

УДК 553.4 + 553.261 (574.2)

НОВЫЕ ДАННЫЕ ПО МИНЕРАЛОГИИ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПЛУТОНОГЕННОЙ ЗОЛОТО-КВАРЦЕВОЙ ФОРМАЦИИ СЕВЕРА ЦЕНТРАЛЬНОГО КАЗАХСТАНА. II

Э.М. Спиридонов

*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, геологический факультет, Москва,
emnstspiridon@gmail.com*

Описаны самородное золото месторождений различных фаций глубинности, ртутистое золото, макинавит, сурьма, реакционные ауристбит, халькостибит и миаргирит, регенерированное золото. Впервые в мире получены наноструктурные характеристики — размеры нанокристаллитов и внутренних напряжений в них природного гипогенного самородного золота для целой рудной провинции. Установлена существенная устойчивость наноструктурных характеристик золота в пределах отдельных крупных месторождений. Установлено, что наноструктурные характеристики золота не зависят от его состава, а являются функцией условий образования; для плутоногенных месторождений — прежде всего фаций их глубинности. Показано, что физико-химические условия формирования самородков и мелких выделений золота идентичны, поскольку идентичны состав, микроструктурные и наноструктурные характеристики самородного золота тех и других. Описаны гипергенные теллуриды и самородное золото. Наноструктурные характеристики свидетельствуют, что гипергенное самородное золото в корях выветривания и в россыпях, вероятно, не преобразованное эндогенное, а новообразованное, переотложенное, гидрогенное. Приведены 36 оригинальных химических анализов золота и ртутистого золота.

В статье 9 рисунков, 6 таблиц, список литературы из 34 названий.

Ключевые слова: золото, ртутистое золото, ауристбит, регенерированное золото, наноструктурные характеристики золота, самородки золота.

В первой части статьи (Спиридонов, 2014) приведены классификация гидротермальных месторождений Au, обзор плутоногенной золото-кварцевой формации; охарактеризованы раннекаледонская Североказахстанская золоторудная провинция и ее месторождения, включая их геологическую позицию, строение и процессы формирования, фации глубинности, минеральную и геохимическую зональность, фации руд по составу рудообразующей среды, минеральные и геохимические признаки золоторудных столбов, природу и состав рудообразующих гидротермальных растворов; минеральные ассоциации золоторудных тел, типы месторождений по составу продуктивной минеральной ассоциации; описаны жильные кварц и карбонаты, слюды, хлориты, шеелит, сульфиды, сульфидарсениды, сульфидантимониды, теллуриды; приведен эмпирический ряд сродства ряда металлов с теллуром. Содержание второй части статьи будет трудно понять без данных таблицы 1 из первой части статьи, поэтому она приведена еще раз.

Самородное золото

Самородное золото — один из самых поздних гипогенных минералов рудных тел, выполняло промежутки между зернами более ранних минералов, обрастало, пересекало и замещало их. Особенно охотно золото заме-

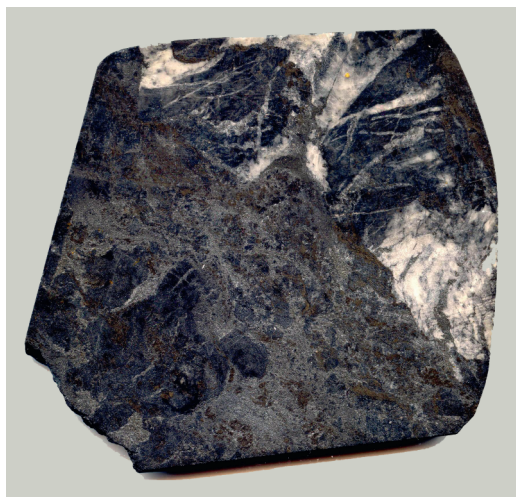
щало карбонаты и пирротин. Размер золотинок в месторождениях всех типов от субмикронного до первых миллиметров. Травлением установлено, что кристаллы золота, как обособленные, так и в агрегатных сростаниях, состоят из правильных простых двойников роста размером до 0.6 мм. Форма двойников роста в зернах золота месторождений Бестюбе и Степняка близка к золоту плутоногенных месторождений Колымы (Петровская, 1973; Савва, Прейс, 1990). Размер двойников роста в мелких выделениях золота и в его самородках в жилах Бестюбе и Степняка идентичен. Таким образом, самородки золота в месторождениях Степнякской группы — это крупные скопления — сростания множества небольших кристаллов (зерен) золота. В ультрагипабиссальных и гипабиссальных, а также мезоабиссальных месторождениях Степнякской группы (табл. 1) самородное золото — продукт реакции поздних Au-Sb растворов с более ранними образованиями рудных жил и оклорудных пород. В абиссальных месторождениях Степнякской группы (табл. 1) самородное золото — продукт реакции поздних Au-Te растворов с более ранними образованиями рудных жил и оклорудных пород. Основным осадителем самородного золота явились углеводороды (метан и др.) и битумоиды, активно мигрировавшие в кварцево-рудные жилы, березиты и листовиты (Спиридонов, 2014).

Таблица 1. Минеральные типы месторождений Степнякской группы по составу продуктивной минеральной ассоциации

Фашии глубин формирования	Оценка глубин формирования	Продуктивные минеральные ассоциации	Месторождения
Гипабиссальная	~1 км	Золото-антимонит-серебросульфосольная	Кварцитовая Горка IV
	~1–2 км	Золото-галенит-серебросульфосольная	Кварцитовая Горка I
	~2–3 км	Золото-галенит-сульфоантимонидная	Бестюбе
Мезоабиссальная	~3–7 км	Золото-галенит-сульфоантимонидная с теллуридами	Будённовское
-	-		Караул-Тюбе
-	-	-	Степняк
Абиссальная	~7–>10 км	Золото-галенит-теллуридная до золото-теллуридной	Восточный Жолымбет
			Жана-Тюбе
			Жолымбет
			Южное Аксу
			Северное Аксу

Кварцитовые Горки. На западном фланге месторождения среди оруденелых листвени-тов, богатых халькопиритом и кубанитом, развита ранняя продуктивная минерализация незначительного масштаба: Zn теннантит, содержащий до 0.7 мас.% Hg, бурнонит, джемсонит, золото с пробностью 897–823, в среднем 863 ($n = 17$). Размер золотинок менее 0.1 мм. Они слабо зональны по составу, края несколько богаче Ag, содержат следы Hg. Поздняя главная продуктивная минерализация ультрагипабиссальных Кварцитовых Горок богата антимонитом, сульфоантимонидами Fe, Pb, Cu, минералы золота в ней представлены α -амальгамой – ртутистым золотом (Назьмова, Спиридонов, 1979; Спиридонов,

Рис. 1. Гнездо богатой руды среди березитов – микрокварцитов. Крупнокристаллический карбонат черного цвета с массой мелких включений графитоида замещают антимонит, сфалерит и бертьерит. Эти образования брекчированы, местами графитоид «выгорел», карбонат стал белым и возникли кристаллы ртутистого золота размером до 1 мм. 105 x 95 мм. Кварцитовая Горка IV, шахта Фланговая, горизонт – 306 м.



1991, 1995) с широкими вариациями состава. Процесс отложения золота шел при активном участии органических веществ (рис. 1). Контуры метасоматических выделений самородного Hg золота обычно прихотливые (рис. 2а). Ртутистое золото макро- и микроскопически не отличается от самородного золота без ртути. Ход рудообразования и эволюция ртутистого золота различались на северном (Кварцитовая Горка IV) и южном (Кварцитовая Горка I) флангах месторождения (Спиридонов и др., 19862).

