

## ГЛАВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ-ПРИМЕСИ САМОРОДНОГО ЗОЛОТА И СВЯЗЬ ИХ С УСЛОВИЯМИ ЕГО ОБРАЗОВАНИЯ НА ПРИМЕРЕ МЕСТОРОЖДЕНИЙ СКЛАДЧАТЫХ ПОЯСОВ АЗИИ

И.В. Гаськов

*Институт геологии и минералогии им. В.С.Соболева СО РАН,  
630090, Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 3, Россия*

*Новосибирский государственный университет, 630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 2, Россия*

Изучены уровни концентраций элементов-примесей (Ag, Cu, Hg) в золоте золоторудных месторождений, связанных со скарнами и черносланцевыми отложениями (Алтае-Саянская складчатая область (АССО)), Северный Вьетнам), золотосодержащих плутогенных Cu-Мо-порфировых (АССО) и вулканогенных колчеданных (Рудный Алтай, Урал, Северный Вьетнам). Проведенный анализ золоторудной минерализации в указанных типах месторождений показывает, что наряду с разным составом их продуктивных минеральных ассоциаций отмечается и различие в составе золота. Во всех изученных месторождениях серебро является наиболее распространенной примесью золота, однако величины содержания Ag сильно различаются и даже в одном типе месторождений могут изменяться в широких пределах. Содержание Ag в золоте зависит не только от содержания его в гидротермальных растворах, но и контролируется рядом независимых параметров — активностью (фугитивностью) S, температурой, солевым составом и pH растворов. Закономерное понижение пробности самородного золота от ранних его генераций к поздним в месторождениях с сульфидным составом руд связано с понижением температуры и массовым образованием сульфидов, что приводит к уменьшению активности серы в растворах и отложению серебра в самородном золоте, а не в сульфидах. В золоте поздних стадий многих изученных месторождений установлены повышенные содержания Hg, а в ранних, более высокотемпературных, концентрируется медь. Повышенные содержания меди в золоте помимо температуры его образования определяются его содержанием в гидротермальных растворах, о чем свидетельствует связь такого золота с месторождениями базит-гипербазитовых комплексов, а также с медно-скарновыми и медно-порфировыми. В целом механизм формирования золота разного химического состава достаточно сложен и коррелирует в какой-то мере с температурой его образования, а спектр элементов-примесей часто зависит от формационной принадлежности золоторудного объекта, от связи его с тем или иным магматическим комплексом.

*Золото, элементы-примеси, скарновые, колчеданные, медно-молибден-порфировые, черносланцевые месторождения, серебро, медь, ртуть, Сибирь, Вьетнам.*

## MAJOR IMPURITY ELEMENTS IN NATIVE GOLD AND THEIR ASSOCIATION WITH GOLD MINERALIZATION SETTINGS IN DEPOSITS OF ASIAN FOLD BELTS

I.V. Gas'kov

Contents of major impurities (Ag, Cu, and Hg) have been studied in gold from ore deposits of various types: (1) associated with skarns and black shales (Altai–Sayan folded area (ASFA) and North Vietnam), (2) pluton-related porphyry Cu–Mo (ASFA), and (3) volcanic pyritic (Rudny Altai, the Urals, and North Vietnam). Analysis of gold ore mineralization in deposits of these types reveals diverse gold compositions along with diverse compositions of productive mineral associations. Silver is the most abundant impurity in gold from all fields studied, but its contents vary broadly even within a field type. The content of silver in gold depends not only on its abundance in hydrothermal solutions but also on other independent solution parameters: sulfur fugacity, temperature, salt composition, and pH. The regular decrease in native gold fineness from early to late generations in sulfide ore deposits is related to temperature decrease and large-scale sulfide formation. These processes reduce sulfur fugacity in the solutions and favor silver deposition in native gold rather than in sulfides. Gold of later generations is enriched in mercury in many deposits studied, whereas copper gravitates to earlier, high-temperature ones. In addition to deposition temperature, the contents of copper in gold are determined by its content in hydrothermal solutions, as evidenced by the association of copper-rich gold with basic–ultrabasic, skarn, and porphyry copper deposits. The processes causing the deposition of gold of different chemical compositions are complex. They correlate, to an extent, with gold mineralization temperature, whereas the spectrum of impurities often depends on the belonging of a gold deposit to a certain igneous complex.

*Gold, impurity elements, skarn, pyrite, and porphyry copper–molybdenum deposits, black shale deposits, silver, copper, mercury, Siberia, Vietnam*

## ВВЕДЕНИЕ

Основная масса рудного золота сосредоточена в гидротермальных месторождениях, среди которых по типу рудоносных магматических образований выделяют плутоногенные, вулканогенные и вулканоплутонические золоторудные формации [Шер, 1972; Петровская и др., 1976; Фогельман, 1985; Некрасов, 1991; Амузинский и др., 1992а; Спиридонов, 1995, 2010; Виноградова и др., 1995; Shimizu et al., 1998]. Австралийские и американские исследователи выделяют орогенные золотые месторождения, локализующиеся в складчатых поясах и наложенных рифтогенных структурах [Groves et al., 1998]. Кроме того, известны телетермальные золоторудные образования и месторождения золота метаморфогенно-гидротермальной формации, связанные, прежде всего, с черносланцевыми толщами и процессами их регионального метаморфизма (Сухой Лог, Мурунтау) [Летников, Вилор, 1981; Брагин, Касавченко, 1986; Буряк, Хмелевская, 1997]. Существенную роль в ресурсном потенциале золота в мире играют золотосодержащие месторождения меднорудного профиля — медно-молибден-порфировые, медно-скарновые и колчеданные, также широко распространенные в Сибири [Casadevall, Ohmoto, 1977; Ulrich, Heinrich, 2001; Гаськов и др., 2006]. Эти типы оруденения тоже относятся к гидротермальным образованиям и являются, как правило, продуктами длительно развивающихся рудно-магматических систем, связанных с вулканизмом или интрузивным магматизмом.

Золото в золоторудных и золотосодержащих месторождениях находится в основном в трех формах: 1) макро- и микроскопические выделения свободного самородного золота; 2) выделения минеральных соединений золота, в основном теллуриды  $(Au, Ag)Te_2$ — $(Au, Ag)Te_4$  (каловерит, креннерит) и  $AuTe_2$  (петцит), значительно реже селениды, сульфиды, антимониды; 3) невидимая примесь золота в различных сульфидах — пирите, арсенопирите, халькопирите и антимоните. Состав самородного золота и спектр его элементов-примесей сильно варьируют в разных формационных типах месторождений и во многом зависят от условий его формирования. На протяжении уже многих десятилетий изучению состава золота уделяется большое внимание. Вопросы типоморфизма золота и связи его состава с условиями рудоотложения рассматриваются во многих работах, среди которых широко представлены обобщающие статьи и монографии [Петровская, 1973; Моисеенко, 1977; Boyle, 1979; Савва, Прейс, 1990; Некрасов, 1991; Амузинский и др., 1992а; Котов и др., 1995; Моисеенко, Эйриш, 1996; Гамянин, 2001; Knight, Leitch, 2001; Спиридонов, Плетнев, 2002; Горячев, 2003; Юргенсон, 2003, 2008; Викентьев, 2004; Arif, Baker, 2004; Chapman et al., 2009].

В составе самородного золота установлен широкий спектр элементов-примесей, включающий Ag, Cu, As, Sb, Hg, Bi, Te, Ti, Cr, Ni, Co, Mn, W, Sn, Fe, Pt, Pd, Rh, Ir. Такой широкий спектр элементов-примесей многие авторы связывают с различной геохимической средой, в которой происходило мобилизация, транспортировка, отложение золоторудной минерализации, и разными физико-химическими условиями его формирования. Большинство указанных элементов-примесей связано с механическим включением различных минеральных фаз и часто имеют типоморфный характер [Самусиков, 2003, 2010; Савва, Колова, 2004; Николаева и др., 2013]. В настоящее время по содержанию элементов в самородном золоте выделяют разные его типы: серебристое (электрум до 40 % Ag, кюстелит до 70 % Ag), медистое (содержит до 20 % Cu), ртутистое (до 20 % Hg), висмутистое (до 4 % Bi), золото родистое (до 43 % Rh — родит), золото палладистое (до 5,8 % Pd — порпецит), золото иридиное (до 30,4 % Ir), золото платинистое (до 10 % Pt), золото с содержанием 4,4 % Fe и др. В качестве изоморфных примесей в составе золота наиболее широкое распространение имеют серебро, медь и ртуть [Спиридонов, 2010], которые образуют с ним также твердые растворы и интерметаллические соединения. Эти примеси, как правило, имеют более равномерное распределение в отличие от механических включений, характеризующихся локальным развитием и неравномерным распределением в зерне золота. Однако их концентрации достаточно сильно различаются в разных формационных и генетических типах месторождений, а также в продуктах разных стадий процесса рудообразования.

## ГЛАВНЫЕ ИЗОМОРФНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ-ПРИМЕСИ В ЗОЛОТЕ

Кристаллохимические особенности золота определяют лишь потенциальные возможности вхождения изоморфных примесей (Ag, Cu, Hg) в его решетку, реализация которых обусловлена многими физико-химическими параметрами гидротермальных растворов, среди них главными являются температура, давление, концентрация растворов и их pH, Eh. [Петровская, 1973; Моисеенко, 1977; Мурзин и др., 1981; Самусиков, 1981, 2010; Амузинский и др., 1992б; Гаськов и др., 2001; Борисенко и др., 2006; Пальянова, 2008; Мурзин, 2010]. Многие исследователи связывают повышенные концентрации элементов-примесей в золоте с различной формационной принадлежностью золоторудных месторождений [Яблокова и др., 2001; Самусиков, 2003; Николаева и др., 2013]; разными исходными концентрациями элементов в рудообразующих растворах [Мурзин и др., 1981] и различной степенью пересыщения растворов (СПР) разными элементами-примесями [Самусиков, 2010]. Содержания изоморфных элементов в самородном золоте изменяются в очень широких пределах.

Серебро является наиболее распространенной примесью золота [Gammons, Williams-Jones, 1995; Knight, Leitch, 2001; Гаськов и др., 2001; Ковалев и др., 2004, Викентьева, Тюкова, 2007; Пальянова, 2008; Мурзин, 2010; Спиридонов, 2010]. В зависимости от количества Ag в золоте Н.В. Петровская [1973] предложила следующие обозначения состава самородного золота: весьма высокопробное Au (1000—951 ‰), высокопробное (950—900 ‰), средней пробы (899—800 ‰), относительно низкопробное (799—700 ‰), низкопробное или электрум (699—400 ‰), кюстелит (399—100 ‰). Современные данные, основанные на многих тысячах прецизионных анализов, показывают непрерывный ряд по составу Au-Ag [Спиридонов, 2010]. Отмечая некоторые закономерности концентрации Ag в золоте, Н.В. Петровская [1973] указывала, что малые содержания Ag и более высокая проба золота (>900 ‰) характерны для руд, сформировавшихся на больших глубинах, а повышенные содержания Ag в золоте и минимальная его проба (<750 ‰) отмечаются в близповерхностных месторождениях. Вместе с тем она отмечала, что нет прямой зависимости пробы золота от температуры его формирования, также мало влияют на содержание Ag в золоте и повышенные его концентрации на месторождении.

