

УДК 549.283

## ЭЛЕМЕНТЫ-ПРИМЕСИ В САМОРОДНОМ ЗОЛОТЕ – КРИТЕРИИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ФОРМАЦИОННОЙ ПРИНАДЛЕЖНОСТИ И УРОВНЯ ЭРОЗИОННОГО СРЕЗА ЗОЛОТОРУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

© 2003 г. В. П. Самусиков

Представлено академиком Н.В. Соболевым 28.06.2002 г.

Поступило 01.07.2002 г.

В пределах Северо-Востока России известны сотни рудопроявлений золота, но перспективы подавляющего большинства из них не ясны из-за слабой изученности. По минеральному составу и структурно-морфологическим особенностям они характеризуются большим разнообразием. Неравноценны они и по своей промышленной значимости и как рудные месторождения, и как источники россыпных месторождений. Кроме того, они характеризуются и различной величиной эрозионного среза – некоторые едва только вскрыты, другие же эродированы до корневых частей. С учетом высокой стоимости разведочных работ одной из важнейших практических задач является предварительная разбраковка выявленных рудопроявлений по степени их перспективности. Одним из критериев для этой цели может служить элементно-примесный состав самородного золота.

Автором изучены образцы самородного золота из нескольких десятков рудных и россыпных проявлений Верхне-Индибирского, Адычанского и Улахан-Тасского районов Восточной Якутии и некоторых месторождений Магаданской области. По формационной принадлежности это месторождения малосульфидной золото-кварцевой, золото-сурьмяной и золото-редкометальной формаций плутогенного ряда. Выполнены более 2 тысяч микронзондовых и около 500 спектральных количественных и полуколичественных анализов. Для количественных анализов использовались отдельные золотины массой около 10 мг и более. От каждой золотины отрезались микрокусочки (1–2 мг) для установления их пробыности, которая определялась либо атомно-абсорбцион-

ным, либо рентгеноспектральными методами. Затем эти золотины обрабатывались на водяной бане в концентрированной HF (1–2 ч) и разбавленных (1:1) HCl и HNO<sub>3</sub>. Определение содержаний элементов-микропримесей производилось из навески 5 мг по методике, разработанной И.П. Ланцевым [1].

Основными компонентами самородного золота месторождений названных районов являются золото и серебро, и пробыность золота практически определяется соотношением этих двух элементов (Au/(Au + Ag)). В целом проба золота колеблется от 400 до 1000‰, но во всех районах преобладает золото пробы от 700 до 1000‰. Содержание других элементов в золоте (микропримеси) колеблется от “следов” до десятых долей процента. По данным полуколичественных спектральных анализов в золоте установлены около 20 элементов-микропримесей. Из них постоянно или почти постоянно во всех районах встречаются: Si, Mg, Ca, Al, Fe, Cu, Sb, Hg; несколько реже – Pb, As, Bi, Ti; еще реже – Ni, Te, Mn и совсем редко – Pd, Pt, Sn, Zn, Co. Есть основания считать, что такие элементы, как Cu, Hg, Sb, Bi, Ni, Pt, Pd, являются изоморфными [2 – 4], остальные связаны с микровключениями соответствующих жильных и рудных минералов, ассоциирующих с золотом в рудных телах.

Месторождения различной формационной принадлежности несколько различаются по химическому составу золота. На месторождениях малосульфидной золото-кварцевой формации (основная группа среди выявленных рудопроявлений) проба золота в целом колеблется от 600 до 1000‰, но преобладает золото пробы 700–950‰. В пределах отдельных месторождений колебания пробы обычно не более 100 единиц. Из числа рудных элементов-микропримесей в золоте основными являются (в порядке частоты встречаемости) Cu, Hg, Fe, Sb, Pb, As; заметно реже – Bi, Ni; изредка – Mn, Sn, Zn; в единичных анализах зафиксирована Pt. Содержание каждого из них

*Институт геологии алмаза  
и благородных металлов  
Якутского научного центра  
Сибирского отделения  
Российской Академии наук, Якутск*

обычно тысячные и сотые доли процента и лишь Hg в некоторых месторождениях до 0.5–1%. Для большинства рудопроявлений этой формации характерна повышенная крупность золота (в основном больше 0.25 мм), в связи с чем они являются хорошими источниками для образования россыпей. Содержания элементов-микропримесей в россыпном золоте на протяжении нескольких сотен метров от коренного источника хорошо сопоставляются с рудным золотом.

