

УДК 553.435 (470.5)

## СОСТАВ САМОРОДНОГО ЗОЛОТА В КОЛЧЕДАННЫХ РУДАХ УРАЛА

© 2003 г. И. В. Викентьев

Представлено академиком Н.П. Лаверовым 17.06.2003 г.

Поступило 24.06.2003 г.

Золото присутствует в колчеданных рудах в виде: а) обособлений (1–100 мкм) собственных минералов в сульфидах (самородное золото, обычно низкопробное, и теллуриды, реже другие соединения Au) – такое “свободное” золото обычно позднее – и б) более мелкого, “невидимого” (тонкодисперсного, субмикроскопического) металла в сульфидах. Для второй формы остается неясным, входит ли оно в решетку сульфидов или же находится в них в виде микровключений. Самородная форма нахождения золота в колчеданных рудах Урала впервые установлена лишь в 1936 г. [1] и в связи со своей малой распространенностью она остается малоизученной [2, 3].

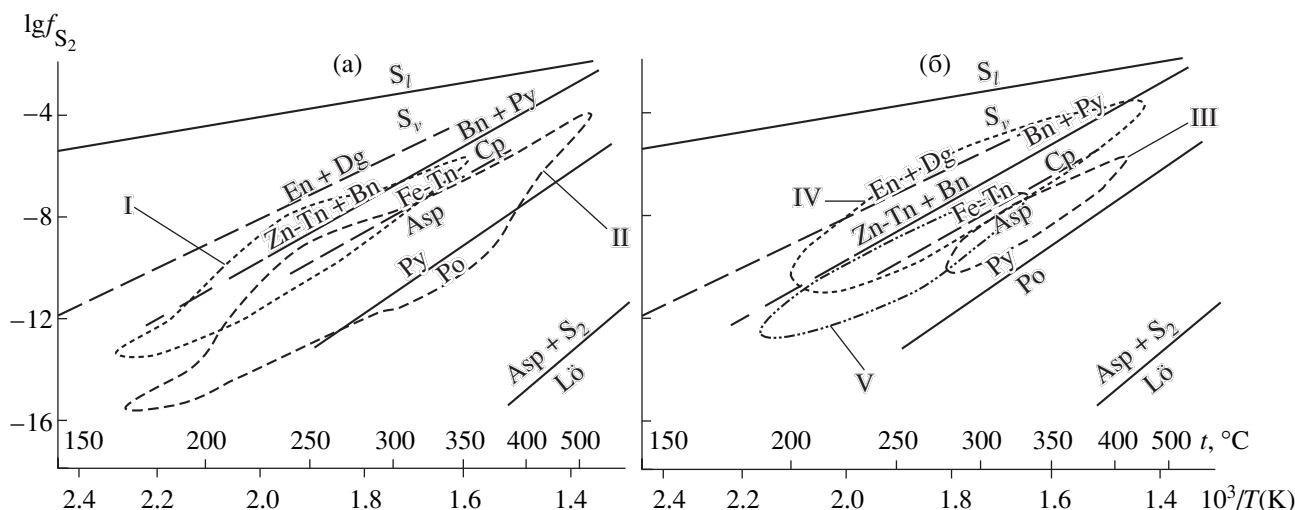
Автором исследованы распределение благородных металлов и состав самородного золота в рудах и сульфидных концентратах Гайского, Учалинского, Узельгинского, Александринского, Сафьяновского, Дегтярского и некоторых других месторождений Урала и оценены условия образования золотоносных колчеданных руд.

Образцы руд отобраны в основном из обогащенных золотом участков колчеданных месторождений. Пробы изучены с помощью рудной микроскопии и проанализированы различными методами, среди которых предпочтение отдано нейтронно-активационному анализу. Для выявления в колчеданных рудах собственных минералов благородных металлов выделялись ультратяжелые фракции из крупных проб (0.5–1 кг), в которых предварительным анализом были установлены повышенные содержания Au. Полученный концентрат исследовался на микроанализаторах в смонтированных шлифах и насыпных препаратах. Состав самородного золота и других рудных минералов изучен с помощью рентгеноспектрального микроанализатора “Сamebax-SX-50” (с увеличением для сульфидов экспозиции в точке до 100 с соответственно предел обнаруже-

ния Au достигал 0.005 мас. %) и электронного микроскопа с энергодисперсионной приставкой JSM-5300+Link ISIS. Физико-химические условия образования золотосодержащих парагенезисов оценены с помощью электрум-сфалеритового и арсенопиритового геотермометров и исследования флюидных включений в минералах.