Ртуть — второй после серебра элемент-примесь в самородном золоте. Н.В. Петровской [1973] содержание ртути в самородном золоте оценивалось как  $0.00n-0.n$  ‰. Однако в более поздних многочисленных публикациях показано, что содержания ртути в золоте могут быть гораздо выше, вплоть до образования так называемого ртутистого золота [Моисеенко, 1977; Амузинский и др., 1992б; Гаськов и др., 2001, 2006; Спиридонов, Плетнев, 2002; Борисенко и др., 2006]. Это золото представляет собой твердый раствор кубической гомогенной  $\alpha$ -фазы системы Au—Hg с максимально допустимым количеством ртути 19.8 ат. % при  $T = 419$  °C [Okamoto, Massalski, 1989]. Кроме того, установлены амальгамы золота — самостоятельные фазы золота гексагональной сингонии, где содержания ртути не ограничены. Вместе с тем содержание ртути в золоте не всегда имеет повышенные концентрации и резко различается в разных формационных типах месторождений. Так, в самородном золоте месторождений золото-кварцевых формаций содержание ртути составляет в основном сотые и десятые доли процента, а в золоте месторождений золото-ртутных формаций оно может достигать до 26 % [Самусиков, 2010]. По данным этого автора, полученным при изучении месторождений Яно-Колымского пояса, отмечается взаимосвязь между содержаниями Hg и Ag в золоте. Так, в образцах с содержанием Ag первые проценты содержание Hg в среднем около 50 г/т, при Ag порядка 30 % количество Hg в среднем около 2000 г/т. Эта взаимосвязь Ag и Hg в золоте отмечается многими исследователями и в других регионах [Моисеенко, 1977; Мурзин и др., 1981; Павлова, 1993]. Однако для месторождений с повышенной общей концентрацией ртути в рудообразующих гидротермальных растворах (золото-ртутная формация) взаимосвязь между содержаниями Hg и Ag в золоте нарушается. Примером может служить месторождение Ключос, где в золотинах с одинаковым содержанием Ag содержание Hg колеблется от  $0.n$  до 20 % [Амузинский и др., 1992б]. Более сложное поведение Hg с глубиной установлено на Старо-Берикульском месторождении в Кузнецком Алатау [Широких и др., 2000]. На протяжении первых 200 м по падению рудных тел проба золота увеличивается в среднем от 730 до 774 ‰, а содержание Hg при этом уменьшается от 0.2 до <0.1 ‰. На протяжении следующих 150 м по падению проба уменьшается до 729 ‰, а содержание Hg увеличивается до 0.19 ‰ (волновая зональность).

Медь — третий по распространенности после серебра и ртути элемент-примесь в самородном золоте. В системе Au—Cu наряду с твердыми растворами установлены и интерметаллиды. К ним относятся  $Cu_3Au$  — аурикуприд (тетрагональный и кубический),  $CuAu$  — купроаурид (кубический), тетрааурикуприд (тетрагональный), рожковит (ромбический) [Ramdohr, 1982]. Наиболее детально составы минералов системы Au—Cu исследованы на месторождении Золотая Гора на Южном Урале [Спиридонов, Плетнев, 2002], где установлены все эти минералы. Повышенные содержания меди в золоте отмечаются многими авторами в месторождениях разных золоторудных и золотосодержащих формаций, среди которых в качестве примера можно отметить следующие. Высокие содержания меди (до 10.2 мас. %) установлены в золоте рудной минерализации Хурай-Жалгинского базит-гипербазитового массива (Восточные Саяны) [Жмодик и др., 2008], медно-скарнового месторождения Тардан (до 6 мас. %) [Гаськов и др., 2006], скарнового редкометалльного месторождения Южно-Янгиканское (Узбекистан) (до 21.2 мас. %) [Куличихина, Губанов, 1975] и до 11 мас. % в золоте гидротермального арсенидно-никель-кобальтового месторождения Бени-Буазера (Марокко), расположенном в серпентинизированных перидотитах [Oep, Kieft, 1974]. Многие авторы отмечают, что с увеличением серебрости золота (уменьшением его пробы) содержание Cu уменьшается. Эти данные приводятся в работе И.П. Ланцева с соавторами [1971], проанализировавшими золото из многих месторождений России и зарубежных стран. Также, по данным В.П. Самусикова [1981], на месторождениях Верхояно-Колымского региона содержание меди в золоте уменьшается при уменьшении пробы золота. Так, в образце с пробностью, близкой к 1000 ‰, содержание Cu в среднем около 500 г/т, Sb — первые г/т, а при пробности порядка 500 ‰ содержание Cu первые г/т, а содержание Sb в среднем около 500 г/т. Увеличение пробы золота (с 762 до 860 ‰) с глубиной сопровождается увеличением содержания Cu с 41

до 81 г/т и уменьшением Hg с 225 до 124 г/т, Sb с 67 до 21 г/т на месторождении Игуменовское [Гамянин, 2001]. Медистое золото часто представляет тонкую смесь фаз, состав которых близок к  $Cu_3Au$  и  $CuAu$  или  $CuAu$  и  $CuAu_3$ . Однако в целом для большинства месторождений концентрации меди в самородном золоте не превышают 1 мас. %.

На месторождениях с несколькими продуктивными стадиями, как показывают литературные данные, проба золота от ранних генераций к поздним обычно уменьшается. На некоторых месторождениях установлено, что даже в пределах одной стадии ранние выделения золота являются более высокопробными, чем поздние [Самусиков, 2010]. Одновременно с понижением пробности золота в поздних генерациях наблюдается уменьшение содержаний Cu и увеличение Sb и Hg. По данным А.Ф. Коробейникова [1987], на месторождениях Алтае-Саянской зоны и Забайкалья в золотинах первой генерации содержание Cu в среднем в 2.5 раза больше, а Sb в 3 раза меньше, чем в золотинах второй генерации. Увеличение Hg в поздних генерациях золота характерно для месторождений разных формаций [Петровская, 1980]. В статье И.Н. Широких с соавторами [2000] приводятся данные о пробности и содержании Hg в золоте для четырех генераций золото-кварцевой формации Староберикунского месторождения (среднее значение от ранних к поздним): пробность Au — 957, 754, 722, 673 ‰, содержание Hg соответственно <0.1, 0.12, 0.14, 0.18 %. Сходные особенности установлены нами для золотосодержащих месторождений колчеданного типа, на которых на ранних, достаточно высокотемпературных, стадиях образуется высокопробное золото с небольшими примесями серебра и меди, а на заключительных стадиях, характеризующихся проявлением низкотемпературных минеральных ассоциаций, отлагается в основном низкопробное золото с повышенными содержаниями серебра и ртути [Гаськов и др., 2001, 2006; Ковалев и др., 2004].

В настоящей статье мы попытаемся по результатам собственных исследований химического состава самородного золота золоторудных и золотосодержащих месторождений Cu-скарнового, Cu-Мо-порфирирового, черносланцевого и колчеданного типов, развитых на территории Сибири, Южного Урала и Северного Вьетнама, показать уровни концентраций наиболее распространенных изоморфных элементов-примесей (Ag, Cu, Hg) в золоте, проследить их динамику во времени (по стадиям) и соотнести их величины с температурами формирования.

### ЭЛЕМЕНТЫ-ПРИМЕСИ В ЗОЛОТЕ Au-Cu-СКАРНОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Au-Cu-скарновые месторождения достаточно широко развиты в Сибири на территории Алтае-Саянской складчатой области (АССО) — Горном Алтае (Синюхинское, Мурзинское, Чойское), Кузнецком Алатау (Федоровское), Горной Шории (Майско-Лебедское), Туве (Тарданское, Хопто) (рис. 1), большинство из них имеет промышленное значение (табл. 1). Формирование месторождений связано с развитием гранитного и гранит-диоритового магматизма нижне- и среднепалеозойского возраста (таннуольский, мартайгинский, усть-беловский интрузивные комплексы) [Шокальский и др., 2000]. Процессы



**Рис. 1. Схема размещения золоторудных и золотосодержащих месторождений в некоторых районах Сибири и Урала.**

1 — медно-скарновые: 1 — Мурзинское, 2 — Синюхинское, 3 — Чойское, 4 — Майско-Лебедское, 5 — Федоровское, 6 — Тарданское, 7 — Хопто; 2 — медно-молибден-порфирировые: 1 — Сорское, 2 — Кульбичское, 3 — Аксугское, 4 — Кызык-Чадр, 5 — Рябиновское; 3 — колчеданные: 1 — Новозолотушинское, 2 — Юбилейное; 3 — Зареченское; 4 — Корбалихинское; 5 — Степное; 6 — Таловское; 7 — Рубцовское; 8 — Захаровское (северо-восточная часть Рудного Алтая), 9 — Урское (Салаир), 10 — Кызыл-Таштыгское (Тува), 11 — Гайское; 12 — Таш-Тау; 13 — Александринское; 14 — Узельгинское; 15 — Сафьяновское (Южный Урал).

Таблица 1.