Кварцитовая Горка IV. Наиболее распространено и слагает наиболее крупные выделения (до 6 мм), прожилки и микропрожилки ртутистое золото I генерации в ассоциации с антимонитом, цинкенимом, джемсонитом, Ag-тетраэдритом, бертьеритом, халькостибитом (рис. 2б, с). Химический состав представительных образцов ртутистого золота I приведен в таблице 2. Ртутистое золото I содержит 8.1 (6–14) мас.% Ag, 4.9 (3–7) мас.% Hg, его пробность от 918 до 803, чаще 890–845, средняя 869 ($n = 324$). Ртутистое золото II обросло и пересекло выделения ртутистого золота I и парагенных с ним минералов, сцементировало их брекчированные агрегаты, ассоциирует с богатым Ag тетраэдритом, андоритом, графическими сростаниями джемсонита и антимонита, халькостибитом. Относительно крупные выделения ртутистого золота II имеют сложно зональное строение. Химический состав представительных образцов Hg золота II приведен в таблице 2. Ртутистое золото II содержит 18.6 (15–24) мас.% Ag и 5.9 (4–11) мас.% Hg, его пробность от 823 до 672, чаще 770–735, средняя 755 ($n = 122$). Редкое ртутистое золото III (ртутистый электрум) в ассоциации с миаргиритом обрастает выделения ртутистого золота II. Ртутистое золото III содержит 25.1 (17–29) мас.% Ag и 11.8 (10–15) мас.% Hg, его пробность от 697 до 629, средняя 636 ($n = 6$). Вариации пробности

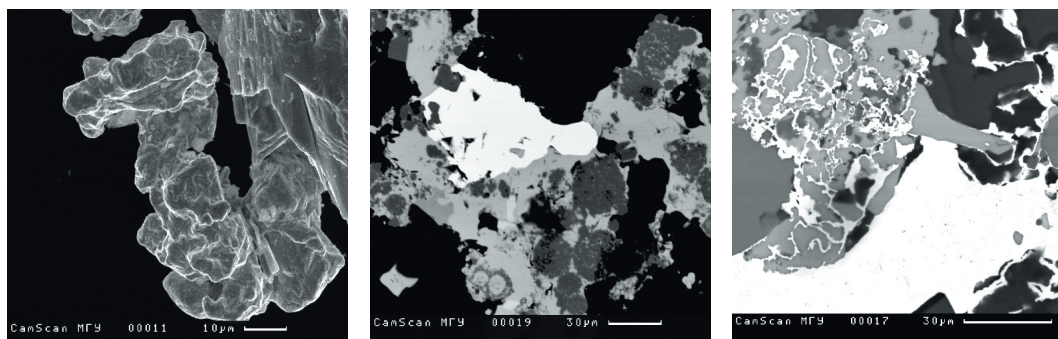
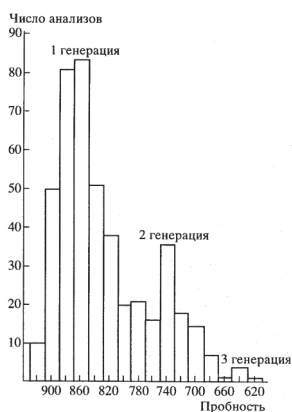


Рис. 2. Самородное золото месторождения Кварцитовая Горка IV, шахта Фланговая, горизонты -306 м (а, с) и -323 м (b):
 а – прихотливая морфология ртутистого золота, выделенного из продуктов растворения руд в плавиковой кислоте, РЭМ фото;
 б – ртутистое золото I в сростании джемсонита (светло-серый), подчиненных цинкениита (более светлый) и халькостибита (более темный) с включениями сферолитов Sb-As пирита и ромбических кристаллов арсениопирита, матрица – кварц и карбонат (черные);
 с – ртутистое золото II цементирует брекчированный агрегат Ag-тетраэдрита (светло-серый), халькостибита (серый слева), арсениопирита (черный); b и с – в отраженных электронах,



д – вариации пробности ртутистого золота трех генераций.

Таблица 2. Химический состав (мас.%) типичных образцов самородного ртутистого золота месторождения Кварцитовые Горки IV

Характеристика золотин	№ ан.	Au	Ag	Cu	Hg	Сумма	Пробность
ртутистое	39	91.45	4.89	нпо	3.27	99.61	918
золото I	40	89.83	4.96	нпо	3.40	98.19	915
в парагенезе	41	91.27	5.39	нпо	4.31	101.17	902
с антимонитом,	42	88.91	8.60	нпо	4.15	101.66	875
цинкенитом,	43	88.55	7.22	следы	4.35	100.13	884
джемсонитом,	44	90.06	6.48	следы	4.62	101.16	890
серебристым	45	83.65	9.75	нпо	4.66	99.06	853
тетраэдритом,	46	84.59	10.58	0.05	4.45	99.97	846
бертьеритом,	47	84.45	10.14	нпо	4.67	99.26	851
халькостибитом	48	86.23	7.67	нпо	6.00	99.91	863
ртутистое золото II	49	76.80	18.01	нпо	5.70	100.51	764
в парагенезе	50	77.91	15.05	нпо	7.69	100.64	772
с андоритом,	51	74.27	16.06	нпо	8.79	99.72	749
роцинитом,	52	75.24	15.30	нпо	9.10	99.64	755
аргенто-тетраэдритом	53	72.99	14.75	нпо	10.89	98.63	740
ртутистое золото III	54	64.03	26.77	0.10	10.85	101.75	629
в парагенезе	55	64.02	25.01	нпо	11.91	100.94	634
с миаргиритом,	56	68.59	17.37	нпо	14.66	100.62	682
пираргиритом	57	65.01	22.51	нпо	14.41	101.93	638

Примечание. Электронный микрозонг Сатеса SX-50, аналитик Э.М. Спиридонов. нпо – ниже предела обнаружения.

Таблица 3. Величина отражения (R, %) ртутистого золота различного состава месторождения Кварцитовые Горки (Кв. Г-73, Кв. Г-77, Кв. Г-74) в сравнении с высокопробным золотом месторождения Северное Аксу (А-109)

Длина волны, нм	А-109	Кв. Г-73	Кв. Г-77	Кв. Г-74
240	18.3	17.1	5.9	
260	23.2	19.4	8.8	
280	27.9	22.1	11.4	
300	28.0	23.5	13.1	
320	30.0	24.3	14.1	
340	28.2	24.0	14.5	
360	29.1	23.2	14.3	
380	30.19	22.7	14.2	
400	30.9	22.4	15.0	
420	34.4	27.6	21.7	17.2
440	35.0	29.8	29.4	22.1
460	36.9	38.3	40.8	30.8
480	42.1	48.1	50.3	39.1
500	54.4	58.2	58.0	47.2
520	67.0	65.7	62.4	53.8
540	74.4	70.5	67.7	58.8
560	79.3	74.3	70.9	62.7
580	82.9	76.9	73.2	66.2
600	85.2	78.8	75.1	68.9
620	87.0	80.5	77.8	71.2
640	88.4	82.1	78.7	73.0
660	89.6	83.7	80.3	74.9
680	90.2	85.2	81.7	76.6
700	90.8	86.6	83.7	78.1
Hg, мас.%	0	4.9	9.3	14.7

Примечание. Прибор MPV-2 фирмы Leitz, эталон WTiC, аттестованный в НФА (Великобритания). Аналитик Д.К. Щербачёв.

каждой из трех генераций ртутистого золота Кварцитовой Горки IV близки к нормальному (Гауссовому) (рис. 2d). Итак, в ходе рудоотложения на месторождении Кварцитовая Горка IV в золоте накапливались Ag и Hg, что фиксировано и в зональном распределении серебра в каждом конкретном выделении золота. Параметры элементарной ячейки ртутистого золота несколько выше, а микротвердость ниже, чем у серебристого золота без ртути (Спиридонов, 1991). С ростом содержаний ртути отражение золота заметно меняется, в видимой области спектра снижается (табл. 3) (Спиридонов и др., 1983). Все эти данные — свидетельство нахождения Hg в твердом растворе с Au (и Ag).

Кварцитовая Горка I. Относительно редкое ртутистое золото I слагает мелкие (менее 20 микрон) выделения в ассоциации с антимонитом, тетраэдритом и сложными сульфидами Pb-Sb, минерал содержит 7.0 (5–9) мас.% Ag и 4.1 (3–6) мас.% Hg, его пробность от 918 до 803, средняя 895 (n = 4). Распространенное ртутистое золото II слагает микроскопические вроски совместно с богатым серебром As-тетраэдритом в пирите, содержит 20.0 (15–24) мас.% Ag и 3.4 (2.5–4) мас.% Hg, его пробность от 823 до 713, средняя 768 (n = 27). Относительно широко развито ртутистое золото III (Hg электрум), слагающее мелкие метасоматические вроски в кристаллах Sb-As пирита в ассоциации с галенитом и крайне богатыми Ag блёклыми рудами — аргентотеннантитом и As-аргентотетраэдритом (Спиридонов, 1995). Ртутистое золото III содержит 29.3 мас.% Ag и 1.7 мас.% Hg, его пробность от 701 до 667, средняя 687 (n = 9).