В рудах колчеданных месторождений содержания Au составляют 0.5–1.5 г/т. Присутствуют зоны обогащения руд золотом до 2–2.5 г/т с единичными значениями 7–15 и даже 90 г/т. Участки этих медно-цинковых руд с содержаниями Au 1.5–2 г/т и выше и нередко с повышенной ролью Zn, Pb, Ba и Ag стали предметом более детального изучения, поскольку они относительно обогащены самородным золотом. Оценки по минеральным геотермометрам показывают, что формирование значительной части таких богатых руд происходило при повышенной фугитивности серы в условиях сравнительно небольших ее отклонений от линии равновесия халькопирита с борнитом: значения  $\lg f_{S_2}$  колеблются в большинстве изученных ассоциаций в пределах от –12 до –5, а температура 150–380°C. В этих условиях наиболее типичными являются парагенезисы борнит + блеклая руда и халькопирит + блеклая руда. Среди изученных месторождений наиболее обогащены золотом руды Гайского и Александринского месторождений. При каждой данной температуре для образования богатых золотом руд требовалась повышенная на один-два порядка фугитивность серы по сравнению с таковой для руд с рядовыми содержаниями ~1 г/т Au (рис. 1). Анализ данных по устойчивости минералов Te показал, что изученные ассоциации на диаграмме  $\lg f_{Te_2} - t(°C)$  в основном попадают в поле сосуществования гессита с самородным золотом [4].

В мономинеральных пробах основных рудообразующих сульфидах пирита, халькопирита и сфалерита по данным нейтронно-активационного и пробирного анализов обычно 1–2 г/т золота, максимальные содержания составляют 22, 18.6 и 10.6 г/т соответственно. Более высокие величины обычно характерны для слабо преобразованных



**Рис. 1.** Условия формирования руд слабо (а) и сильно (б) метаморфизованных колчеданных месторождений Урала на диаграмме фугитивность серы–температура (I – Александринское, II – Узельгинское, III – Дегтярское, IV – Гай, V – Сан-Дonato). Tn – теннантит, Fe-Tn – железистый теннантит, Zn-Tn – цинковистый теннантит, Py – пирит, Bn – борнит, Cr – халькопирит, En – энаргит, Po – пирротин, Asp – арсенопирит, Dg – дигенит, Lo – лёллингит;  $S_1$  – жидкая сера,  $S_v$  – пары серы.

колчеданных залежей (Сафьяновское, Александринское, Узельгинское). Золото с помощью рентгеноспектрального микроанализа установлено также в галените 0.05–0.41 мас. %, борните 0.02–0.27 мас. % и блеклой руде 0.10–0.22 мас. %.

В ряде месторождений повышенные концентрации золота обнаружены в рудах с реликтовой колломорфной текстурой (Александринское, Узельгинское), особенно это характерно для мышьяковистого пирита. Ассоциирующий с колломорфным кристаллически-зернистый пирит характеризуется на порядок меньшими концентрациями Au, Ag и As. Повышенная золотоносность колломорфного мышьяковистого пирита предполагает, что Au в неперекристаллизованных рудах могло изоморфно замещать позиции Fe в решетке мышьяковистого пирита ( $Au^+ + As \leftrightarrow Fe + S$ ). Возможно, золото переходило в видимое состояние в связи с перекристаллизацией руд и выносом из пирита мышьяка, связываемого затем в теннантит, который характерен для поздних парагенезисов. Освободившееся серебро входило в состав самородного золота и блеклой руды.