## Содержания золота в рудах разных типов месторождений Сибири

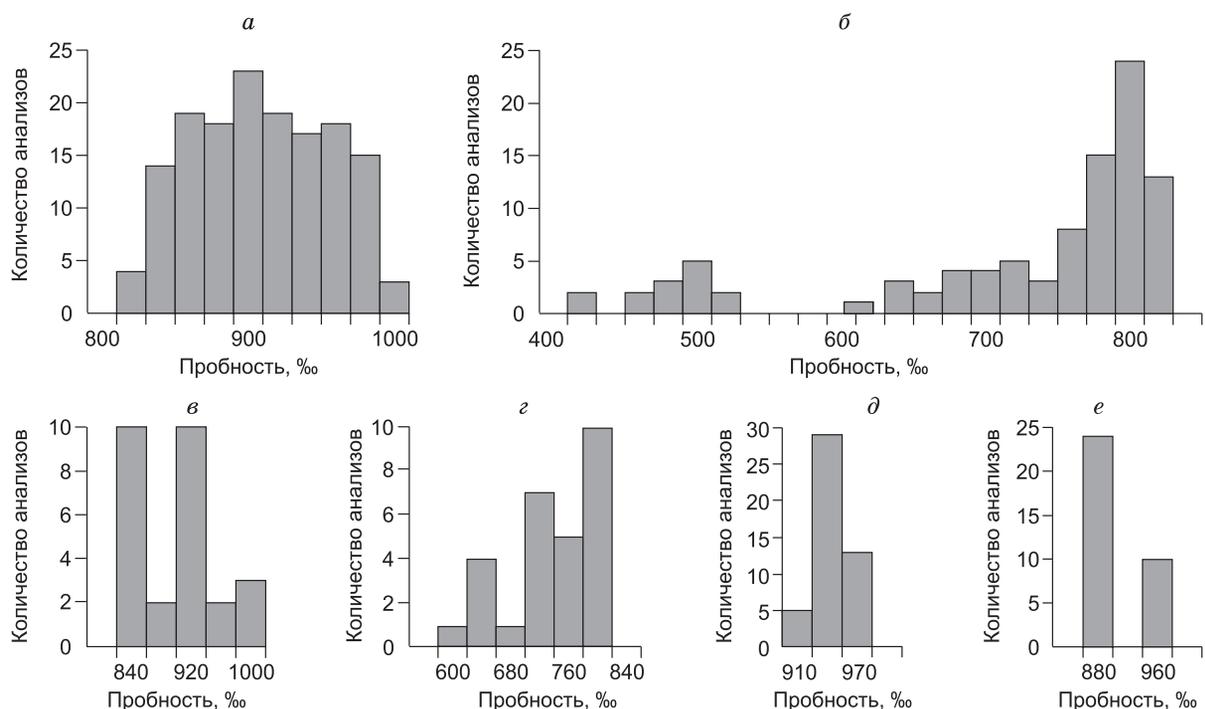
Месторождение, число проб	Au	Ag	Примечание
	г/т		
<b>Скарновые месторождения</b>			
Тарданское, 30 Тарданское, 16	$\frac{0.01-55}{7}$	$\frac{0-80}{5}$	Ранняя стадия
	$\frac{0.01-84}{10}$	$\frac{0.1-15}{2.7}$	Поздняя стадия
Хопто, 8	$\frac{0.01-17}{3}$	$\frac{0-45}{8}$	—
Мурзинское, 43 Мурзинское, 57	$\frac{0.1-166}{7}$	$\frac{4-26}{9}$	Ранняя стадия
	$\frac{0.1-232}{13}$		Поздняя стадия
Синюхинское, 123	$\frac{1-1000}{9}$	$\frac{13-455}{25}$	—
Чойское, 12	$\frac{0.5-288}{23}$	$\frac{11-275}{17}$	—
Майско-Лебедское, 11	$\frac{1-700}{7}$	$\frac{15-350}{23}$	—
Федоровское, 17	$\frac{0.2-317}{8}$	Не опр.	—
<b>Месторождения в черных сланцах</b>			
Та Нанг, 13	$\frac{0.17-9.63}{2.56}$	$\frac{0.6-20.3}{4.3}$	—
<b>Си-Мо-порфиновые месторождения</b>			
Кызык-Чадр, 55	$\frac{1.2-16}{8.2}$	$\frac{1-28}{9}$	—
Рябиновское, 25	$\frac{1-12}{4}$	$\frac{1.5-19}{10}$	—
Кульбичское, 9	$\frac{0.1-2.7}{1.4}$	$\frac{0.5-16.2}{8}$	—
Сорское	(0.12)	Не обн.	—
Аксугское	(0.20)	(1.41)	—
<b>Колчеданные месторождения</b>			
Новозолотушинское, 9	$\frac{0.13-1.42}{0.65}$	$\frac{19-240}{70}$	Рудный Алтай
Юбилейное, 15	$\frac{0.1-0.5}{0.3}$	11-463/138	
Зареченское, 40	$\frac{0.3-22.4}{4.5}$	$\frac{3.7-352}{73}$	
Степное	(0.4)	(35.0)	
Таловское	(0.24)	(32.6)	
Захаровское	(0.38)	(47.7)	
Рубцовское	(0.7)	(147.8)	
Корбалихинское	(0.34)	(54.1)	

Месторождение, число проб	Au	Ag	Примечание
	г/т		
Урское рудное поле	(0.95)	(23)	Салаир
Кызыл-Ташгыгское	(1.5)	(24)	Тува
Узельгинское	(0.9)	(20)	Южный Урал
Гайское	(1.2)	(37)	
Сафьяновское	(0.7)	(26)	
Александринское	(3)	(37)	
Таш-Тау	(4)	(40)	
Синкуен, 31	$\frac{0.09-1.9}{1}$	$\frac{0.5-8}{2.4}$	Северный Вьетнам

Примечание. Таблица составлена по материалам [Медно-колчеданные месторождения...1985,1992; Чекалин, 1991; Гаськов и др., 2001, 2006; Викентьев, 2004; Зайков, 2006; Гаськов, 2008]. Здесь и далее: цифры над чертой — вариации содержаний Au, под чертой — среднее содержание Au по месторождению, по данным штуфного опробования; цифры в скобках — содержания Au в рудах месторождений по данным технологических проб.

скарнообразования проявлены на ранних этапах контактового метаморфизма. Формирование рудной минерализации имеет более длительный и сложный характер. В целом на этих месторождениях помимо традиционных минералов — халькопирита, борнита, халькозина, пирита, магнетита — выявлен целый ряд редких сульфидов, теллуридов, селенидов и самородного золота, сформировавшихся в несколько этапов или стадий. Формирование золоторудной минерализации происходило в широком температурном интервале (400—150 °С) с постепенным ее снижением от ранних этапов к поздним [Вахрушев, 1972; Гусев, 2003; Гаськов и др., 2006]. Проследим это на конкретных месторождениях.

**Тарданское золоторудное месторождение** Северо-Восточной Тувы включает два разных типа золоторудной минерализации [Гаськов, 2008]. Они пространственно обособлены и характеризуются своими специфическими минералого-геохимическими особенностями. Золоторудная минерализация первого типа пространственно ассоциирует со скарново-магнетитовыми телами и областями распро-



**Рис. 2. Гистограммы пробности золота на скарновых месторождениях:**

а, б — Тарданское: ранняя (а) и поздняя (б) стадии; в, г — Мурзинское: ранняя (в) и поздняя (г) стадии; д — Синюхинское; е — Чойское.

Таблица 2. Состав золота в Au-Cu-скарновых месторождениях

№ п/п	Месторождение (число проб), стадия	Au	Ag	Cu	Hg	T, °C
		%				
1	Тарданское (154), ранняя	<u>77.53–100.95</u> 89.71	<u>0.65–22.45</u> 9.05	<u>0–5.95</u> 0.6	<u>0–0.47</u> 0.05	250–320
	Тарданское (90), поздняя	<u>41.7–85.63</u> 70.83	<u>12.52–54.78</u> 28.30	<u>0–1.69</u> 0.15	<u>0–5.47</u> 0.49	200–75
2	Мурзинское (46), ранняя	<u>82.85–99.57</u> 90.90	<u>0–16.91</u> 8.49	<u>0–0.17</u> 0.02	<u>0–0.46</u> 0.11	250–350
	Мурзинское (31), поздняя	<u>66.27–82.85</u> 76.31	<u>16.24–32.72</u> 23.11	<u>0–0.33</u> 0.02	<u>0–0.34</u> 0.10	215–130
3	Синюхинское (31)	<u>76.23–98.7</u> 87.33	<u>2.33–23.54</u> 12.40	<u>0–0.56</u> 0.19	<u>0–0.42</u> 0.11	220–350
4	Федоровское (47)	<u>75.45–91.91</u> 81.85	<u>8.12–24.73</u> 18.26	<u>0.05–1.34</u> 0.24	<u>0–0.41</u> 0.20	250–350
5	Хопто (73)	<u>72.57–100.54</u> 85.63	<u>1.21–25.83</u> 14.34	<u>0–0.3</u> 0.03	<u>0–0.29</u> 0.04	200–300
6	Чойское (34)	<u>85.88–96.09</u> 93.03	<u>2.05–12.54</u> 5.36	<u>0–0.06</u> 0.01	<u>0–0.42</u> 0.16	120–150
7	Майско-Лебедское (82)	<u>50.39–99.03</u> 88.55	<u>0.35–45.56</u> 9.29	<u>0–0.14</u> 0.03	<u>0.04–21.34</u> 2.08	150–300

Примечание. Здесь и далее: в графе (T, °C) приведен температурный диапазон формирования продуктивных ассоциаций; данные по температурам формирования месторождений заимствованы из работ [Вахрушев, 1972; Гаськов и др., 2009].

странения в них сульфидной минерализации. Содержания золота имеют прямую корреляцию с количеством сульфидных минералов (пирит, халькопирит, борнит, сфалерит, пирротин, арсенопирит). Золото образует мелкие и тонкие (0.30–0.01 мм) самородные выделения. Это преимущественно высокопробное золото (рис. 2, а) со средними содержаниями серебра (9.05 %) и меди (0.6 %) (табл. 2). Температуры образования золото-сульфидной ассоциации и вмещающих ее метасоматитов (актинолит, тремолит, серпентин, тальк), колеблются в пределах 250–320 °C [Вахрушев, 1972; Гаськов, 2008]. Золоторудная минерализация второго типа имеет более позднее развитие и приурочена к метасоматитам линейных зон дробления, которые формируются в самых разных породах, включая вулканогенно-осадочные, магматические и скарновые. Рудная минерализация наряду с традиционными для медно-скарновых месторождений сульфидами (пирит, халькопирит, борнит, сфалерит, пирротин, арсенопирит) включает разные теллуриды — гессит (Ag<sub>2</sub>Te), теллуовисмутит (Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>), тетрадимит (Bi<sub>2</sub>Te<sub>2</sub>S), а также низкотемпературные сульфиды и сульфидарсениды кобальта и никеля, отвечающие по составу фазам непрерывных минеральных рядов: CoAsS—FeAsS или CoNi<sub>2</sub>S<sub>4</sub>—FeNi<sub>2</sub>S<sub>4</sub>. Золото выделяется преимущественно в самородном виде, образуя мелкие и тонкие (0.01–0.50 мм) вкрапления. Пробность золота изменяется в широком диапазоне (см. рис. 2, б). Наиболее низкопробные выделения золота близки по составу электруму и характеризуются высоким содержанием серебра (до 54.78 %) и повышенной примесью ртути (до 5.47 %). Температуры образования этих сульфидно-теллуридных ассоциаций и золотого оруденения изменяются в диапазоне 200–75 °C [Гаськов, 2008].