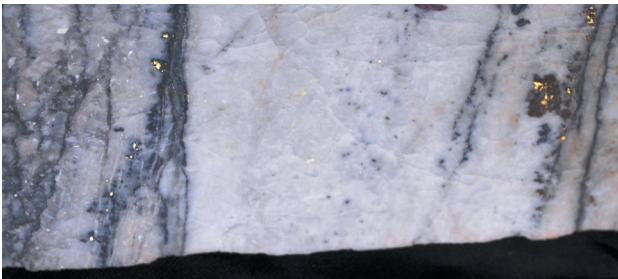
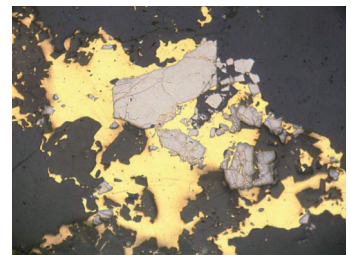
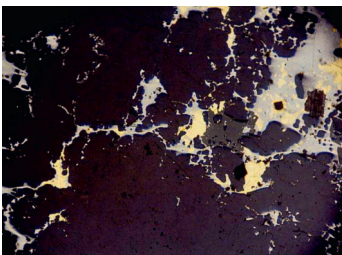


Рис. 3. Самородное золото месторождения Бестюбе, шахта Восточная, горизонт -475 м, рудная жила 129. Различные типы выделений золота: а — вкрапленность в жильном кварце и в сфалерите (справа), 188 x 71 мм; б — тонкие прожилки тетраэдрита, сфалерита (серый) и золота в жильном кварце; с — микронного размера вроски золота в тетраэдрите, ширина поля зрения 0.4 мм; д — обильная вкрапленность золота, заместившего доломит и брекчированный арсеницит; краевая часть самородка, ширина поля зрения 4 мм; б-d — в отраженном свете при 1 никеле.



Итак, в ходе рудоотложения на месторождении Кварцитовая Горка I в составе золота и блёклых руд накапливалось Ag и истощалась Hg, а в ассоциирующих минералах накапливался мышьяк и истощалась сурьма, появился галенит, в отличие от Кварцитовой Горки IV.

Бестюбе — одно из крупных месторождений, из его недр добыто около 400 т золота. Для кварцевых и доломит-кварцевых жил Бестюбе характерны скопления золота в виде прожилков, лент, полос, гнезд разнообразной формы, причем количество золота в рудных жилах и морфология его выделений практически не меняются на Восточном участке от поверхности до глубины более 600 м и на Западном участке от поверхности до глубин 700 м (рис. 3, 4), по данным скважин — до 1200 м (Спиридонов и др., 1986). Несмотря на то, что основная масса золота представлена мелкими и микроскопическими его выделениями, достаточно распространены крупные скопления мелкозернистого золота — самородки (рис. 4). Размер выделений и концентрация самородного золота не коррелируется с типом и количеством сульфидов. Во многих из десятков убого и мало сульфидных рудных кварцевых и доломит-кварцевых жил Бестюбе количество самородного золота превышает количество сульфидов (рис. 4а). Размер уп-

лощенных скоплений мелкокристаллического серебристого золота — ветвящихся жилообразных тел, косо секущих пологие убого сульфидные кварцевые жилы Бестюбе, до 600 x 350 x 45 мм. Размер близких к изометричной форме скоплений мелкокристаллического золота в пологих кварцевых жилах до 170 мм. Знаменитая субгоризонтальная доломит-кварцевая жила центрального участка Бестюбе — Незаметная — вся представляла рудный столб: имела размер около 100 x 100 м при мощности около 4 см, из которых до 1.5 см слагали скопления мелкокристаллического золота. В основных крутопадающих жилах западного участка Бестюбе (Шахтёрская-1, 2) размеры прожилкообразных выделений золота достигали длины 45–60 м при толщине 0.5–25 мм и более. Золото Бестюбе в основном заместило карбонаты, выполнявшие угловатые промежутки между кристаллами кварца, чем и обусловлены форма основной массы мелких золотин. Весьма часто золото слагает прожилки и каймы замещения и обрастания на брекчированном арсенопирите (рис. 3d, 4h). Мелкие выделения золота часто тяготеют к гнездам сфалерита (рис. 3а), галенита с буланжеритом и семсейитом (рис. 3b, 4b) или тетраэдрита (рис. 3c). В гипабиссальном Бестюбе широко развито золото I

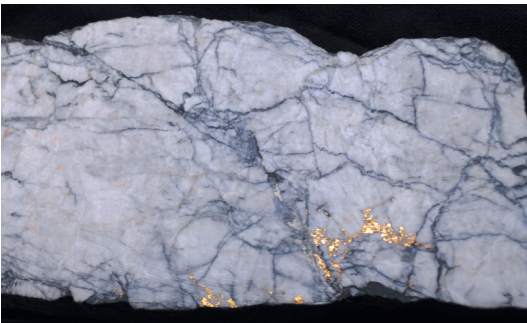


Рис. 4. Самородное золото месторождения Бестюбе, шахта Западная: а — метасоматические вросстки, прожилки и мелкие гнезда золота в брекчированном жильном кварце с массой графитоида, штуф 241 x 112 мм из рудного столба в краевой части жилы Шахтёрская-4; б — обильная вкрапленность золота, галенита и буланжерита в жильном кварце, фрагмент 74 x 53 мм краевой части 3.5 кг самородка, жила Пологая, горизонт -230 м; с — прожилки и гнезда мелкозернистого золота в жильном кварце без сульфидов, фрагмент 39 x 22 мм 1.5 кг самородка, жила Шахтёрская-4, горизонт -250 м; d — верхний образец — прожилки золота в жильном кварце без сульфидов, 31 x 16 мм, нижний образец — скопления золота в доломит-кварцевом агрегате с гнездами арсенопирита, фрагменты крупного самородка, жила Шахтёрская-5, горизонт -430 м.

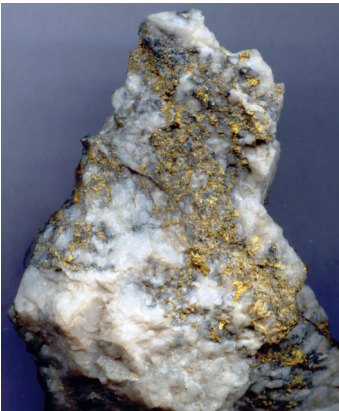




Рис. 5. Самородное золото месторождения Степняк, шахта Фланговая, рудная жила Георгиевская, горизонт -220 м. Ветвящиеся прожилки мелкозернистого золота в брекчированном жильном кварце с анкеритом и массой графитоида.

с широкими вариациями пробности от 950 до 860, преобладает серебристое золото с пробой 895–870. Значительно менее распространено серебристое золото II с пробой 870–820, обычно 860–850. Золото Бестюбе содержит от 0.0л до 1 мас.% Hg.

Степняк. Наиболее крупные кусты и округлой формы гнезда самородного золота с поперечником до 13 см были развиты в мало-сульфидных кварцевых жилах Георгиевской группы среди ороговикованных осадочных пород, где из объема жильной массы менее 0.5 м³ извлекали до 70 кг золота (Спиридонов, 1986). Многие рудные образцы Георгиевских жил (рис. 5) весьма похожи на бестюбинские. В призальбандовых березитах Георгиевской жилы в трещинах наблюдались скопления («зеркала») мелкокристаллического золота до 450 x 400 x 0.5–2 мм. В рудных жилах среди Степнякского интрузива преобладают мелкие и микроскопические выделения золота, часто тяготеющие к гнездам галенита. Знаменитый рудный столб, отработанный древними народами, был развит в главной рудной жиле месторождения – Троицкой, там, где жила пересекла контакт интрузива с роговиками по углеродистым алевропесчаникам ордовика. Поскольку интрузивные породы у контакта представлены кварцевыми габбро-норитами, постольку в рудном столбе была масса талька, «облитого» золотом. В мезоабиссальном Степняке преобладает золото с пробностью 905–935.