Колчеданные руды изученных месторождений содержат редкую мелкую вкрапленность Au–Ag-минералов, среди которых преобладает самородное золото с размерами выделений 10–20 мкм, редко более 100 мкм. Au образует также другие собственные минералы, в основном теллуриды (петцит, сильванит, креннерит, калаверит, мутманит, монтбрейит). Кроме этого, Au присутствует в виде примесей в других теллуридах (алтаите 0.02–5.2 мас. %, гессите 0.02–0.63 мас. %, тетрадимите и самородном теллуре ~0.2 мас. % Au).

Были исследованы составы самородного золота многих месторождений Урала, учтены также опубликованные данные по ряду месторождений [4–6]. Наиболее представительные данные получены по Сафьяновскому слабо преобразованному, Узельгинскому умеренно метаморфизованному (тела нижнего рудоносного уровня) и Сан-Дonato (им. III Интернационала) и Гайскому динамометаморфизованным, единичные – по другим объектам. Составы представленного Au–Ag-сплавами самородного золота этих месторождений перекрываются, но низкопробное золото более характерно для неметаморфизованных руд. Так на Сафьяновском в минерале присутствуют 53–81 мас. % Au (в основном <70 мас. %); помимо резко преобладающего Ag (7.5–41 мас. %) в нем определены примеси, мас. %: Hg до 12, Bi до 1.6, Cu до 0.58, Te до 0.27, Pd до 0.1. В состав самородного золота Александринского месторождения входит Ag (19.3–32.8%); есть небольшие примеси, мас. %: Hg до 0.46, Cu до 0.14, Fe до 0.09 и Sb до 0.05. На Узельгинском месторождении, где минерал встречается в рудах нижнего уровня, умеренно преобразованных, в золотилах 67–87 мас. % Au и 13.2–26.4 мас. % Ag; наиболее распространенными элементами-примесями являются, мас. %: Te 0.1–1.2, Fe до 0.42, Hg 0.3–1.1 и Se 0.2–0.5, иногда присутствуют Pd до 0.85 и Pt до 2.23. Самородное золото в рудах сильно метаморфизованного Гайского месторождения отличается повышенным по сравнению с другими месторождениями Урала содержанием Au и максимальным его разбросом Au и Ag 52–97 мас. % (в большинстве >80 мас. %), Ag 2.6–44.1 мас. %; в серебристом золоте с пробностью 770–810 присутствует Hg 0.2–0.9 мас. %, а в высоко-

копробном золоте обнаружены, мас. %: Cu 0.1–2.3, Fe и Co до 0.4, Ni до 0.3, Pt до 0.2, Pd до 0.17, Te до 0.15. Самородное золото месторождения Сан-Дonato также характеризуется значительным разбросом содержания Au 54–85 мас. % с максимумами встречаемости 65–69 и 77–79 мас. %; в нем присутствуют, мас. %: Ag 14–45, Cu до 4.9, Hg до 0.24, Te и Se до 0.12, Pt до 0.13.

Наиболее крупные золотины размером 100–1000 мкм и даже более установлены на месторождениях, руды которых испытали существенное метаморфическое воздействие: Гайское, Дегтярское, Карабашское, Сан-Дonato. При слабых преобразованиях рудных залежей (Узельгинское, Учалинское, Молодежное, Александринское, Сафьяновское) весьма редкие выделения самородного золота обнаруживают мельчайшие размеры 5–25 мкм; более крупные обособления (до 150–200 мкм) появляются в участках наложения поздних гидротермальных процессов, выраженных в формировании перекристаллизованных руд и нередко обогащенных блеклой рудой кварц-сульфидных прожилках ( $\pm$ барит). Очевидно, появление собственных минералов золота в основном было связано с освобождением сульфидов от изоморфного металла при гидротермальных эпигенетических преобразованиях.