Также два типа золоторудной минерализации установлены на Мурзинском золото-скарновом месторождении в Горном Алтае: первый связан с зонами сульфидизации скарново-магнетитовых образований и второй развит в метасоматитах зон дробления. Золото-сульфидная минерализация первого типа представлена в основном прожилково-вкрапленными выделениями халькопирита, пирита, борнита, сфалерита и мелкими (0.50–0.01 мм) выделениями самородного золота. Температуры ее образования, по данным гомогенизации газово-жидких включений в кварце, составляют 250–350 °C [Гаськов и др., 2010]. Это преимущественно высокопробное золото (см. рис. 2, в) с небольшой примесью серебра и незначительными концентрациями Cu и Hg (см. табл. 2). Золоторудная минерализация зон дробления представлена кварц-сульфидными прожилками и жилами в кварц-хлорит-карбонатных метасоматитах, развивающимися как по скарнам, роговикам, так и вне этих зон. Минеральный состав этого типа оруденения более сложный и наряду с традиционными для скарновых месторождений минералами (халькопирит, пирит, борнит, сфалерит, галенит) здесь установлены блеклая руда, арсенопирит (FeAsS), киноварь (HgS), висмутин (Bi<sub>2</sub>S<sub>3</sub>), айкинит (CuPbBiS<sub>3</sub>), эмплектит (CuBiS<sub>2</sub>), берриит (Cu<sub>3</sub>Ag<sub>2</sub>Pb<sub>3</sub>Bi<sub>7</sub>S<sub>16</sub>), науманнит (Ag<sub>2</sub>Se), полибазит (Ag<sub>16</sub>Sb<sub>2</sub>S<sub>11</sub>), шеелит (Ca<sub>3</sub>WO<sub>4</sub>), клинобисванит (BiVO<sub>4</sub>), барит (BaSO<sub>4</sub>),

золото. Содержание золота в рудах неравномерное и колеблется от 0.1 до 232 г/т. Оно выделяется в виде тонких и мелких (<0.1 мм) образований в ассоциации с сульфидами. По составу золото изменяется в широком диапазоне (см. рис. 2, з), но по сравнению с первым типом руд здесь преобладает более низкопробное золото. Температуры образования этой золоторудной ассоциации, по данным изучения нами флюидных включений в кварцевых жилах составляют 215—200 °С.

Как видно, формирование золоторудной минерализации на золото-скарновых месторождениях АССО может быть связано с разными этапами процесса минералообразования, масштабы проявления которых различны. На месторождениях Синюхинское, Федоровское и Хопто проявлены в основном ранние высокотемпературные ассоциации с высокопробным золотом (см. рис. 2, д, табл. 2), а на Мурзинском, Тарданском, Майско-Лебедском развит более широкий круг минеральных ассоциаций, включая ассоциации низких температур. Золото ранних стадий, сформировавшееся при достаточно высоких температурах (250—350 °С), характеризуется, как правило, повышенной пробностью (820—990 ‰) по сравнению с золотом (417—856 ‰) поздних низкотемпературных (<200 °С) стадий. В раннем золоте средние содержания Ag не превышают 19 %, Hg — 0.2 %, а в позднем — они достигают 54.78 % и 5.47 % соответственно. По содержанию Cu наблюдается обратная картина, проявленная особенно отчетливо на Тарданском месторождении. Здесь в раннем золоте средние содержания Cu составляют 0.6 % (до 5.95 %), а в позднем — 0.15 %. На Чойском месторождении несмотря на низкие температуры формирования рудной ассоциации (120—150 °С), самородное золото имеет высокопробный состав (см. рис. 2, е) с небольшим содержанием Ag (5.3 %) и Hg (0.16 %), что, вероятно, связано с образованием в этой ассоциации телуридов и селенидов серебра [Гаськов и др., 2010].

### ЭЛЕМЕНТЫ-ПРИМЕСИ В ЗОЛОТЕ МЕСТОРОЖДЕНИЙ В ЧЕРНОСЛАНЦЕВЫХ ТОЛЩАХ

Среди различных золоторудных объектов месторождения черносланцевого типа достаточно широко развиты в мире и часто обладают колоссальными запасами золота. Такими крупными представителями этого типа являются Сухой Лог, Нежданинское, Наталкинское, Майское в России; Мурунтау, Кокпатас, Даугызтау, Амантайтау в Узбекистане; Бакырчик в Казахстане; Чоре в Таджикистане; Кумтор в Киргизстане; Хоумстейк в США. Нами этот тип месторождений изучен на примере золото-пирит-арсенопиритового месторождения Та Нанг, расположенного в Центральном Вьетнаме. Рудная зона месторождения представлена серией субпослойных зон дробления и гидротермального изменения углеродистых пород протяженностью более 2 км. Золоторудная минерализация развита в сульфидизированных кварцевых, кварц-карбонатных жилах и в березитизированных вмещающих сланцах. Сульфидная минерализация в них представлена двумя минеральными ассоциациями — ранней пирит-арсенопиритовой и поздней халькопирит-сфалерит-галенитовой. Золото образует в основном тонкую вкрапленность (0.01—0.05 мм) в пирите, арсенопирите, халькопирите и кварце. Содержание золота изменяется в широких пределах от 0.17 до 9.63 г/т и в среднем составляет 2.56 г/т (см. табл. 1). Серебро имеет еще больший диапазон вариаций (0.6—20.3 г/т) и среднее его содержание составляет 4.3 г/т. Пробность золота изменяется в широких пределах от 527.3 до 802.0 ‰. Основной примесью золота является Ag до 46.05 % и в отдельных пробах установлена Hg до 0.28 % (табл. 3). Формирование золотоносных кварц-сульфидных жил, по данным изучения флюидных включений в кварце, происходило в широком диапазоне температур (340—130 °С) [Чан Туань Ань и др., 2015].

Для сравнительной характеристики состава золота месторождений черносланцевого типа приведем данные о золотом оруденении наиболее крупных месторождениях черносланцевого типа — Сухом Логе [Буряк, Хмелевская, 1997] и Мурунтау [Брагин, Касавченко, 1986].

Таблица 3. Состав золота в месторождениях черносланцевого и Cu-Mo(Au)-порфирового типов

№ п/п	Месторождение (число проб)	Au	Ag	Cu	Hg	T, °C
		%				
<b>Гидротермальные месторождения в черных сланцах</b>						
1	Та Нанг (18)	<u>52.73–99.67</u> 76.04	<u>0.33–46.05</u> 23.35	0	<u>0–0.28</u> 0.045	130–340
<b>Cu-Mo(Au)-порфировые месторождения</b>						
2	Кызык- Чадр (130)	<u>38.07–97.1</u> 77.41	<u>6.55–52.58</u> 18.05	Не опр.	<u>0–15.54</u> 4.06	150–250
3	Рябиновское (17)	<u>71.4–94.5</u> 82	<u>4–19</u> 6	<u>0.01–0.28</u> 0.05	<u>0.09–0.26</u> 0.2	200–300

Примечание. Температуры формирования месторождений заимствованы из работ [Гаськов и др., 2006; Дворник, 2009; Чан Туань Ань и др., 2015].

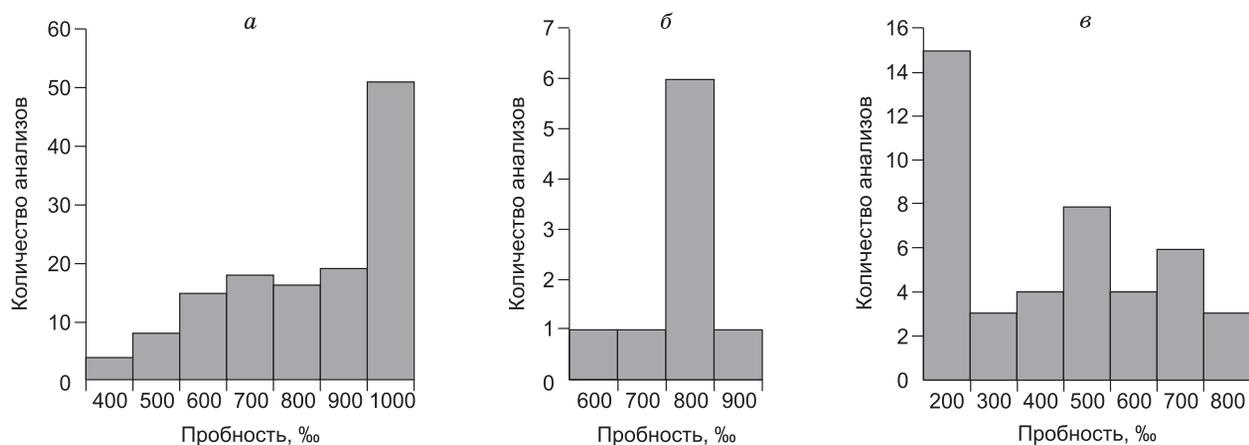
Месторождение Сухой Лог представляет собой серию жильных зон и залежей мощностью до 140 м и протяженностью 2,2 км, приуроченных к горизонту высокоуглистых алевролитов хомолхинской свиты. Среднее содержание Au составляет 2,5—2,7 г/т и около 1 г/т ЭПГ. Общие запасы оцениваются в 1450 т золота и 1541 т серебра. Основная часть золота заключена в пирите. Пробность золота довольно высокая и изменяется в пределах 920—840 ‰. Главной примесью золота является серебро, содержание которого доходит до 15 ‰. Месторождение Мурунтау находится в Центрально-Кызылкумском золоторудном районе Узбекистана и является эталоном крупнообъемных месторождений золото-кварцевого малосульфидного штокверкового оруденения в нижнепалеозойских черносланцевых толщах. Месторождение представлено крупным штокверком биотит-кварц-полевошпатовых метасоматитов диаметром около 2 км. Около 40 % его объема слагают в разной степени золотоносные образования с содержаниями Au от 2,0 до 15,2 г/т, в среднем около 3,72 г/т. На месторождении с 1967 г. добыто 1200 т и 2000 т составляют разведанные запасы [Дудкин, 2014]. Золото образует мелкие и тонкие выделения в кварце или в катаклазированных участках сульфидов. Пробность золота изменяется в пределах 960—880 ‰. Основной примесью золота является серебро (до 10—12 ‰). Также в незначительных количествах (0, *n* %) установлены ртуть, медь.

### ЭЛЕМЕНТЫ-ПРИМЕСИ В ЗОЛОТЕ Cu-Мо-ПОРФИРОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Cu-Мо-порфировые месторождения территории Алтае-Саянской складчатой области связаны с малыми интрузивами гранитного, гранодиоритового и монцонитового составов и на ряду с главными элементами Cu и Mo нередко содержат существенные количества Au и Ag. В целом содержания золота в рудах Cu-Мо-порфировых месторождений обычно низкие — от сотых до десятых долей г/т, редко до 1 г/т (см. табл. 1). Однако благодаря огромным запасам руд на этих месторождениях, ресурсы Au в них значительные. В пределах АССО Cu-Мо-порфировые месторождения представлены месторождениями Аксугским и Кызык-Чадр в Северо-Восточной Туве, Сорским в Кузнецком Алатау и рудопроявлением Кульбичским в Горном Алтае. Все месторождения генетически связаны с порфировыми интрузиями гранитного состава девонского возраста. Оруденение по своей морфологии образует штокверки, сложенные в основном прожилково-вкрапленными рудами медно-молибденового состава. Помимо основных металлов — меди и молибдена на большей части этих месторождений (Аксугское, Кызык-Чадр, Кульбичское) установлены повышенные содержания золота и серебра (см. табл. 1). Запасы Au в среднем на Аксугском месторождении оценены в 39 т, а прогнозные ресурсы — 110 т [Гаськов и др., 2006]. Сорское месторождение, напротив, характеризуется низкими содержаниями золота, где его концентрации даже в сульфидных концентратах не превышают десятых долей г/т.