В месторождениях абиссальной фации – Аксу, Жолымбет, Жана-Тюбе – в основном

развито высокопробное (920–970) золото. В рудах Жолымбета и Южного Аксу самородное золото ассоциирует с теллуридами Pb, Bi, Ni, Au, Ag. Для этих месторождений установлена коэволюция преобладающего самородного золота и теллуридов Au-Ag: в ходе рудообразования происходило накопление Ag; преобладающее раннее золото с пробой 990–920 ассоциирует с калаверитом и креннеритом, их сменяли золото с пробой 910–890 и сильванит, позже золото с пробой 880–840 и петцит и, наконец, золото с пробой 830–780 и гессит (Спиридонов, 1985, 2014; Спиридонов и др., 1986.). Кристаллы золота глубинных месторождений не зональны по составу.

Жолымбет. Золото – основной минерал-концентратор и носитель Au в рудах крупного месторождения Жолымбет, которое в отдельных участках богато теллуридами, среди них преобладают алтаит, мелонит, калаверит, креннерит и сильванит. Размер золотин от субмикронного до 7–9 мм, чаще менее 1 мм. Мелкие и микроскопические золотины часто тяготеют к скоплениям галенита с вростками алтаита (рис. 6а), а также к скоплениям теллуридов Au-Ag. Более крупные комковидные и неправильной формы выделения золота (рис. 6b) и его прожилки (рис. 6с) размещены в поздних трещинах в жильном кварце.

В крутопадающем штоковерке прожилков и жил центрального участка Жолымбета, вскрытого глубокими шахтами и скважинами, прослежены вариации пробности по вертикали более чем на 1.5 км (Спиридонов, 1995, 2010). Для этого объекта характерна удивительная устойчивость пробности золота по вертикали – мода практически не меняется, во всем 2 км интервале равна 930–940 (рис. 6d). Это надежный признак глубоко проникающих месторождений. Появление на глубоких горизонтах кроме преобладающего высокопробного золота и более низкопробного (в ассоциации с теллуридами Au-Ag) свидетельствует о том, что месторождение будет продолжаться на значительные глубины (при подходящих тектонических условиях).

Жана-Тюбе. В богатых Au рудах Жана-Тюбе самородное золото развито только в тех участках пирротиновых руд, где основная масса теллура связана в дителлуридах – фробергите и мелоните (Спиридонов и др., 1974; Спиридонов, 1995). Золото в ассоциации с фробергитом и креннеритом высокопробное (937–922), редкое золото в ассоциации с петцитом и гесситом – низкопробное (850–847) (табл. 4). В сростаниях фробергита, кренне-

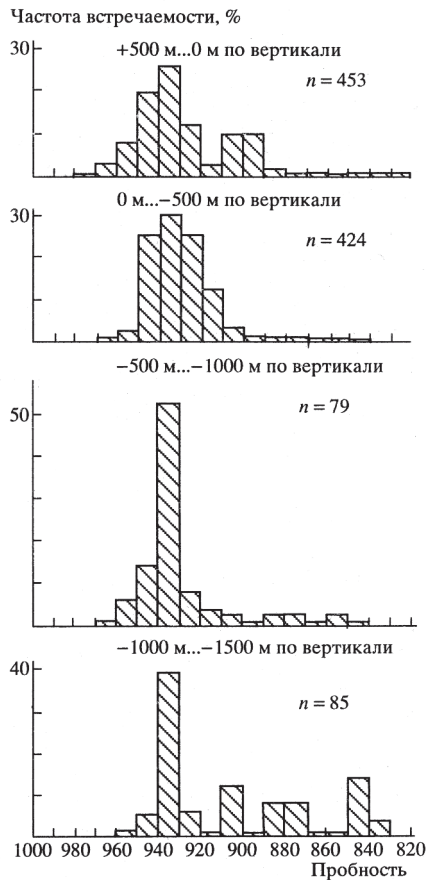
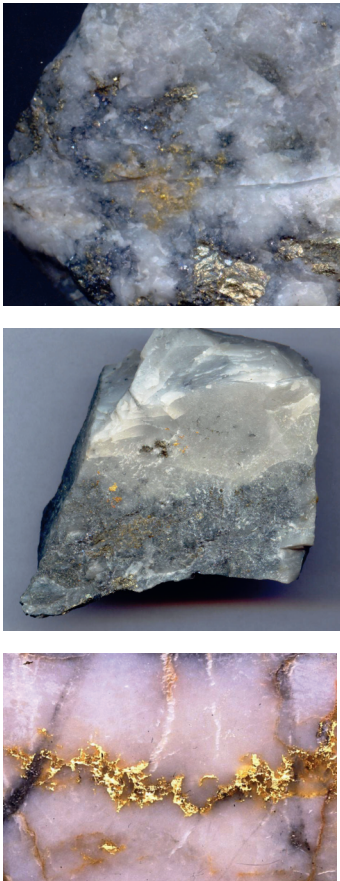


Рис. 6. Самородное золото месторождения Жолымбет: а – мелкозернистое золото в жильном кварце с кристаллами пирита и вкрапленностью галенита и алташта, 55 x 53 мм, Центральный участок; б – комковатые выделения и примазки тонкозернистого золота вдоль трещины, секущей сульфидно-кварцевую жилу, 78 x 42 мм, Центральный участок; в – прожилок золота в жильном кварце, 41 x 28 мм, рудная жила Виктория, шахта Южная, горизонт -220 м; д – вариации пробности самородного золота в вертикальном разрезе Центрального участка (данные автора).

рита и петцита в пирротиновых рудах пробность золота 930–880. Изредка в рудах Жана-Тюбе на твердый раствор петцит – гесситросло серебристое золото с пробностью 860–840. Золото абиссального Жана-Тюбе содержит следы Hg.

Южное Аксу. В этом месторождении развито преимущественно мелкое и микроскопическое золото (табл. 5), причем его размеры заметно снижаются в более глубоко расположенных частях рудных жил (Спиридонов, 1985, 2010). В главных рудных жилах – Январской, Весенней, Перспективной – большая часть золотин представлена метасоматическими вростками в брекчированных кристаллах пирита (от 13 до 61%, обычно более половины всей массы золота), микропрожилками в пирите (от 10–18 до 33%), каймами вокруг пирита (от 1 до 28–33%). Количество метасоматических вростков золота в халькопирите ничтожно (от следов до 1%). Распространены метасоматические вростки в жильном кварце (в основном, продукты замещения кальцита) (от 1–5 до 16%), микросрас-

тания золота с теллуридами висмута (от 1–4 до 13%), с петцитом и алтаитом (от 1 до 12%) (Спиридонов, 1986). Пробность золота жилы Январская варьирует от 990 до 850, более 90% анализов отвечает значениям 970–910, мода 950–930. По данным высокочувствительного спектрального анализа, содержание ртути в самородном золоте Южного Аксу составляет 0.13–0.46, в среднем 0.31 г/т (чувствительность 0.01 г/т Hg, анал. В.А. Бородин, ИМ-ГРЭ). Таким образом, золото абиссального Южного Аксу содержит на 5 порядков (!) меньше Hg, чем золото гипабиссальных Кварцитовых Горок.

Северное Аксу. В рудах Северного Аксу, в отличие от Южного Аксу, метасоматические вростки золота развиты преимущественно в халькопирите, контактирующим с пиритом (Спиридонов и др., 2002). Более крупные выделения золота образуют сростания с теллуrowисмутитом и тетрадимитом и их свинцовистыми разновидностями. Большая часть золота Северного Аксу, по данным микрозондовых и стандартных химических и пробирных

Таблица 4. Химический состав (мас.%) самородного золота в пирротиновых рудах месторождения Жана-Тюбе

Характеристика золотин	№ ан.	Au	Ag	Cu	Hg	Сумма	Пробность
мелкие вростки	58	93.29	6.11	0.13	следы	99.53	937
в пирротине	59	92.92	6.77	0.03	нпо	99.72	932
	60	91.9	6.67	0.08	нпо	98.65	932
	61	91.69	6.66	0.05	следы	98.4	932
	62	92.86	6.98	следы	следы	99.84	930
	63	93.01	6.99	следы	нпо	100	930
в гнезде пирротина	64	92.75	7.02	нпо	нпо	99.77	930
	65	93.02	7.18	нпо	следы	100.2	928
	66	93.5	7.15	следы	следы	100.65	929
	67	93.57	7.42	0.03	нпо	101.02	926
	68	92.56	7.12	нпо	нпо	99.68	929
мелкая в кварце	68	92.56	7.12	нпо	нпо	99.68	929
мелкие золотины	69	91.7	7.07	нпо	нпо	98.77	928
в фробергите	70	92.42	7.25	0.03	следы	99.7	927
среди пирротина	71	93.26	7.78	0	нпо	101.04	923
срастания с петцитом	72	91.34	7.68	0.07	нпо	99.09	922
	73	84.74	14.85	0.05	следы	99.64	850
	74	83.88	15.18	нпо	нпо	99.06	847
	74	83.88	15.18	нпо	нпо	99.06	847

Примечание. Электронный микросонд Сатеса SX-50, аналитик Н.Н. Кононкова.