Для изученных нами колчеданных месторождений установлено сложное поведение золота. С одной стороны, отмечается положительная корреляция содержаний в рудах Au и Cu: она может отражать более предпочтительное вхождение его в халькопирит и блеклые руды, чем в основной промышленный минерал цинка сфалерит, что подтверждается данными по современным колчеданным рудам в океане [7]. С другой стороны, обычно проявлены повышенная золотонность цинксодержащих (медно-цинковых) руд по сравнению с медноколчеданными, а также близкое пространственное положение максимумов концентраций в рудах золота и цинка в пределах рудных тел. Это, возможно, связано с совместным накоплением Au и Zn на поздних стадиях гидротермального процесса, характеризующихся отложением полиметаллических Pb–Zn–Ag-руд; золото в них, видимо, связано как с собственными минеральными формами, так и с минералами меди, железа и теллура, тесно срастающимися или включенными в сфалерит.

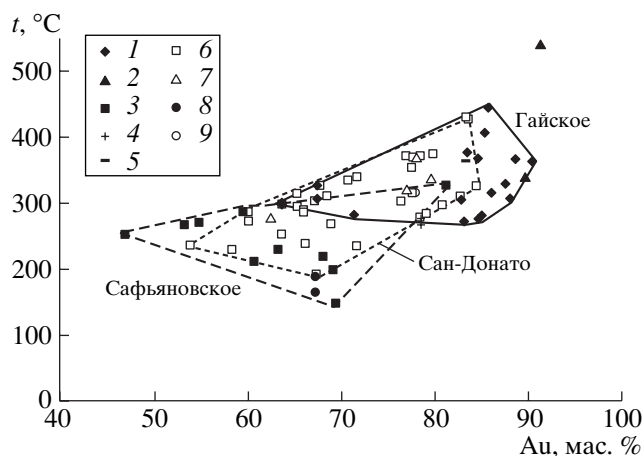
Очевидно, что “невидимое” тонкодисперсное золото в основных рудообразующих сульфидах является важной формой его концентрирования в изученных месторождениях. При перекристаллизации руд, связанной с поздними низкотемпературными стадиями гидротермального процесса и низкоградным метаморфизмом (пренил-пумпеллитовая–зеленосланцевая фации), в колчеданных рудах появляются обособления видимого зо-

лота (~1 мкм и более) и теллуридов. Эти процессы приводили к укрупнению зерен золота путем собирательной перекристаллизации и увеличению доли свободного золота. Этот вывод подкрепляется современными результатами исследования форм нахождения золота в различных морфологических разновидностях пирита безборнитовых руд Гайского месторождения [8], а также фактом снижения содержаний Au и Ag в основных рудообразующих сульфидах (сфалерит, халькопирит и пирит) с увеличением степени метаморфизма руд [9].

Впервые о возможности укрупнения золота и переходе его из субмикроскопической (<0.2 мкм) в видимую форму при метаморфизме высказался В.М. Крейтер [10], сравнивший минералогические особенности слабо метаморфизованных залежей Южного Урала (почти нет видимого золота) и сильно метаморфизованных месторождений Среднего Урала с микроскопически видимым золотом. В пользу этого свидетельствовали и экспериментальные работы по освобождению “упорного”, неизвлекаемого золота золоторудных месторождений путем нагревания, иногда многократного, до 300–850°C, приводящего к укрупнению его выделений. Механизм процесса был неясен, и Г. Бюрг [11] предложил понятие о “самоочистке кристаллической решетки” пирита.