Для месторождений золото-сурьмяной формации характерными чертами золота являются его высокая проба (950–1000‰) и более высокое содержание Sb (до 0.1%) по сравнению с месторождениями других формаций. Характерно также практически полное отсутствие висмута (зафиксированы лишь “следы” в единичных пробах). Золото по гранулометрическому составу мелкое (90–100% меньше 0.5 мм), поэтому крупных россыпей месторождения этой формации не образуют. Следует отметить, что повышенное содержание Sb сохраняется и в россыпном золоте.

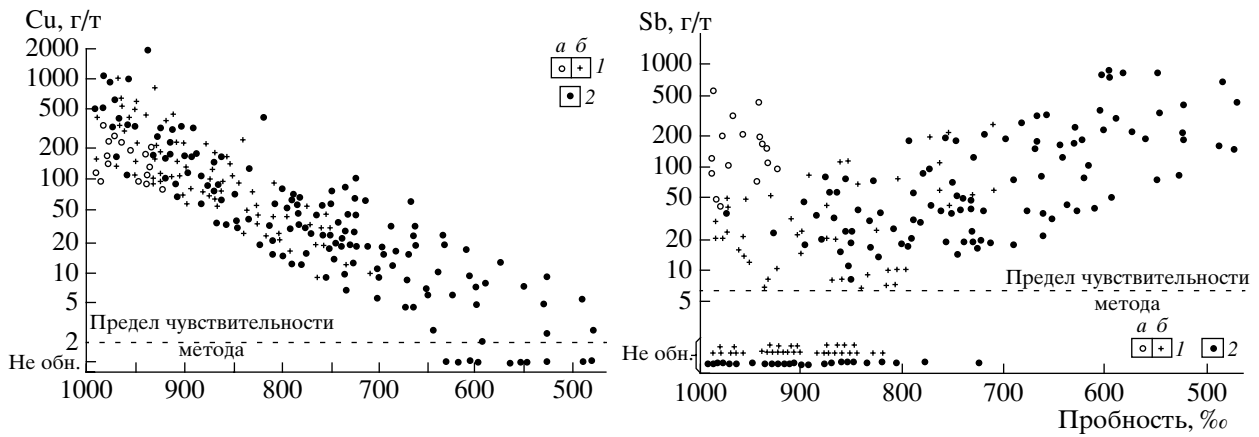
Для месторождений золото-редкометальной формации характерной чертой является очень большой разброс пробности золота – от 400 до 1000‰. В пределах отдельных месторождений колебания пробы достигают 200–300 единиц. Даже в пределах отдельных золотин зафиксированы колебания до 100 единиц. Из элементов-микропримесей в золоте определяющим для данной формации является Вi, который встречается почти во всех пробах с содержанием сотни г/т (для золото-кварцевой формации содержание Вi в золоте граммы и десятки г/т). Кроме того, в золоте месторождений этой формации чаще встречается Ni, в некоторых пробах зафиксированы Те и Pd. Золото исключительно мелкое (около 90% представлено частицами меньше 0.1 мм), в связи с чем при их разрушении образуются лишь очень небольшие россыпи (десятки и первые сотни кг) с низким содержанием (до 1–2 г/м<sup>3</sup>).

Таким образом, уже на стадии поисково-съёмочных работ по составу золота из штучных образцов и шлиховых ореолов можно определить формационный тип выявленных рудопроявлений, на основании чего ориентировочно оценить их возможную промышленную значимость и перспективы россыпной золотоносности.

Для оценки перспектив того или иного рудопроявления на глубину принципиально важным является определение уровня его эрозионного среза. Решается эта задача путем изучения различных видов зональности месторождения (минералогическая, кристалломорфологическая, геохимическая, структурная и т.д.). Однако во многих случаях все эти виды зональности на золоторудных месторождениях бывают проявлены очень нечетко, в связи с чем решить вопрос об

уровне среза без горных работ не всегда возможно. Существенную помощь в этом плане может оказать выявление “скрытой” минералого-геохимической зональности отдельных минералов. Ранее [5] нами была обоснована принципиальная возможность использовать для этой цели отношение содержаний Cu и Sb в самородном золоте.