Таблица 5. Распределение (мас.%) самородного золота различных размеров в золото-кварцевых жилах Январская, Весенняя и Перспективная месторождения Южное Аксу

Горизонт, м	Число измеренных золотин	Площадь подсчета в аншлифах, см ²	Размер золотин, мм				
			более 1	0.1 – 1	0.02 – 0.1	0.005 – 0.02	менее 0.005
– 75	1313	90	11.8%	37.7%	34.5%	12.2%	3.8%
– 165							
– 205	1507	660	7.6%	38.4%	39.4%	12.1%	2.5%
– 250	1367	270	–	34.8%	47.0%	14.1%	4.1%
– 300	237	30	–	31.1%	46.6%	19.0%	3.3%

Примечание. Данные автора.

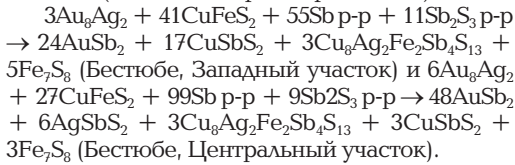
анализов, высоко и крайне высокопробное (980 – 1000). Высокопробное червонное золото находится в срастаниях не только с теллуридами и сульфотеллуридами Bi, но и Au-Ag (калаверит). Высокое сродство Ag к Te общеизвестно. Очевидно, именно повышенной активностью Te во флюидах и обусловлена крайне высокая пробность самородного золота в месторождении абиссальной фации Северное Аксу. Калаверит «вобрал» в свой состав последние крохи серебра из рудоносных флюидов.

Ауростибит и регенерированное золото

Позднеордовикская послезолоторудная сурьмяная минерализация развита лишь в нескольких месторождениях – интенсивно в

Бестюбе и слабо в Степняке и Жолымбете. В Бестюбе сурьмяная минерализация развита висячем боку некоторых золоторудных жил или слагает обособленные жилы мощностью до 30 см. Более ранняя сурьмяная минерализация представлена преобладающим антимонитом и переменными количествами самородной сурьмы и макинавита Fe₃S₈. В отдельных участках количества сурьмы и антимонита соизмеримы и обилен макинавит. В участках наложения сурьмяной минерализации с самородной сурьмой на брекчированные золоторудные жилы (Соединительная и др.) возник реакционный ауростибит AuSb₂ (Назьмова и др., 1975; Спиридонов, 1995). Ауростибит слагает оторочки замещения вокруг самородного золота и полные псевдоморфозы по нему. Ауростибит заместил преимущественно наиболее серебристое само-

родное золото, поскольку реликтовое золото, капсюлированное в аурустибите, более высокопробное (рис. 7b), чем рядовое для Бестюбе (рис. 7a). Аурустибит практически не содержит серебра. За счет сброшенного при замещении самородного золота серебра возникли новообразованные минералы, не характерные для руд Бестюбе — богатый серебром тетраэдрит и миаргирит, а также моноклинный пирротин и халькостибит. Реакции их образования (состав минералов реальный):



При наложении на эти участки более поздних гидротерм с повышенной $f\text{S}_2$, отлагавших сурьмяную минерализацию с бертьеритом и антимонитом, аурустибит был частью разложен с образованием тонко фстончатого крайне высокопробного (~1000) золота, не характерного для гипабиссальных месторождений Au (рис. 7c). При деструкции аурустибита часть золота была переотложена, возникло новое весьма высокопробное (970–960) золото (рис. 7d) в виде мелких правильных кристалликов в агрегатах антимонита. Описанные выше механизмы формирования аурустибита и регенерированного крайне высокопробного золота напоминают процессы в телетермальных Au-Sb месторождениях Якутии (Индолов, Жданов, 1975).

Появление аурустибита в рудах весьма усложняет и нарушает первичную картину пробности золота плутоногенных месторождений. Наличие аурустибита заставляет изменять технологию переработки золотых руд, поскольку этот минерал и капсюлированное в нем золото не цианируются и не амальгируются. Поэтому руды необходимо обжигать.

Пробность и параметры решетки золота

В целом, для всей детально изученной золото-кварцевой формации позднеордовикского возраста в каледонидах севера Центрального Казахстана вариации пробности эндогенного самородного золота составляют 1000–700, лишь у единичных золотин пробность ниже 700, то есть отвечает электруму. Обращает внимание вполне непрерывный спектр состава самородного золота, а также заметное количество золота с крайне высокой пробностью, до 1000 (рис. 8).

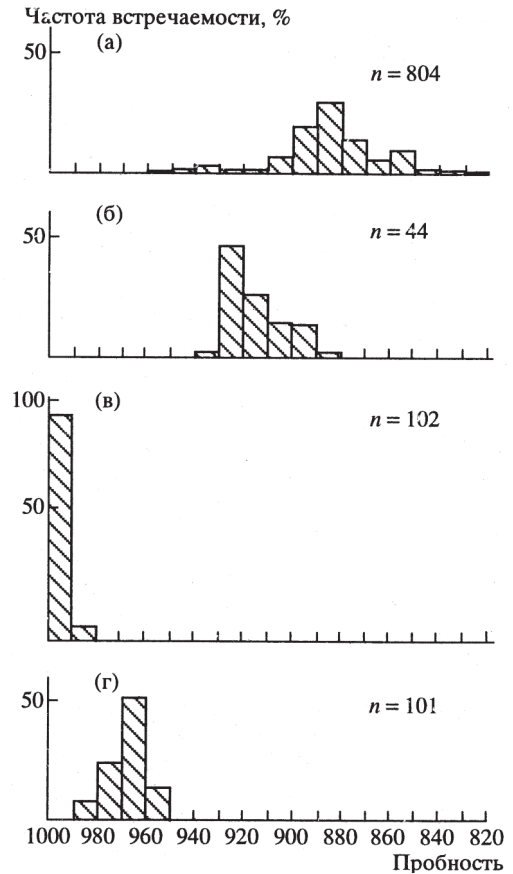
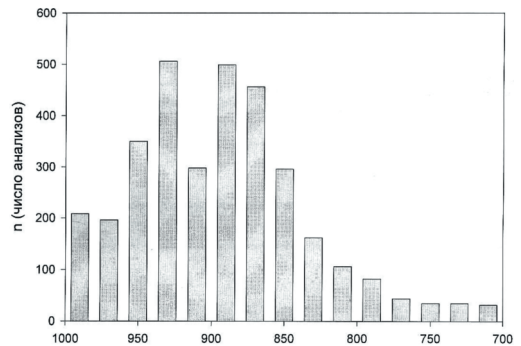


Рис. 7. Вариации пробности самородного золота различных генетических типов месторождения Бестюбе (данные автора):
 a — золоторудная минерализация;
 b — реликтовое в аурустибите,
 c — продукт деструкции аурустибита,
 d — регенерированное (за счет разложенного аурустибита) в антимоните и бертьерите.

Рис. 8. Вариации пробности самородного золота месторождений Степнякской группы (данные автора).



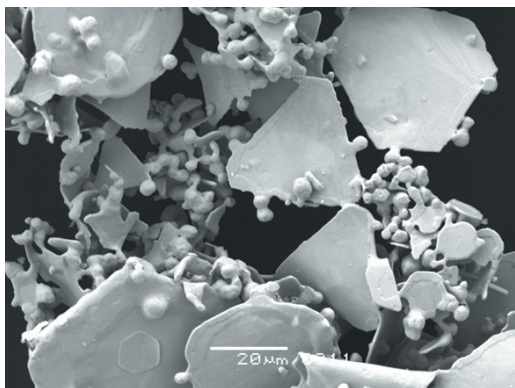


Рис. 9. Горчичное золото — продукт выветривания сильванита месторождения Жана-Тюбе. РЭМ фото.