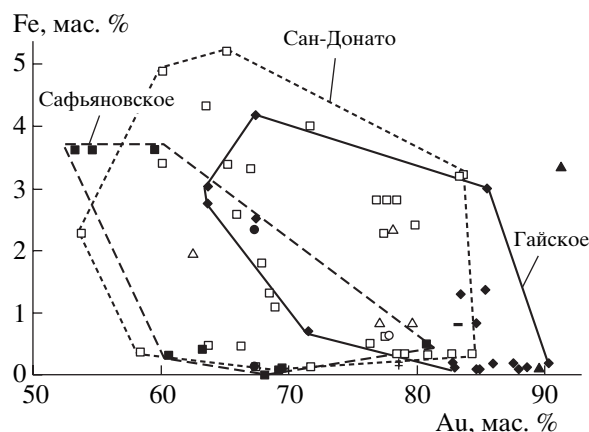
Близкие к колчеданным месторождениям по минеральному составу и *PT*-условиям отложения сульфидные гидротермальные постройки в современном океане сложены в основном слабо раскристаллизованными (неметаморфизованными) тонкозернистыми рудами. В них золото находится в основном в изоморфной форме в сульфидах Fe и Cu или в виде мелкой вкрапленности золотоносного халькопирита в сфалерите [7]. Мелкое гипогенное золото (~0.5 мкм) отлагается иногда внутри труб черных курильщиков, подчеркивая границы зон контрастного состава и строения, что является следствием высоких градиентов температуры и резких ее колебаний ( $\pm 50^\circ\text{C}$ ) для гидротермального флюида; для массивных руд свободное золото нехарактерно. По нашим расчетам [7], образование самородного золота возможно при снижении температуры до 150–200°C, что в нашем случае отвечает поздней низкотемпературной перекристаллизации руд.

Микрорентгеноспектральное исследование самородного золота колчеданных руд Урала обнаружило присутствие широкого спектра его составов с разбросом, достигающим нескольких десятков мас. % Au для отдельно взятого месторождения. При сопоставлении руд месторождений Сафьяновского, Гайского и Сан-Дonato (рис. 2) можно видеть рост содержания в минерале Au с падением железистости сосуществующего сфалерита. Менее выраженным является увеличение кон-



**Рис. 2.** Условия образования золотосодержащих колчеданных руд Урала по данным электрум-сфалеритовой геотермометрии. Часть исходных данных заимствована из [4]. Месторождения: 1 – Гайское, 2 – Карабаш, 3 – Сафьяновское, 4 – Октябрьское, 5 – Ю. Кузничихинское, 6 – Сан-Дonato, 7 – Дегтярское, 8 – Узельгинское, 9 – Барсучий Лог.

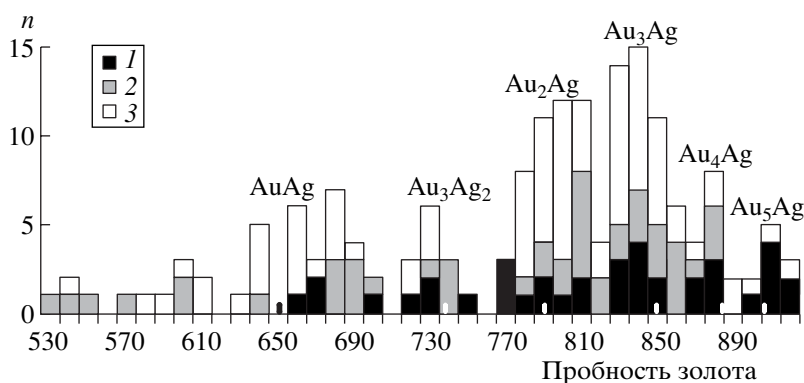
центрации золота в минерале с ростом степени гидротермально-метаморфического преобразования колчеданных руд. Подобное изменение состава сфалерита может быть вызвано ростом  $f_{S_2}$  во флюиде или уменьшением температуры кристаллизации сфалерита. Роль первого фактора оказывается более существенной. Возрастание  $f_{S_2}$  приводит к увеличению стабильности  $Ag_2S$  по сравнению с электрумом, что обуславливает кристаллизацию более высокопробного золота [12]. Это положение было подтверждено термодинамическими расчетами [13]. Рост рН и падение температуры ведут к образованию более серебряного электрума, как показано в [14].



**Рис. 3.** Соотношение содержаний Fe в сфалерите и Au в сосуществующем самородном золоте в колчеданных рудах Урала. Условные обозначения см. рис. 2.

Влияние увеличения температуры на рост пробности электрума заметно при сравнении в разной степени преобразованных месторождений. Так, последовательный сдвиг в сторону увеличения концентрации золота в минерале в ряду месторождений Сафьяновское–Сан-Дonato–Гай наиболее вероятно обусловлен именно ростом температуры гидротермально-метаморфического преобразования колчеданных руд. Предельно высокие величины пробности самородного золота установлены на максимально метаморфизованном Карабашском месторождении (89–92 мас. % Au).