В общем виде процесс формирования золото-медно-молибденового оруденения включает несколько стадий и происходит в такой последовательности от ранних стадий к поздним: пирит, халькопирит, молибденит, магнетит, гематит, шеелит, вольфрамит, золото → галенит, сфалерит, тетрадимит, борнит, халькозин, энаргит, золото → киноварь, флюорит, барит, минералы висмута, золото [Попов и др., 1977; Сотников и др., 1977; Sillitoe, 2010]. Температуры формирования выделенных стадий рудообразования на различных месторождениях Cu-Мо-порфирового типа по данным различных авторов в целом близки и изменяются от 400 до 150 °С, включая ранние стадии формирования собственно Cu-Мо-порфирового оруденения и поздние эпиптермальные. Образование золота связано со всеми стадиями рудного процесса, и промышленные его концентрации на этих месторождениях часто являются результатом совмещения разностадийных образований золоторудной минерализации. На ранних стадиях формирования собственно медно-молибден-порфировых руд самородные выделения золота встречаются в ограниченном количестве, образуя тонкодисперсные включения в сульфидах (в основном в халькопирите) и реже в гидротермально измененной породе. Видимые (до 0,1 мм) самородные выделения золота отмечаются в низкотемпературных минеральных ассоциациях, формирующихся на заключительных стадиях процесса рудообразования. Здесь наряду с самородными выделениями золото образует теллуриды и входит в состав блеклых руд. Более детально изучение состава золота проведено на примере Кызык-Чадрского месторождения.

Месторождение Кызык-Чадр размещается в бассейне верхнего течения рек Кызык-Чадр и Мезель и приурочено к Кызык-Чадрскому интрузивному массиву (12,5×3,0 км), расположенному в южной части Ожинского плутона гранитоидов таннуольского комплекса. Участок месторождения представляет собой золото-медно-молибден-порфировый рудный штокверк, развитый в массиве гранитов. Штокверк прослежен по простиранию на 2,3 км и глубину до 400 м при мощности от 50 до 400 м. Средние содержания меди и молибдена в среднем составляют соответственно 0,29 и 0,01 ‰. Прогнозные ресурсы Кызык-Чадрского рудного поля суммарно оцениваются: медь — 2350 тыс. т, молибден — 93,6 тыс. т, золото — 45—56 т [Бурдин и др., 2009]. В строении Кызык-Чадрского интрузива установлены породы разного состава от габбро-диоритов до гранитов и гранит-порфиров. С заключительной фазой формиро-



**Рис. 3. Гистограммы пробности золота.**

*a* — Cu-Мо-порфировое месторождение Кызык-Чадр; *б, в* — Зареченское барит-полиметаллическое месторождение: ранняя (*б*) и поздняя (*в*) стадия.

вания интрузии (порфирами) связаны интенсивные изменения в виде зон окварцевания, кварц-серицитового преобразования пород, на которые наложена молибденит-энаргит-халькопиритовая и золото-энаргит-борнитовая минерализация в виде вкрапленности и прожилков как в гранитах, так и в прилегающих к ним сланцах. Более богатая минерализация самородного золота наблюдается в более поздних кварцевых жилах, секущих гранит-порфиры. Мощность этих жил изменяется в широких пределах — от первых сантиметров до 4.5 м, при средней — 0.3—0.8 м. Жилы сложены молочно-белым брекчированным кварцем, обломки которого сцементированы сульфидами меди. Содержание меди в них колеблется от долей до 20 %, среднее — 3.9 % и золота — от следов до 150 г/т, в среднем 8.2 г/т. Кроме того, установлено серебро с содержанием до 28 г/т. Золото характеризуется широким диапазоном пробности (рис. 3, *a*) и большими вариациями содержаний примеси серебра и ртути (см. табл. 3).

Изученная нами золоторудная минерализация на Cu(Au)-порфировом Рябиновском месторождении, расположенном в Центральном-Алданском рудном районе Южной Якутии, имеет свои особенности. Месторождение приурочено к одноименному массиву щелочных пород. Оруденение представлено прожилково-вкрапленной золото-сульфидной минерализацией в зонах метасоматического изменения щелочных пород Рябиновского массива и развито среди маломощных протяженных зон серицитолитов [Кочетков, 2006]. Содержания меди в рудах в среднем составляют 0.44 %, а молибдена до 200 г/т лишь в отдельных пробах. Концентрация золота в рудах изменяется в пределах 1—12 г/т, составляя в среднем около 4 г/т, а содержания серебра колеблются в диапазоне 1,5—19 г/т. По данным Г.П. Дворника [2009], золото выделяется только в самородном виде и его пробность изменяется от 630 до 945 ‰. Основной примесью золота является серебро до 37 % и на уровне десятых и сотых долей процента отмечаются примеси ртути и меди. В борните установлены включения электрума, где Au — 43 % и Ag — 57 %. Формирование продуктивной ассоциации Рябиновского месторождения протекало в диапазоне температур 300—200 °С.

### ЭЛЕМЕНТЫ-ПРИМЕСИ В ЗОЛОТЕ КОЛЧЕДАННЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Колчеданные месторождения обеспечивают около 5 % добычи золота и около 40 % серебра [Викентьев, 2004] и являются важным источником этих металлов. По своим масштабам это часто крупные месторождения с большими запасами цветных металлов от нескольких сот тысяч до десятков миллионов тонн, повышенным содержанием золота и неравномерным его распределением от 0.1 до 5—7 г/т в разных минеральных типах руд и месторождений. В Сибири, в пределах Алтае-Саянской складчатой области, колчеданные месторождения широко развиты на территории Рудного Алтая, Салаира, Тувы, где они образуют ряд самостоятельных рудных районов. Формирование месторождений тесно связано с проявлением разновозрастного вулканизма. С кембрийскими вулканогенными образованиями базальт-андезит-риолитового состава связаны месторождения Кызыл-Таштыгское, Дальнее в Восточной Туве, Салаирское и Урское рудные поля на Салаирском кряже, а с девонскими вулканитами базальт-риолитовой формации — месторождения Корбалихинское, Юбилейное, Захаровское, Зареченское и многие другие в северо-западной части Рудного Алтая. По механизму образования эти месторождения относятся к вулканогенному гидротермальному типу (VHMS-тип) и сформировались в близповерхност-

Таблица 4. Состав золота колчеданно-полиметаллических месторождений

№ п/п	Месторождение (число проб), стадия	Au	Ag	Cu	Hg	T, °C	Регион
		г/т					
1	Новозолотушинское (3)	<u>74.75–89.61</u> 80.67	<u>8.32–25.58</u> 18.89	0	<u>0.02–0.27</u> 0.14	250–350	Рудный Алтай
2	Зареченское (3), ранняя	<u>78.03–62.29</u> 72.18	<u>37.98–22.27</u> 27.84	0	<u>0.0–0.01</u> 0	250–350	
3	Зареченское (9), поздняя	<u>77.23–13.25</u> 34.24	<u>72.48–17.07</u> 49.85	0	<u>26.97–0.06</u> 13.78	200–250	
4	Урское рудное поле (3)	<u>84.23–91.5</u> 86.84	<u>9.43–14.9</u> 12.83	0	<u>0.02–0.21</u> 0.10	250–350	Салаир
5	Кызыл-Таштыгское (8)	<u>49.77–61.62</u> 56.09	<u>38.51–50.41</u> 44.21	0	<u>0.00–0.13</u> 0.04	250–350	Тува
6	Узельгинское (21)	<u>77.19–87.35</u> 83.02	<u>13.23–19.15</u> 15.935	0	<u>0–0.3</u> 0.01	250–350	Южный Урал
7	Гайское (26)	<u>76.72–87.43</u> 80.34	<u>12.06–21.01</u> 17.82	<u>0.04–2.33</u> 0.675	<u>0.02–0.89</u> 0.32	250–350	
8	Сафьяновское (3)	<u>86.91–87.59</u> 87.23	<u>11.88–12.1</u> 12.0	0	<u>0.14–0.74</u> 0.44	250–350	
9	Александринское (12)	<u>66.8–81.56</u> 75.67	<u>19.32–32.81</u> 24.63	<u>0.02–0.14</u> 0.07	<u>0.27–0.46</u> 0.36	200–250	
10	Таш-Тау (4)	<u>76–89</u> 82	<u>8–20</u> 12	0	<u>0.01–0.2</u> 0.07	200–250	
11	Синкуен (20)	<u>85.19–95.27</u> 91.96	<u>5.25–13.87</u> 7.77	<u>0–0.07</u> 0.01	<u>0–0.05</u> 0.01	500–685*	Северный Вьетнам

Примечание. Температуры формирования (метаморфизма\*) месторождений заимствованы из работ [Дистанов, 1977; Медно-колчеданные месторождения..., 1985, 1992; Гаськов и др., 2001, 2012; Кузубный и др., 2001].

ных условиях [Гаськов, 2002]. В общем виде последовательность формирования рудных ассоциаций на колчеданных месторождениях представлена сменой парагенезисов: пирит, халькопирит, (сфалерит, золото) → сфалерит, галенит, (блеклая руда, пирит) → галенит, сфалерит, барит, (аргентит, алтаит, теллуриды Ag и Au, золото). На одних месторождениях (Среднее, Кызыл-Таштыгское) проявлен весь этот набор минеральных ассоциаций, на других — фиксируются лишь ранние пирит-халькопиритовые ассоциации (месторождение Новозолотушинское), на третьих, напротив, в большей степени развиты поздние барит-полиметаллические ассоциации (месторождения Зареченское, Змеиногорское, Салаирское рудное поле). Температуры формирования медно-колчеданных и колчеданно-полиметаллических рудных ассоциаций составляли 350—250 °C, а барит-полиметаллических не превышали 250 °C.

Золото и серебро фиксируется во всех типах руд и месторождений, но содержания его изменяются в широких пределах (см. табл. 1). В процессе рудообразования установлено два максимума их отложения, первый из которых связан с образованием ранних медно-колчеданных руд и месторождений, а второй — с поздними низкотемпературными образованиями барит-полиметаллического состава [Гаськов и др., 2001]. Золото и серебро, связанные с ранними минеральными ассоциациями (медно-колчеданные, колчеданно-полиметаллические руды и месторождения), имеют относительно невысокие содержания (Au = 0.25—1.05 г/т, Ag = 12—62.7 г/т). Золото выделяется в основном в самородном виде, образуя мелкие включения в жильных и рудных минералах, и представлено на Новозолотушинском месторождении одной генерацией, а на Зареченском связано с ранней стадией (табл. 4). Золото характеризуется достаточно высокой пробностью (см. рис. 3, б), в котором основной примесью является серебро до 38 %. Содержание ртути не превышает сотые и десятые доли процента, а медь находится за пределами чувствительности анализа (см. табл. 4). Золото и серебро поздних ассоциаций (барит-полиметаллические руды и месторождения) имеют более высокие концентрации (Au = 4.3—6.3 г/т; Ag = 43—82.8 г/т) и образуют разные минеральные формы, среди которых проявлены самородные выделения, теллуриды (петцит (AuAg<sub>3</sub>Te<sub>2</sub>), силванит (Au(AuAg)Te<sub>4</sub>)), а также оно входит в состав сложных сульфидных образований (сульфосоли и блеклые руды). Состав самородного золота этих ассоциаций, изученный на примере Зареченского месторождения, чрезвычайно неустойчив и изменяется в широких пределах (см. рис. 3, в; табл. 4). Примесь серебра в этом золоте достигает 72 %, а золото-ртутные амальгамы содержат до 27 % Hg.

