 5—17.

Goldfarb R. J., Taylor R. D., Collins G. S., Goryachev N. A., Orlandini O. F. Phanerozoic continental growth and gold metallogeny of Asia. *Gondwana Research*. **2014**. Vol. 25. P. 48—102.

Dolgopolava A., Selimann R., Konopelka D., Koneev R., Divaev F. Geodynamic evolution of the western Tien Shan, Uzbekistan: Insights from U-Pb SHRIMP geochronology and Sr-Nd-Pb-Hf isotope mapping of granitoids. *Gondwana Research*. **2016**. Vol. 47. P. 76—109.

Koneev R. I. Nanomineralogy of gold in epithermal ore deposits of the Chatkalo-Kuramin region. Saint Petersburg: Delta, **2006**. 218 p. (in Russian).

Koneev R. I., Khalmatov R. A., Mun Y. S. Nanomineralogy and nanochemistry of ores from gold deposits of Uzbekistan. *Geol. Ore Deposits*. **2010**. Vol. 52. N 8. P. 755—766.

Kremenezkii A. A., Minzer A. F. Universality of gold systems as a key to the regional prospect of industrial ores. *Native geology*. **1995**. N 1. P. 19—27 (in Russian).

Nano-mineralogy. Ultra and nanodispersed state of mineral substances. Ed. by N. P. Yushkin, A. M. Aschabov, V. I. Rakin. Saint Petersburg: Nauka, **2005**. 581 p. (in Russian).

Nekrasov I. Ya. Geochemistry, mineralogy and genesis of gold deposits. Moscow: Nauka, **1991**. 302 p. (*in Russian*).

Roco M., Williams R., Alivisatos P. Nanotechnology research directions. IWGN Workshop Report. Boston: Kluwer academic publishers, **2001**. 292 p.

Rundqvist D. V. Time factor in the formation of hydrothermal deposit: Periods, epochs, megastages, and stages of ore formation. *Geol. Ore Deposits*. **1997**. N 1. P. 8—19 (*in Russian*).

Zelenov V. I. Methodology for the investigation of gold- and silver-bearing ores. Moscow: Nedra, **1989**. 302 p. (*in Russian*).

Поступила в редакцию
14 марта 2019 г.