Параметры элементарной ячейки самородного золота высокопробного и умеренно высокопробного и серебрястого золота месторождений Степнякской группы точно соответствуют кривой на диаграмме состав — параметр элементарной ячейки для синтетических фаз системы Au-Ag в работе (Вол, Каган, 1976).

Гипергенные золото, петцит, гессит

Описанные месторождения в некоторой степени эродированы, около них развиты россыпи. Крупные россыпи в Степнякском рудном поле были отработаны древними народами. Погребенные третичные россыпи у Жолымбета содержат золотины изометричные и неправильной формы размером до 9 мм, их пробность 960 — 995. Небольшая россыпь у Жана-Тюбе содержит пластинчатое золото с пробностью 970 — 990.

В зоне окисления Жана-Тюбе, Жолымбета, Южного Аксу алтаит замещен плюмботеллуридом, теллуриды — монтбрейит, калаверит, креннерит, сильванит, петцит, фробергит — превращены в агрегаты тонкозернистого (пылеватого) крайне высокопробного (~1000) «горчичного» золота, хлораргирита и теллурита и/или теллуридов и теллуридов Fe, Cu, Pb (эммонсит, родалкиларит). Размер микрокристаллов горчичного золота 0.5 — 45 микрон (рис. 9). Нередко процессы окисления теллуридов сложные, многоступенчатые. Сильванит Жана-Тюбе на первой стадии окисления превращается в гипергенный петцит + «горчичное» золото + теллурит: $3\text{AuAg}_3\text{Te}_4 \rightarrow 2\text{Au} + \text{AuAg}_3\text{Te}_2 + 10\text{TeO}_2$. На второй стадии гипергенный петцит превращается в гипергенный гессит + «горчичное» золото + теллурит: $2\text{AuAg}_3\text{Te}_2 \rightarrow 2\text{Au} +$

$3\text{Ag}_2\text{Te} + 3\text{TeO}_2$. На третьей стадии гессит превращается в хлораргирит AgCl и теллурит. В образцах окисленных руд Жана-Тюбе, которые были богаты сильванитом, тонкие трещины выполнены бесцветным воскоподобным хлораргиритом, который на солнечном свете быстро чернеет.

Наноструктурные характеристики самородного золота

Рассматриваемая группа гипабиссальных, мезоабиссальных и абиссальных месторождений золота — первая в мире, для которой получены наноструктурные характеристики самородного золота.

Исследования в области современного материаловедения показали, что многие кристаллы макроскопического размера имеют чрезвычайно тонкое доменное строение, являются срастаниями мельчайших кристаллитов, размеры которых от единиц до первых сотен нанометров, то есть нанокристаллитов (Шоршоров, 2001; Гусев, 2005). В металлах обычно это нанокристаллиты типа 3D, по классификации Зигеля (Siegel, 1993), которые квазиизометричны. В срастаниях нанокристаллиты несколько развернуты друг относительно друга от $20'$ до $1 - 5^\circ$. Таким образом, в кристаллических веществах между макро- и микрокристаллами, с одной стороны, и элементарной ячейкой, с другой стороны, существуют нанокристаллиты. Нанокристаллит — это индивидуальная частица вещества с правильным кристаллическим строением, на ней происходит когерентное рассеяние волнового пакета рентгеновского излучения. Такие частички называют ОКР, то есть области когерентного рассеяния. Кристаллиты, наблюдаемые в электронном микроскопе, могут совпадать с отдельной ОКР или состоять из многих ОКР. Размеры ОКР и величины механических напряжений II рода, которые уравниваются в объеме отдельных ОКР, оценивают при детальном рентгенометрических исследованиях на основе анализа смещений, уширения и формы отдельных рентгеновских отражений методами Пауля Шеррера — Селякова, Уоррена — Авербаха, Вильямсона — Холла (Warren, Averbach, 1952; Williamson, Hall, 1953; Balzar, 1989, 1992; Balzar, Popovic, 1996; Bowen, Tanner, 1998; Cheary *et al.*, 2004; Diffraction..., 2004; Proceeding..., 2004; Scardi *et al.*, 2004). Один из наиболее удачных — метод гармонического анализа избранных одиночных рентгеновских отражений Уоррена — Авербаха (Warren, Averbach analysis) и Фурье-анализ.

Первый опыт применения данных методов к исследованию природных самородных золота и серебра и к археологическим объектам из них провела Д.Я. Янакиева (Yanakieva *et al.*, 2009; Spiridonov, Yanakieva, 2009). Установлено, что наноструктурные характеристики минералов ряда золото – серебро практически не зависят от их состава и обусловлены условиями их образования и преобразования.

В развитие этих разработок проведены детальные исследования макроскопических выделений золота месторождений Северного Казахстана, часть результатов приведена в (Спиридонов, Янакиева, 2011). Изучено золото из руд ведущих месторождений Степнякской группы – от мелких зерен, выделенных растворением образцов в плавиковой кислоте, до крупных из фрагментов самородков. Препараты для рентгенометрического изучения готовились следующим образом: на специально матированных стеклянных пластинах натиралось тончайшим слоем золото так, чтобы площадь, покрытая золотом, была более 7 x 7 мм. Специально проведенные измерения показали, что при операции натирания характеристики самородного золота не изменялись. Рентгенометрические исследования провела Д.Я. Янакиева (рентгеновская лаборатория музея «Земля и люди», София) с помощью дифрактометра TUR M-62 (Германия) с двукружным гониометром в геометрии Bragg-Brentano и графитовым монохроматором; параметры записи дифрактограмм: $\text{CuK}\alpha$ ($\lambda = 0.15418$ нм), 32 kV, 15 мА, скорость $0.01^\circ 2\theta / 15 - 30$ секунд, интервал замеров $0.02^\circ 2\theta$, внутренний эталон Si. Для изучения самородного золота удобно наиболее интенсивное рентгеновское отражение (111). Величина внутренних напряжений II рода $\epsilon = E \cdot \beta / 4 \cdot \text{tg} \theta_{hkl}$, где E – модуль упругости (модуль Юнга), β – физическое уширение пика (на половине его высоты) на дифрактограмме (в радианах в шкале 2θ), исправленное на величину инструментальной погрешности с учетом размерности нанокристаллитов. Обработка дифрактограмм проведена с помощью программы WinFit (версия 1.2.1 – 1997) и функции Pearson VII (Krumm, 1994; Balzar, Popovic, 1996; Bowen, Tanner, 1998; Cheary *et al.*, 2004; Diffraction..., 2004; Proceeding..., 2004; Scardi *et al.*, 2004). Эталонем сравнения при определении размеров нанокристаллитов был гексаборид лантана LaB_6 .

Кварцитовые Горки. Изучены 6 образцов ртутистого золота I Кварцитовой Горки IV, поскольку выделения ртутистого золота II и III этого рудного тела, а также золото иных

рудных тел имеют мелкие размеры. Для ртутистого золота из образца рисунка 1 с пробностью 875 величина нанокристаллитов 19.1 нм, внутреннего напряжения 0.193. Для двух крупных выделений ртутистого золота из образца рисунка 2 получены следующие характеристики: у зерна с пробностью 867 величина нанокристаллитов 18.9 нм, внутреннее напряжение 0.185; у зерна с пробностью 870 величина нанокристаллитов 19.7 нм, внутреннее напряжение 0.182. У остальных образцов ртутистого золота с пробностью 841 – 915 размер нанокристаллитов 18.9 – 20.2 нм, внутренние напряжения 0.181 – 0.194.

Бестюбе. Изучены образцы серебристого золота Западного и Центрального участков Бестюбе с горизонтов -75 м, -115 м, -250 м, -295 м, -340 м, -520 м, -610 м, -700 м (жилы Шахтёрская-1, 4, 5, Южная, Соединительная, №№ 2, 9, 13, 25, 129, 1390, Юбилейная, Фестивальная) – всего 27 зерен размером 0.5 – 4 мм, в их числе фрагменты самородков до 3.5 кг, некоторые зерна многократно (38 детальных рентгенограмм). Установлено, что размеры нанокристаллитов в образцах рассеянного мелкого золота и золота самородков одинаковы и в целом для всего месторождения изменяются мало, составляя 20.4 ± 0.6 нм; устойчивы и величины внутренних напряжений в их нанокристаллитах. Таким образом, физико-химические условия роста рассеянного мелкого золота и золота самородков идентичны. Параметр элементарной ячейки золота Бестюбе с пробностью 880 равен 0.4076 нм. То есть, один нанокристаллит золота Бестюбе состоит из ~ 120000 элементарных ячеек. Золото Центрального и Западного участков немного отличается по наноструктурным характеристикам.