Рассмотренные нами колчеданные месторождения Урала входят в состав Южно-Уральского металлогенического пояса, протягивающегося в субмеридиональном направлении более 900 км при шири-

не до 100 км [Медно-колчеданные месторождения..., 1985, 1988, 1992; Викентьев, 2004; Гаськов, 2015]. Большая часть месторождений выделена в два минеральных типа — уральский (медно-колчеданный) и баймакский (Au-Ag-барит-колчеданно-полиметаллический), сформировавшиеся в связи с девонским вулканизмом. Оба типа характеризуются повышенной золотоносностью. Более распространенные медно-колчеданные месторождения уральского типа связаны преимущественно с вулканогенными формациями, в которых преобладают базальт-андезитовые составляющие [Гаськов, 2015]. Содержания Au и Ag в рудах этого типа сопоставимы с колчеданно-полиметаллическими месторождениями Рудного Алтая и составляют 0.7—1.2 и 20—37 г/т соответственно. Золото образует преимущественно тонкие выделения в сульфидных минералах размером до первых десятых долей миллиметров. В рассмотренных нами месторождениях (Узельгинское, Гайское, Сафьяновское) пробность Au изменяется в нешироких пределах — 767—875 ‰. Основной примесью золота является серебро, содержание которого достигает 25 % и на уровне десятых долей процента установлена примесь Hg. В золоте Гайского месторождения установлены повышенные содержания меди до 2.3 % (см. табл. 4). Au-Ag-барит-колчеданно-полиметаллические месторождения баймакского типа связаны с вулканогенными формациями сложного состава, где увеличивается роль кислых стратифицированных и субвулканических образований. Для этого типа месторождений, так же как и для барит-полиметаллических месторождений Рудного Алтая, характерно повышенное содержание золота (3—15 г/т) и серебра (15—200 г/т). Пробность золота в рассмотренных нами месторождениях (Таш-Тау, Александринское) изменяется в более широком диапазоне (668—890 ‰). Основной примесью золота является Ag, содержание которого достигает 32.8 %. Содержания меди и ртути не превышают десятых долей процента (см. табл. 4).

Также к колчеданному типу относится Cu-Fe-Au-P3Э месторождение Синкуен (Sin Quyen), расположенное в протерозойских отложениях зоны Фансипан (Phansipan) Северного Вьетнама [Гаськов и др., 2012]. Оруденение слагают линзовидные и пластообразные тела, залегающие согласно с вмещающими породами. На месторождении выделено 17 рудных тел, которые образуют единый рудный горизонт общей мощностью до 140 м и протяженностью около 2 км по простиранию и до 350 м по падению. Руды имеют простой минеральный состав, представленный сульфидами меди и железа (халькопирит, пирит, пирротин) совместно с оксидами железа (магнетит, гематит) и характеризуются повышенной золотоносностью. Руды совместно с вмещающими породами испытали метаморфогенные преобразования при температуре до 630—685 °С и давлении до 5.7—7.5 кбар. Золото и серебро в рудах имеют чрезвычайно неравномерное распределение, изменяющееся от сотых долей до 1.8 г/т. Главным концентратом золота и серебра являются медные сульфидные руды. Золото по своему составу и формам выделения относится к одной генерации и характеризуется высокой пробностью, изменяющейся в пределах 851.9—952.7 ‰. Главной примесью золота является Ag, составляющее в среднем 7.77 %. Медь и ртуть находятся на грани чувствительности микронзондового анализа и их содержания не превышают сотых долей процента (см. табл. 4).

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

**Примесь серебра** характерна для всех рассмотренных нами золоторудных и золотосодержащих месторождений. Однако величины содержаний Ag сильно различаются и даже в одном типе месторождений могут изменяться в широких пределах. Так, в составе самородного золота в одних скарных месторождениях серебро достигает 55—61 % (Гарданское, Мурзинское), а в других не превышает 25 % (Синюхинское, Федоровское, Хопто, Чойское). Как уже отмечалось, многие исследователи связывают содержание Ag в золоте не только с его концентрациями в гидротермальных растворах, но и рядом других независимых параметров — активностью (фугитивностью) S, температурой, солевым составом и pH растворов. Полученные нами данные показывают связь содержаний серебра в золоте с температурами его формирования для всех рассмотренных типов месторождений. В золоте ранних, более высокотемпературных, стадий формирования скарных месторождений содержание Ag меньше, чем в поздних (см. табл. 2). Близкая картина содержаний Ag наблюдается и в колчеданных месторождениях разных регионов. Так, в собственно колчеданных, медно-колчеданных и колчеданно-полиметаллических рудах и месторождениях, сформировавшихся при более высоких температурах (250—350 °С), примесь Ag в составе золота не превышает 25 %. Иная картина выявлена в более низкотемпературных (200—250 °С) золото-барит-полиметаллических месторождениях Рудного Алтая и Южного Урала. Здесь содержание Ag в самородном золоте достигает 72.5 %. Кроме того, отмечается дополнительно существенная примесь ртути (см. табл. 4). Широкие колебания содержаний Ag установлены в золоте месторождений черносланцевого и Cu-Mo-порфирирового типа (см. табл. 3). Содержание Ag в самородном золоте этих месторождений имеет схожую картину с колчеданными. Для ранних стадий Cu-Mo-порфирировых месторождений характерно золото более высокой пробности с небольшим содержанием серебра (Рябиновское месторождение), а в поздних минеральных парагенезисах (месторождение Кызык-Чадр) преоб-

ладает золото очень широкого диапазона пробности (380—930 ‰) с главными примесями Ag (до 53 %) и Hg (до 15,5 %). На черносланцевом месторождении Та Нанг содержания Ag изменяются от 0.33 до 46 % от высокотемпературных к низкотемпературным ассоциациям золотых руд (340—130 °С) [Чан Туан Ань и др., 2015]. Золото же таких гигантов, как месторождения Сухой лог и Мурунтау, образовавшиеся в узком температурном интервале (200—250 °С), содержит в своем составе лишь серебро до 15 %.

В составе руд изученных нами месторождений существенно преобладают сульфидные минералы, поэтому логично предположить, что в рудоносных растворах доминировала сульфидная сера. Поэтому при высоких температурах и высокой активности серы серебро в силу большого сродства к сере, чем к золоту, в большей степени входило в состав сульфидных минералов. По мере понижения температуры растворов и отложения основной массы сульфидов количество серы и ее активность в растворах резко падали и серебро в большей степени концентрировалось в самородном золоте, что вызывало закономерное понижение пробности самородного золота от ранних его генераций к поздним. При низкой концентрации серебра в растворе может происходить развитие высокопробного золота и на завершающих стадиях развития рудной системы при достаточно низких температурах. В случае повышенного содержания Те в растворах серебро даже при низких температурах может быть связано с теллуридом и концентрация его в золоте будет зависеть от количества и активности Те в этих условиях. Температура и активность Те контролируют как распределение Ag между самородной и теллуридной фазами, так и появление тех или иных парагенезисов теллуридов золота, серебра [Мурзин, 2010]. Такую ситуацию, когда проявлено высокопробное золото в ассоциации с низкотемпературным сульфидно-теллуридным парагенезисом, мы наблюдаем на Чойском скарновом месторождении.

**Примесь ртути**, как было показано выше, установлена в золоте многих золоторудных и золото-содержащих месторождений. Содержания ртути в основном составляют сотые и десятые доли процента и лишь в отдельных месторождениях, как правило, в золоте поздних низкотемпературных ассоциаций доходит до первых десятков процентов. В изученных нами разных типах месторождений наиболее высокие содержания Hg установлены в золоте поздних стадий практически всех типов месторождений — скарновых, колчеданных, порфириновых (см. табл. 2—4). В скарновых месторождениях максимальные содержания Hg установлены в золоте Майско-Лебедского (до 21.34 %) и Тарданского месторождений (до 5.47 %). Среди колчеданных месторождений Рудного Алтая и Урала наиболее широкие вариации состава золота (780—130 ‰) и повышенные содержания ртути в нем (до 27 %) установлены в Au-барит-полиметаллических рудах Зареченского месторождения, сформировавшихся при  $T = 200—250$  °С. На Cu-Мо-порфириновых месторождениях золото также имеет широкий диапазон пробности (380—930 ‰), что коррелирует с широкими вариациями температур его образования (150—300 °С). Главной примесью золота здесь наряду с Ag (до 53 %) является Hg (до 20 %) (месторождение Кызык-Чадр). Содержания Hg и Ag в золоте, по данным многих исследователей, имеют взаимосвязь, контролируются температурой и активностью серы и установлены для месторождений разных формаций [Моисеенко, 1977; Петровская, 1980; Мурзин и др., 1981; Павлова, 1993]. Эта особенность поведения указанных элементов-примесей в золоте подтверждается и на наших месторождениях. Практически для всех типов рассмотренных месторождений четко фиксируется увеличение содержания серебра и ртути в более поздних низкотемпературных стадиях рудного процесса. Высокие содержания ртути (> 19.8 %) в золоте связаны с образованием Au-Hg амальгам. Важным фактором образования ртутистого золота является совместное одновременное отложение самородного золота и самородной ртути, которые в таких условиях неизбежно будут реагировать с образованием ртутистого золота либо амальгамидов золота, в зависимости от количества имеющихся золота и ртути. Ртуть, по данным изучения флюидных включений ртутных месторождений, устойчива в растворах при низких температурах [Борисенко и др., 2006], а растворимость золота в интервале низких температур 200—100 °С определяется повышенной щелочностью гидротермальных растворов (до pH = 8.7 и выше) и устойчивостью дигидросульфидного комплекса (Au(HS)<sub>2</sub><sup>-</sup>) [Наумов и др., 2001]. По данным этих авторов, важное значение для совместного отложения ртути и золота имеет изменение физико-химических параметров растворов, например, за счет появления трещины в области гидротермального рудообразования происходит резкий сброс давления и развитие процесса изотермического кипения растворов. Это приводит к резкому повышению газовой фазы в растворе, снижению температуры раствора и осаждению атомарной формы ртути (Hg<sup>0</sup><sub>aq</sub>). Совместно с ртутью осаждаются кварц, сульфидные минералы, золото, которое будет реагировать с самородной ртутью с образованием ртутистого золота.