Пилообразный характер суммарной гистограммы составов самородного золота (рис. 3), очевидно, отражает непрерывно-дискретный характер твердого раствора Au–Ag. Наличие возможных разрывов смесимости в этой бинарной системе обсуждалось ранее [2, 3, 15]; самостоятельные минеральные фазы с контрастными со-



**Рис. 4.** Состав самородного золота колчеданных руд Урала. 1 – Cu–Zn–Pb–Ba-месторождения баймакского типа слабо-метаморфизованные; 2, 3 – Cu–Zn-месторождения уральского типа слабо (2) и сильно (3) метаморфизованные. Учтены 188 анализов, в том числе 94 автора, остальные по данным [4–6]. Штрихами на оси абсцисс помечены составы реальных и гипотетических фаз самородного золота по [2, 3, 15] с дополнениями.

ставами наиболее уверенно фиксировались в высокосеребристой области [2]. В обзоре [15] составы с  $Ag \leq 25$  мас. % хотя и названы областью устойчивых твердых растворов, но предполагалось наличие в низкосеребристой области “по крайней мере двух фаз  $Au_3Ag$  и  $AuAg$ ”. Указывалось [3], что в природе наиболее вероятно существование фазы  $Au_2Ag$ . Очевидно, наши данные подтверждают эти предположения, хотя встречаемость электрума  $AuAg$  в колчеданных месторождениях Урала уступает двум другим упомянутым фазам.

Автор благодарен чл.-корр. РАН Н.С. Бортникову, В.П. Молошагу, М.А. Юдовской за помощь и полезное обсуждение, а А.И. Цепину, А.В. Мохову и А.Л. Керзину (ИГЕМ РАН) за микроанализы.

Исследования выполнены при финансовой поддержке РФФИ (проект 01-05-64510), Министерства науки, промышленности и технологий РФ (Госконтракт 43.016.11.1607 “Наноминералогия”) и Фонда содействия отечественной науке.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Юшко С.А. // Изв. АН СССР. Сер. Геология. 1936. № 2–3.
2. Новгородова М.И. Самородные металлы в гидротермальных рудах. М.: Наука, 1983. 286 с.
3. Петровская Н.В. Самородное золото. М.: Наука, 1973. 347 с.
4. Молошаг В.П., Грабежев А.И., Гуляева Т.Я. // Зап. ВМО. 2002. Ч. 131. № 5. С. 40–54.
5. Амосов Л.А., Мормилль С.И. // Изв. вузов. Горн. журн. 1996. № 3/4. С. 27–59.
6. Масленников В.В., Зайков В.В. Колчеданоносные палеогидротермальные поля окраинно-океанических структур Урала. Миасс: ИМин, 1998. 92 с.
7. Бортников Н.С., Кабри Л., Викентьев И.В. и др. // Геология руд. месторождений. 2003. Т. 45. № 3. С. 232–245.
8. Чантурия Е.Л., Бочаров В.А. // Цвет. металлы. 2001. № 6. С. 61–65.
9. Викентьев И.В., Беленькая Ю.А., Агеев Б.И. // Геология руд. месторождений. 2000. Т. 42. № 3. С. 248–274.
10. Крейтер В.М. // Изв. АН СССР. Сер. геол. 1948. № 1. С. 159–162.
11. Burg G.H. // Z. prakt. Geol. 1935. Jg. 43. H. 2. S. 17–26.
12. Shikazono N., Shimizu M. // Miner. deposita. 1987. V. 22. P. 309–314.
13. Gammons C.H., Willaims-Jones A.E. // Geochim. et cosmochim. acta. 1995. V. 59. № 17. P. 3453–3468.
14. Huston D.L., Bottrill R.S., Creeman R.A. et al. // Econ. Geol. 1992. V. 87. P. 542–563.
15. Некрасов И.Я. Геохимия, минералогия и генезис золоторудных месторождений. М.: Наука, 1991. 304 с.