Центральный участок. У мелкозернистого золота жилы 129 (рис. 3а) размер нанокристаллитов 19.9 – 20.0 нм, внутренних напряжений 0.174 – 0.175. У мелкокристаллического золота краевой части самородка из жилы 129 (рис. 3д) размер нанокристаллитов 20.0 – 20.1 нм, внутренние напряжения 0.173 – 0.174. У мелкозернистого золота жилы Фестивальной размер нанокристаллитов 19.8 – 20.2 нм, внутренние напряжения 0.172 – 0.175. Всего изучено 18 образцов серебристого золота жил Центрального участка с пробностью 842 – 901, величина нанокристаллитов у них 19.8 – 20.4 нм, внутренние напряжения 0.171 – 0.175.

Западный участок. У мелкозернистого золота жилы Шахтёрская-1 размер нанокристаллитов 21.0 нм, внутреннее напряжение

0.165. У мелкозернистого золота из рудного столба жилы Шахтёрская-4 (рис. 4а) размер нанокристаллитов 20.8–20.9 нм, внутренние напряжения 0.168–0.169. У мелкозернистого золота краевой части самородка из жилы Пологая (рис. 4б) размер нанокристаллитов 20.4, 20.4, 20.4 нм, внутренние напряжения 0.166, 0.167, 0.169 (три определения). У мелкокристаллического золота самородка из жилы Шахтёрская-4 (рис. 4с) размер нанокристаллитов 20.5, 20.6, 20.5 нм, внутренние напряжения 0.166, 0.166, 0.167 (три определения). У мелкокристаллического золота самородка из жилы Шахтёрская-5 (рис. 4д) размер нанокристаллитов 20.6, 20.6, 20.5 нм, внутренние напряжения 0.166, 0.166, 0.168 (три определения). Всего изучено 20 образцов серебристого золота жил Западного участка с вариациями пробности 842–901, величина нанокристаллитов у них 20.2–21.0 нм, внутренние напряжения 0.165–0.170.

Были поставлены опыты по механическому воздействию на природное золото Центрального участка Бестюбе и по его плавлению. Величина нанокристаллитов ковального золота составляет 20.0 ± 0.2 нм (почти не отличается от исходного). Величина напряжений в нанокристаллитах ковального золота выше — 0.183. Величина нанокристаллитов переплавленного золота 11.2 нм, то есть в два раза меньше, чем у гидротермального; величина напряжений в них 0.220, то есть больше, чем у природного. Очевидно, что условия кристаллизации золота из расплава более «жесткие», поэтому у такого золота значительно меньший размер нанокристаллитов и значительно большая величина внутренних напряжений, по сравнению с золотом гидротермальным.

Степняк. Из руд Степняка исследовано 7 образцов умеренно высокопробного золота: пять образцов из жилы Георгиевская, два — из жилы Троицкая. У мелкозернистого золота с пробностью 910 (рис. 5) величина нанокристаллитов 20.9 нм, внутреннее напряжение 0.136. У золота с пробностью 913–919, расположенного возле округлого самородка, величина нанокристаллитов 21.0 нм, внутреннее напряжение 0.137. В целом, для золота жилы Георгиевская, размещенной в ороговикованных песчаниках экзоконтакта Степнякского интрузива, вариации пробности 910–922, величины нанокристаллитов 20.6–22.9 нм, величины внутренних напряжений 0.139–0.147. Как видно, размеры нанокристаллитов в образцах мелкого золота и золота самородков практически одинаковы. Таким образом, физико-химические условия роста рассеянного мелкого золота и золота самородков идентичны. Для золота с пробностью 911–929 жилы Троицкой, залегающей в пределах Степнякского интрузива, размер нанокристаллитов (22.8–23.7 нм) заметно больше, величины внутреннего напряжения (0.134–0.141) несколько меньше.

Жолымбет. Из руд Жолымбета исследовано 5 образцов высокопробного золота. Для мелких зерен золота с пробностью 938, выделенного из образца рисунка ба, величина нанокристаллитов 25.7 нм, внутреннего напряжения 0.114. Для комочков золота с пробностью 933 образца рисунка бб величина нанокристаллитов 25.4 нм, внутреннего напряжения 0.120. У золота Южного участка месторождения (рис. 6с) пробность (951) и размер нанокристаллитов (26.1 нм) максимальные, величина внутреннего напряжения минимальная — 0.106.

Таблица 6. Наноструктурные характеристики самородного золота плутоногенных месторождений золото-кварцевой формации Степнякской группы (Северный Казахстан)

Фации глубинности месторождений	Месторождения (число изученных образцов)	Пробность золота, ‰	Размер нанокристаллитов, нм	Величина внутренних напряжений
Ультрагипабиссальная Гипабиссальная	Кварцитовые Горки (6)	870	19.6 18.9–20.2	0.186 0.181–0.194
	Бестюбе Центральный участок (18)	880	20.1	0.174
			19.8–20.4	0.171–0.175
	Бестюбе Западный участок (20)	885	20.6	0.167
			20.2–21.0	0.165–0.170
Мезоабиссальная	Степняк (7)	915	22.5 20.6–23.7	0.14 0.134–0.147
Абиссальная	Жолымбет (5)	935	25.6	0.113
			25.4–26.1	0.106–0.120
	Южное Аксу (8)	970	24.9	0.113
			23.2–25.9	0.103–0.132
Северное Аксу (16)	985	26	0.112	
		25.7–26.3	0.103–0.113	

Примечание. Исследователь Д.Я. Янакиева. Коллекция Э.М. Спиридонова.

Южное Аксу. Из руд Южного Аксу исследовано 8 образцов мелкого высокопробного золота жил Январская и Весенняя. Вариации пробности изученных образцов 939 – 981, величина нанокристаллитов 23.2 – 25.9 нм, вариации внутренних напряжений 0.103 – 0.132.

Северное Аксу. Из руд Северного Аксу исследовано 12 образцов высокопробного золота из жилы Пологая, включая небольшие самородки, ряд зерен многократно (16 рентгенограмм). Для золота небольшого самородка с пробностью 985 величина нанокристаллитов 26.1 нм, внутреннего напряжения 0.105. Для золота самородка с пробностью 995 величина нанокристаллитов 26.3 нм, внутреннего напряжения 0.103. Для остальных образцов – вариации пробности 961 – 1000, размер нанокристаллитов 25.7 – 26.2 нм, внутренних напряжений 0.104 – 0.113.

Для плутоногенной золото-кварцевой формации Северного Казахстана установлен тренд увеличения размеров нанокристаллитов в самородном золоте с ростом глубинности формирования месторождений (нм): ультрагипабиссальные Кварцитовые Горки – 19.6, гипабиссальные Бестюбе-центр – 20.1 и Бестюбе-запад – 20.6, мезоабиссальное Степняк – 22.5, абиссальные Жолымбет – 25.6, Южное Аксу – 24.9 и Северное Аксу – 26.0 (табл. 6). Величины напряжений ниже в нанокристаллитах золота более глубинных месторождений: снижаются от 0.194 до 0.103. Это следствия более «мягких» условий кристаллизации золота в более глубинных гидротермальных месторождениях. Смена условий кристаллизации самородного золота от месторождений гипабиссальных через мезоабиссальные к абиссальным постепенная, плавная.

Установлено, что размеры нанокристаллитов в образцах мелкого золота и золота самородков одинаковы. Следовательно, физико-химические условия роста мелкого золота и золота самородков идентичны.

Размер нанокристаллитов в горчичном золоте – продукте окисления (выветривания) сильванита Жана-Тюбе – составляет 35.2 нм, максимальный из всех изученных нами природных образцов, внутреннее напряжение 0.063 – минимальное для изученных природных образцов. Размер нанокристаллитов россыпного золота Жолымбета и Жана-Тюбе составляет 31.8 – 32.3 нм, то есть заметно больше, чем у эндогенного золота этих месторождений. Величины напряжений в нанокристаллитах россыпного золота до 0.069, заметно меньше, чем у эндогенного золота. Наноструктурные характеристики свидетельствуют,

что гипергенное самородное золото – не преобразованное эндогенное, а новообразованное, переотложенное, гидрогенное.