**Примесь меди** в самородном золоте изученных нами месторождений имеет более ограниченное распространение по сравнению с серебром и ртутью. На уровне десятых долей процента она фиксируется в большинстве медно-скарновых месторождений и лишь на Тарданском и Федоровском ее содержания доходят до 5.95 и до 1.34 мас. % соответственно. Не установлена медь в золоте изученных медно-молибден-порфириновых и черносланцевых месторождений. Из колчеданных месторождений повышенные содержания меди (до 2.33 %) отмечены в золоте Гайского медно-колчеданного, относящегося к ураль-

скому типу, и в меньших количествах на Алесандринском Au-Ag-барит-колчеданно-полиметаллическом месторождении (Южный Урал) и Синкуен Северного Вьетнама (см. табл. 4). Детальные исследования состава золота на Тарданском золото-скарновом месторождении показали более высокие концентрации меди в золоте ранней высокотемпературной ассоциации по сравнению с поздней (см. табл. 2). Также повышенные содержания меди в золоте установлены и на более высокотемпературных медно-колчеданных месторождениях Урала. Уменьшение содержаний меди в золоте от ранней стадии (2.96 мас. %) к поздней (0.62 мас. %) установлено на Au-Cu месторождении Челопеч (Болгария) [Bonev et al., 2002]. Также эта особенность отмечается и другими авторами [Ланцев и др., 1971; Самусиков, 1981]. Как видно, намечается корреляция более высоких концентраций Cu в золоте с повышенными температурами кристаллизации золота. Для образования медистого золота также необходимы и другие важные факторы, такие как наличие этого элемента в гидротермальном растворе, восстановленный режим и низкая фугитивность серы в рудообразующем растворе, которые способствовали бы образованию Cu в самородном состоянии и образовывали с самородным золотом совместные сплавы [Мурзин, 2010].

Повышенное содержание меди в самородном золоте является хорошим индикатором, указывающим на возможную генетическую связь золотого оруденения с базит-гипербазитовыми комплексами либо с месторождениями медного профиля (медно-скарновые, медно-колчеданные, медно-порфиновые).

## ВЫВОДЫ

Изучение изоморфных примесей (Ag, Hg, Cu) в золоте разных типов золоторудных и золотосодержащих месторождений Сибири и некоторых других регионов показывает, что независимо от минерального состава их продуктивных ассоциаций в золоте всех изученных типов месторождений устойчиво фиксируются названные элементы-примеси. Уровень же содержаний разных примесей коррелирует с геохимической средой и температурой формирования месторождений.

Серебро является сквозным элементом и установлено в золоте всех изученных нами золоторудных и золотосодержащих месторождений. Детальные исследования характера изменения содержания Ag в многостадийных месторождениях (скарновых, колчеданных и черносланцевых) показывают резкое увеличение концентраций серебра в поздних низкотемпературных ассоциациях независимо от типа месторождения.

Примесь ртути в золоте изученных месторождений составляет в основном сотые и десятые доли процента и лишь в отдельных месторождениях на поздних низкотемпературных стадиях формирования содержания ртути в золоте доходят до первых десятков процентов. Это установлено в золоте поздних стадий скарновых, колчеданных и порфириновых месторождений. Повышение содержания ртути коррелирует с увеличением концентрации серебра и уменьшением температуры образования.

Примесь меди в золоте изученных месторождений имеет более ограниченное распространение по сравнению с серебром и ртутью. На уровне десятых долей процента она фиксируется в золоте большей части медно-скарновых месторождений, порфириновых и некоторых колчеданных месторождений Урала. Более высокие ее содержания установлены в золоте ранних высокотемпературных ассоциаций на Тарданском (до 5.95 мас. %), Федоровском (до 1.34 мас. %) медно-скарновых месторождениях и на Гайском медно-колчеданном (до 2.33 %). Необходимым фактором формирования повышенных концентраций меди в золоте наряду с высокими температурами его образования является повышенный геохимический фон меди, о чем свидетельствует связь медистого золота, прежде всего, с рудными ассоциациями в различных базит-гипербазитовых комплексах, включая золото-родингитовую формацию, а также с медно-скарновыми, медно-порфириновыми и медно-колчеданными месторождениями [Спиридонов, Плетнев, 2002; Мурзин и др., 2006; Гаськов и др., 2006; Жмодик и др., 2008].

Однако в целом механизм формирования золота разной пробы и с различным набором элементов-примесей достаточно сложен. Формирование золота разного состава в какой-то мере коррелирует с температурой его образования, а спектр элементов-примесей часто зависит от формационной принадлежности золоторудного объекта, от связи его с тем или иным магматическим комплексом [Яблокова и др., 2011; Николаева и др., 2013].

Работа выполнена при поддержке проекта госзадания № 0330-2016-0001.

## ЛИТЕРАТУРА

**Амузинский В.А., Анисимова Г.С., Жданов Ю.Я.** Самородное золото Якутии: Верхнеиндигирский район. Новосибирск, Наука, 1992а, 184 с.

**Амузинский В.А., Москвитин С.Г., Павлова Л.А.** Твердый раствор предельной концентрации ртути в самородном золоте // Редкие самородные металлы и интерметаллиды коренных и россыпных месторождений Якутии. Якутск, Изд-во ЯНЦ СО РАН, 1992б, с. 50—64.

- Борисенко А.С., Наумов Е.А., Оболенский А.А.** Типы золото-ртутных месторождений и условия их образования // Геология и геофизика, 2006, т. 47 (3), с. 342—354.
- Брагин И.К., Касавченко Г.В.** Месторождение Мурунтау // Золоторудные месторождения СССР. Т. 2. М., Недра, 1986, с. 140—158.
- Бурдин Н.В., Лебедев В.И., Лебедев Н.И.** Золото-медь-молибден-порфиновые руды // Успехи современного естествознания, 2009, № 5, с. 15—23.
- Буряк В.А., Хмелевская Н.М.** Сухой Лог — одно из крупнейших золоторудных месторождений мира. Владивосток, Изд-во Дальнаука, 1997, 156 с.
- Вахрушев В.А.** Минералогия, геохимия и образование месторождений скарново-золоторудной формации. Новосибирск, Наука, 1972, 237 с.
- Викентьев И.В.** Условия формирования и метаморфизм колчеданных руд. М., Научный мир, 2004, 338 с.
- Викентьева О.В., Тюкова Е.Э.** Самородное золото мезотермальных золоторудных месторождений // Минералогия Урала-2007, Миасс, Екатеринбург, Имин УрО РАН, 2007, с. 137—140.
- Виноградова Р.А., Образцов Б.В., Азизи С.М.Р.** Первые данные о золото-селеновой минерализации в As-Ni-Co месторождениях района Бу-Аззер, Марокко // ДАН, 1995, т. 343, № 4, с. 511—513.
- Гамянин Г.Н.** Минералого-генетические аспекты золотого оруденения Верхояно-Колымских мезозойд. М., ГЕОС, 2001, 222 с.
- Гаськов И.В.** Колчеданно-полиметаллические месторождения северо-западной части Рудного Алтая: условия образования и закономерности размещения: Автореф. дис.... д. г.-м. н. Новосибирск, ОИГГМ СО РАН, 2002, 46 с.
- Гаськов И.В.** Новые данные о соотношении скарновой и золоторудной минерализации на Тарданском месторождении (Северо-Восточная Тува) // Геология и геофизика, 2008, т. 49 (12), с. 1227—1237.
- Гаськов И.В.** Особенности развития колчеданных рудно-магматических систем в островодужных обстановках Рудного Алтая и Южного Урала // Литосфера, 2015, № 2, с. 17—38.
- Гаськов И.В., Дистанов Э.Г., Ковалев К.Р., Акимцев В.А.** Золото и серебро в полиметаллических месторождениях северо-западной части Рудного Алтая // Геология и геофизика, 2001, т. 42 (6), с. 900—916.
- Гаськов И.В., Акимцев В.А., Ковалев К.Р., Сотников В.И.** Золотосодержащие минеральные ассоциации месторождений медно-рудного профиля Алтае-Саянской складчатой области // Геология и геофизика, 2006, т. 47 (9), с. 996—1004.
- Гаськов И.В., Симонов В.А., Ковязин С.В.** Особенности эволюции рудно-магматических систем на медно-колчеданных и медно-порфиновых месторождениях // Физико-химические факторы петро- и рудогенеза: новые рубежи. М., ИГЕМ РАН, 2009, с. 97—100.
- Гаськов И.В., Борисенко А.С., Бабич В.В., Наумов Е.А.** Стадийность и длительность формирования золоторудной минерализации на медно-скарновых месторождениях (Алтае-Саянская складчатая область) // Геология и геофизика, 2010, т. 51 (10), с. 1399—1412.
- Гаськов И.В., Чан Туан Ань, Чан Чонг Хоа, Фам Тхи Зунг, Неволько П.А., Фам Нгок Кан.** Cu-Fe-Au-P3Э месторождение Синкуен: особенности состава и условия формирования (Северный Вьетнам) // Геология и геофизика, 2012, т. 53 (5), с. 579—596.
- Горячев Н.А.** Происхождение золото-кварцевых жильных поясов Северной Пацифики. Магадан, СВКНИИ ДВО РАН, 2003, 143 с.
- Гусев А.И.** Металлогения золота Горного Алтая и южной части Горной Шории. Томск, Изд-во ТПУ, 2003, 307 с.
- Дворник Г.П.** Серицит-микроклиновые метасоматиты и золотое оруденение Рябиновского рудного поля // Литосфера, 2009, № 2, с. 56—66.
- Дистанов Э.Г.** Колчеданно-полиметаллические месторождения Сибири. Новосибирск, Наука, 1977, 274 с.
- Дудкин Н.В.** Золотодобывающая отрасль Узбекистана // Золото и технологии, 2014, №4 (26), с. 20—23.
- Жмодик С.М., Миронов А.Г., Жмодик А.С.** Золотоцентрирующие системы офиолитовых поясов (на примере Саяно-Байкало-Муйского пояса). Новосибирск, Изд-во «Гео», 2008, 304 с.
- Зайков В.В.** Вулканизм и сульфидные холмы палеоокеанических окраин. М., Наука, 2006, 428 с.
- Ковалев К.Р., Дистанов Э.Г., Аношин Г.Н., Гаськов И.В., Акимцев В.А., Баулина М.В.** Золото и серебро в рудах вулканогенных гидротермальных и гидротермально-осадочных колчеданно-полиметаллических месторождений Сибири // Геология и геофизика, 2004, т. 45 (10), с. 1171—1185.
- Коробейников А.Ф.** Условия локализации золота в палеозойских орогенах. Новосибирск, Наука, 1987, 177 с.

- Котов Н.В., Порицкая Л.Г., Гембицкий В.В.** Самородное золото месторождений Западного Узбекистана. СПб., Невский курьер, 1995, 96 с.
- Кочетков А.Я.** Рудоносность щелочных массивов Алданского щита. Рябиновское медно-золото-порфирировое месторождение // Тихоокеанская геология, 2006, т. 25, № 1, с. 62—73.
- Кузубный В.С., Макаров В.А., Калеев В.А.** Кызыл-Таштыгский колчеданно-полиметаллический рудный узел Восточной Тувы. Красноярск, ООО «Поликом», 2001, 292 с.
- Куличихина Р.Д., Губанов А.М.** К исследованию природного соединения меди и золота из скарново-рудного редкометалльного месторождения // Методические минералогические исследования. М., Наука, 1975, с. 62—64.
- Ланцев И.П., Николаева Л.А., Бадалова Р.П., Денисова Л.Н.** К вопросу о распределении элементов-примесей в самородном золоте из различных месторождений // Тр. ЦНИГРИ, 1971, ч. 1, вып. 96, с. 130—137.
- Летников Ф.А., Вилор Н.В.** Золото в гидротермальном процессе. М., Недра, 1981, 225 с.
- Медно-колчеданные месторождения Урала.** Геологическое строение / Ред. В.И. Смирнов. Свердловск, УНЦ АН СССР, 1985, 288 с.
- Медно-колчеданные месторождения Урала.** Геологическое строение / Ред. В.И. Смирнов. Свердловск, УНЦ АН СССР, 1988, 240 с.
- Медно-колчеданные месторождения Урала.** Условия формирования / Ред. В.Н. Иванов. Свердловск, УНЦ АН СССР, 1992, 307 с.
- Моисеенко В.Г.** Геохимия и минералогия золота рудных районов Дальнего Востока. М., Наука, 1977, 347с.
- Моисеенко В.Г., Эйриш Л.В.** Золоторудные месторождения востока России. Владивосток, Изд-во Дальнаука, 1996, 352 с.
- Мурзин В.В.** Химический состав самородного золота как показатель условий его отложения (на примере Урала) // Металлогения древних и современных океанов — 2010. Рудоносность рифтовых и островодужных структур. Материалы 16-й научной молодежной школы, 19—23 апреля, 2010 г., Миасс, ИМ УрО РАН, с. 155—159.
- Мурзин В.В., Покровский П.В., Молошаг В.П.** Ртуть в самородном золоте Урала и ее типоморфное значение // Геология рудных месторождений, 1981, т. 23, № 4, с. 86—91.
- Мурзин В.В., Сазонов В.Н., Варламов Д.А., Шанина С.Н.** Золотое оруденение в родингитах массивов альпинотипных гипербазитов // Литосфера, 2006, № 1, с. 113—134.
- Наумов Е.А., Гущина Л.В., Борисенко А.С.** Условия образования ртутистого золота на золото-ртутных месторождениях // 14-е Российское совещание по экспериментальной минералогии, пос. Черноголовка, Московская обл., 2—4 октября 2001 г. Тезисы докладов. Черноголовка, Богородский печатник, 2001, с. 190.
- Некрасов И.Я.** Геохимия, минералогия и генезис золоторудных месторождений. М., Наука, 1991, 302 с.
- Николаева Л.А., Некрасова А.Н., Миляев С.А., Яблокова С.В., Гаврилов А.М.** Геохимические особенности самородного золота месторождений различных рудно-формационных типов // Геология рудных месторождений, 2013, т. 55, № 3, с. 203—213.
- Павлова Л.К.** Геолого-геохимические особенности золото-скарновых месторождений Кузнецкого Алатау и Горного Алтая: Автореф. дис.... к. г.-м. н. Новосибирск, ОИГГМ СО РАН, 1993, 48 с.
- Пальянова Г.А.** Физико-химические особенности поведения золота и серебра в процессах гидротермального рудообразования. Новосибирск, Изд-во СО РАН, 2008, 221 с.
- Петровская Н.В.** Самородное золото. М., Наука, 1973, 247 с.
- Петровская Н.В.** Современные исследования типоморфизма самородного золота // Новые данные о типоморфизме минералов. М., Наука, 1980, с. 25—43.
- Петровская Н.В., Сафонов Ю.Г., Шер С.Д.** Формации золоторудных месторождений // Рудные формации эндогенных месторождений. Т. 2. М., Наука, 1976, с. 3—110.
- Попов В.С.** Геология и генезис медно-молибден-порфирировых месторождений. М., Наука, 1977, 203 с.
- Савва Н.Е., Прейс В.К.** Атлас самородного золота северо-востока СССР. М., Наука, 1990, 293 с.
- Савва Н.Е., Колова Е.Е.** Селенистое золото в рудном проявлении Си-Мо металлогенической зоны // Золото Сибири и Дальнего Востока: геология, геохимия, технология, экономика, экология. Тезисы 3-го Всероссийского симпозиума с международным участием, Улан-Удэ, 21—25 сентября 2004 г. Улан-Удэ, Изд-во БНЦ СО РАН, 2004, с. 181—183.

**Самусиков В.П.** Зависимость концентрации меди в самородном золоте от его пробности // Докл. АН СССР, 1981, т. 260, № 5, с. 1238—1241.

**Самусиков В.П.** Закономерности концентрации изоморфно-примесных элементов в минералах при гидротермальном рудообразовании // Геология и геофизика, 2010, т. 51 (3), с. 338—352.

**Самусиков В.П.** Элементы-примеси в самородном золоте — критерии определения формационной принадлежности и уровня эрозионного среза золоторудных месторождений // ДАН, 2003, т. 391, № 1, с. 99—103.

**Сотников В.И., Берзина А.П., Никитина Е.И., Проскураков А.А., Скуридин В.А.** Медно-молибденовые рудные формации. Новосибирск, Наука, 1977, 405 с.

**Спиридонов Э.М.** Инверсионная плутогенная золото-кварцевая формация каледонид севера Центрального Казахстана // Геология рудных месторождений, 1995, т. 37, № 3, с. 179—207.

**Спиридонов Э.М.** Обзор минералогии золота в ведущих типах Au минерализации // Золото Кольского полуострова и сопредельных регионов // Труды Всероссийской (с международным участием) научной конференции, посвященной 80-летию Кольского НЦ РАН. Апатиты, 26—29 сентября 2010 г., Апатиты, 2010, с. 143—171.

**Спиридонов Э.М., Плетнев П.А.** Месторождение медистого золота Золотая Гора (о золото-родингитовой формации). М., Научный мир, 2002, 220 с.

**Фогельман Н.А.** Золоторудные формации и промышленные типы // Тр. ЦНИГРИ, 1985, вып. 197, с. 18—25.

**Чан Туан Ань, Гаськов И.В., Чан Чонг Хоа, Борисенко А.С., Изох А.Э., Фам Тхи Зунг, Ву Хоанг Ли, Нгуен Тхи Май.** Золоторудное месторождение Та Нанг в черносланцевых толщах Центрального Вьетнама // Геология и геофизика, 2015, т. 56 (10), с. 1797—1812.

**Чекалин В.М.** Основные закономерности размещения и принципиальная модель формирования колчеданно-полиметаллических месторождений северо-западной части Рудного Алтая // Геология и геофизика, 1991 (10), с. 75—88.

**Шер С.Д.** Металлогения золота (Северная Америка, Австралия и Океания). М., Недра, 1972, 295 с.

**Широких И.Н., Черезов А.М., Васьков А.С.** Вариации состава самородного золота на Старо-Берикульском месторождении Кузнецкого Алатау // Геология и геофизика, 2000, т. 41 (1), с. 111—119.

**Шокальский С.П., Бабин Г.А., Владимиров А.Г., Борисов С.М.** Корреляция магматических и метаморфических комплексов Алтае-Саянской складчатой области. Новосибирск, Изд-во СО РАН, филиал «Гео» 2000, 187 с.

**Юргенсон Г.А.** Типоморфизм и рудные формации. М., Наука, 2003, 368 с.

**Юргенсон Г.А.** Минеральное сырье Забайкалья (благородные металлы). Чита, Изд-во «Поиск», 2008, 255 с.

**Яблокова С.В., Миляев С.А., Позднякова Н.Н.** Новые данные по типохимизму самородного золота в различных типах месторождений // Руды и металлы, 2001, № 2, с. 28—31

**Arif J., Baker T.** Gold paragenesis and chemistry at Batu Hijau, Indonesia: implications for gold-rich porphyry copper deposits // Miner. Deposita, 2004, v. 39, p. 523—535.

**Bonev I.K., Kerestedjian T., Atanassova R., Andrew C.J.** Morphogenesis and composition of native gold in the Chelopech volcanic-hosted Au-Cu epithermal deposit, Srednogie zone, Bulgaria // Miner. Deposita, 2002, v. 37, p. 614—629.

**Boyle R.M.** The geochemistry of gold and its deposits (together with a chapter on geochemical prospecting for the element). Bull. Geol. Surv. Canada, 1979, № 280, 584 p.

**Casadevall T., Ohmoto H.** Sunnyside mine, Eureka mining district, San Juan County, Colorado: geochemistry of gold and base metal ore deposition in the volcanic environment // Econ. Geol., 1977, v. 72, p. 1285—1320.

**Chapman R.J., Leake R.C., Bond D.P.G., Stedra V., Fairgrieve B.** Chemical and mineralogical signatures of gold formed in oxidizing chloride hydrothermal systems and their significance within populations of placer gold grains collected during reconnaissance // Econ. Geol., 2009, v. 104, p. 563—585.

**Gammons C.H., Williams-Jones A.E.** Hydrothermal geochemistry of electrum: thermodynamic constraints // Econ. Geol., 1995, v. 95, p. 420-432.

**Groves D.I., Goldfarb R.J., Gebre-Mariam M., Hagemann S.G., Goldfarb R.J., Robert F.** Orogenic gold deposits: a proposed classification in the context of their crustal distribution and relationship to other gold deposit types // Ore Geol. Rev., 1998, № 13, p. 7—27.

**Knight J., Leitch C.H.B.** Phase relations in the system Au-Cu-Ag at low temperatures, based on natural assemblages // Canad. Miner., 2001, v. 39, p. 889—905.

**Knipe S.W., Fleet M.E.** Gold-copper alloy minerals from the Kerr Mine, Ontario // *Canad. Miner.*, 1997, v. 35, p. 573—586.

**Oen I.S., Kieft C.** Nickeline with pyrrhotite and cubanite exsolutions, Ni-Co rich loellingite and an Au-Cu alloy in Cr-Ni ores from Beni-Bousera, Morocco // *Neues Jahrb. Miner. Monatsh.*, 1974, p. 1—8.

**Okamoto H., Massalski T.B.** The Au—Hg (Gold—Mercury) system // *Bull. Alloy Phase Diagrams*, 1989, v.10, № 1, p. 8—15.

**Ramdohr P.** The ore minerals and their intergrowths. Oxford, Pergamon Press, 1982, 1207 p.

**Shimizu T., Matsueda H., Ishigama D.** Genesis of epithermal Au-Ag mineralization of the Koryu Mine, Hokkaido, Japan // *Econ. Geol.*, 1998, v. 93, p. 303—325.

**Sillitoe R.H.** Porphyry copper systems // *Econ. Geol.*, 2010, v. 105, p. 3—41.

**Ulrich T., Heinrich C.A.** Geology and alternation geochemistry of the porphyry Cu-Au deposit at Bajo de la Alumbrera, Argentina // *Econ. Geol.*, 2001, v. 96, p. 1719—1742.

*Рекомендована к печати 6 декабря 2016 г.  
А.Э. Изохом*

*Поступила в редакцию 19 мая 2016 г.,  
после доработки — 25 октября 2016 г*