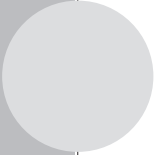
В статье приведены фотографии образцов из коллекции автора. Автор глубоко благодарен Д.Я. Янакиевой, совместно с которой проведено изучение наноструктурных характеристик золота месторождений Степнякской группы, Г.Н. Назьмовой, Ю.С. Шалаеву и Н.Ф. Соколовой за многократное обсуждение проблем формирования золотых месторождений севера Центрального Казахстана, Н.Н. Кортаевой и Н.Н. Кононковой за высокое качество фотографий и анализов, выполненных с помощью электронного микроскопа в лабораториях геологического факультета МГУ.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 16-05-00241).

Литература

- Вол А.Е., Каган И.К. Строение и свойства двойных металлических систем Т. III. Системы золота, индия, иридия, иттербия и иттрия. М.: Наука. **1976.** 814 с. (см. с. 80 – 122, 213 – 219).
- Гусев А.И. Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии. М.: Физматлит. **2005.** 416 с.
- Инголев Л.Н., Жганов Ю.Я. Аурустибит из золото-сурьмяных месторождений Якутии // Зап. ВМО. **1975.** Ч. 104. Вып. 5. С. 586 – 588.
- Назьмова Г.Н., Спиригонов Э.М. Ртутистое золото // Докл. АН СССР. **1979.** Т. 246. № 3. С. 702 – 705.
- Назьмова Г.Н., Спиригонов Э.М., Шалаев Ю.С. Аурустибит месторождения Бестюбе в Северном Казахстане (первая находка в СССР) // Докл. АН СССР. **1975.** Т. 222. № 3. С. 687 – 689.
- Петровская Н.В. Самородное золото. М.: Наука. **1973.** 377 с.
- Савва Н.Е., Преис В.К. Атлас самородного золота Северо-Востока СССР. М.: Наука. **1990.** 293 с.
- Спиригонов Э.М. Минеральные ассоциации золото-теллуридного месторождения Южное Аксу в Северном Казахстане // Зап. Узбек. отд. ВМО. **1985.** Вып. 38. С. 90 – 95.
- Спиригонов Э.М. Месторождение Степняк. Месторождение Южное Аксу // Геология золоторудных месторождений СССР. Т. II. М-ния Средней Азии и Казахстана. М.: ЦНИГРИ. **1986.** С. 57 – 65. С. 66 – 74.
- Спиригонов Э.М. Самородное ртутистое золото Северного Казахстана // Тр. Мине-

- рал. музея им. А.Е. Ферсмана АН СССР. **1991**. Вып. 37. С. 108 – 127.
- Спиригонов Э.М.* Инверсионная плутогенная золото-кварцевая формация каледонид севера Центрального Казахстана // Геол. рудн. месторожд. **1995**. Т. 37. № 3. С. 179 – 207.
- Спиригонов Э.М.* Обзор минералогии золота в ведущих типах Au минерализации // Золото Кольского полуострова и сопредельных регионов. Апатиты: КНЦ РАН. **2010**. С. 143 – 171.
- Спиригонов Э.М.* Новые данные по минералогии месторождений плутогенной золото-кварцевой формации севера Центрального Казахстана. I // Новые данные о минералах. **2014**. Вып. 49. С. 58 – 75.
- Спиригонов Э.М., Демент Т.Н., Минервин О.В., Архангельский Д.Н., Соколова Н.Ф., Борисёнок В.И., Демидов В.Н., Фролов Д.К.* Золоторудное поле Аксу, Северный Казахстан: реальное геологическое строение и реальная минерально-геохимическая зональность Au-Sb, Au-Cu, Au-Te, Au-Bi-Te месторождений (по результатам объемного геолого-геофизического, минералогического и геохимического картирования масштаба 1:25000 до глубин 900 – 1200 м) // Геология, генезис и вопросы освоения м-ний благородных металлов. М.: ИГЕМ РАН. **2002**. С. 240 – 244.
- Спиригонов Э.М., Назьмова Г.Н., Шалаев Ю.С., Шавкин Г.Н.* Месторождение Бестюбе. Месторождение Жолымбет // Геология золоторудных месторождений СССР. Т. II. Месторождения Средней Азии и Казахстана. М.: ЦНИГРИ. **1986**₁. С. 32 – 43. С. 44 – 56.
- Спиригонов Э.М., Соколова Н.Ф., Ганиев А.К.* Минеральные ассоциации золото-теллуридного месторождения Жана-Тюбе (Северный Казахстан) // Геол. рудн. месторожд. **1974**. Т. 16. № 1. С. 54 – 65.
- Спиригонов Э.М., Филипьев М.П., Балашов Е.П., Соколова Н.Ф.* Месторождение Кварцитовые Горки // Геология золоторудных месторождений СССР. Т. II. Месторождения Средней Азии и Казахстана. М.: ЦНИГРИ. **1986**₂. С. 75 – 86.
- Спиригонов Э.М., Чвилёва Т.Н., Щербачёв Д.К.* Об оптических свойствах ртутистого золота // Докл. АН СССР. **1983**. Т. 269. № 5. С. 1186 – 1188.
- Спиригонов Э.М., Янакиева Д.Я.* Размер нанокристаллитов и напряжений в них – новые генетические метки для минералов ряда золото-серебро // Докл. РАН. **2011**. Т. 438. № 6. С. 806 – 808.
- Шоршоров М.Х.* Ультрадисперсное структурное состояние металлических сплавов. М.: Наука. **2001**. 155 с.
- Balzar D.* X-ray diffraction line broadening: modeling and applications to high-Tc superconductors // J. Res. National. Inst. Stand. Technol. **1989**. Vol. 98. P. 321 – 353.
- Balzar D.* Profile fitting of X-ray diffraction lines and Fourier analysis of broadening // J. Appl. Crystall. **1992**. Vol. 25. P. 559 – 570.
- Balzar D., Popovic S.* Reliability of the simplified integral breadth methods in diffraction line broadening analysis // J. Appl. Crystall. **1996**. Vol. 29. P. 16 – 23.
- Bowen D.K., Tanner B.K.* High resolution X-ray diffractometry and topography. London: Taylor and Francis. **1998**. 211 p.
- Cheary R.W., Coelho A.A., Cline J.P.* Fundamental parameters line profile fitting in laboratory diffractometers // J. Res. National Stand. Technol. **2004**. Vol. 109. P. 1 – 25.
- Diffraction analysis of materials microstructure (eds. E.J. Mittemeier, P. Scardi). Springer series in materials science. **2004**. Vol. 68. 454 p.
- Krumm S.* «WINFIT 1.0» – A computer program for X-ray diffraction line profile analysis // XIII Conf. Clay Mineral. Petrol. Acts Univer. Carl. Geol. **1994**. Vol. 38. P. 253 – 256.
- Proceeding of the XIX Conference on Applied Crystallography (Krekow, 1 – 4 september 2003). Singapore: World Scientific. **2004**.
- Scardi P., Leoni M., Delhez R.* Line broadening analysis using integral breadth methods: a critical review // J. Appl. Crystallogr. **2004**. Vol. 37. P. 381 – 390.
- Siegel R.W.* Synthesis and processing of nanostructured materials // Proc. of NATO ASI Mechanical properties of ultrafine-grained materials / Eds. M. Nastasi, D.M. Parkin, H. Gleiter. Dordrecht-Boston-London: Kluwer Head Publ. **1993**. Vol. 233. P. 509 – 515.
- Spiridonov E., Yanakieva D.* Modern mineralogy of gold: overview and new data // ArcheoSciences. **2009**. Vol. 33. P. 67 – 75.
- Warren B.E., Averbach B.L.* The separation cold-work distortion and particle size broadening in X-ray patterns // J. Appl. Phys. **1952**. Vol. 23. P. 497 – 512.
- Williamson G.K., Hall W.H.* X-ray line broadening from filed aluminium and wolfram // Acta Metall. **1953**. Vol. 1. P. 22 – 31.
- Yanakieva D., Tonkova M., Spiridonov E., Vergilov Z., Petkova P.* X-ray diffraction method for determination of crystallite sizes of gold and silver items – new opportunities for archaeology and for protection against forgery // ArcheoSciences. **2009**. Vol. 33. P. 45 – 51.



**Кристаллохимия,
минералы как
прототипы
новых материалов,
физические и
химические свойства
минералов**