Движущей силой кристаллизации, как известно, служит пересыщение рудоносных растворов. Пересыщение является функцией физико-химических условий гидротермальной системы. Изменение этих условий в процессе рудоотложения вызывает соответствующее изменение степени пересыщения растворов (СПР). Содержание изоморфно-примесных элементов (ИПЭ) в свою очередь зависит от СПР. При этом основным фактором, определяющим их поведение в зависимости от СПР, является их коэффициент распределения ( $K$ ) относительно элемента-хозяина соответствующего минерала. Если  $K > 1$ , содержание этого элемента с увеличением СПР в процессе рудоотложения уменьшается, если  $K < 1$  – увеличивается (доказано экспериментально [6]). При наличии в растворе ИПЭ с  $K > 1$  и  $K < 1$ , как известно из работ В.Г. Хлопина [7], они ведут себя независимо друг от друга в соответствии с их коэффициентами распределения. Следовательно, при увеличении СПР в процессе рудоотложения ранние выделения того или иного минерала будут характеризоваться повышенным содержанием ИПЭ с  $K > 1$ , а поздние – элементами с  $K < 1$ . Если при этом фронт кристаллизации перемещается в пространстве, должна возникать вертикальная концентрационная зональность тех и других элементов: содержание элементов с  $K > 1$  по восстановию рудных тел будет уменьшаться, а элементов с  $K < 1$  – увеличиваться (“скрытая” минералого-геохимическая зональность). По нашим расчетам [5] в самородном золоте  $K$  для Ag и Sb меньше единицы, для Cu – больше единицы. Этим и объясняется положительная корреляция Ag и Sb и отрицательная Ag и Cu. Как видно из рис. 1, содержание Cu в золоте с пробой, близкой к 1000‰ (т.е. при содержании Ag первые проценты), составляет в среднем около 500 г/т, а при пробности около 600‰ и ниже (Ag около 40% и более) ее содержание в основном до 10 г/т. Поведение Sb обратное – первые десятки г/т в высокопробном золоте (исключая месторождения золото-сурьмяной формации) и сотни г/т в низкопробном золоте. Противоположно ведут себя эти элементы и в вертикальном разрезе месторождений – содержание Cu в золоте от нижнерудных горизонтов к верхнерудным, как правило, уменьшается, а содержание Sb увеличивается. Таким образом, по содержанию этих элементов (с учетом пробности золота) можно судить об уровне вскрытия того или иного рудопроявления (верхне-, средне-, нижнерудный).

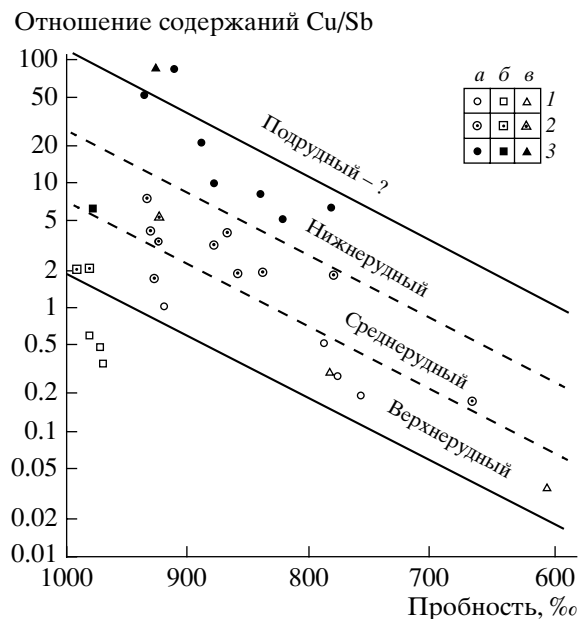


**Рис. 1.** Зависимость содержаний меди и сурьмы в самородном золоте от его пробности. 1 – образцы из рудных проявлений (*a* – золото-сурьмяные, *b* – золото-кварцевые); 2 – образцы из россыпных проявлений.

Для проверки этого заключения нами проанализированы образцы золота (и собраны литературные данные) по некоторым детально разведанным либо тематически хорошо изученным месторождениям с установленным уровнем эрозионного среза [8], которые приведены в табл. 1. Если данные этой таблицы нанести на графики (рис. 1), получается следующая картина. По содержанию Cu месторождения с верхнерудным уровнем среза тяготеют к нижней границе графика (содержания Cu пониженные), а месторождения с нижнерудным уровнем среза – к верхней границе (содержания Cu повышенные). По Sb наоборот – точки, соответствующие верхнерудным горизонтам, концентрируются в верхней половине графика, а соответствующие нижнерудным горизонтам концентрируются в нижней половине графика. Зональность выражается более контрастно, если использовать одновременно оба элемента в виде коэффициента отношения их содержаний (Cu/Sb). Этот вариант представлен на рис. 2. Если на рис. 1 изменение содержаний по вертикали (при одинаковой пробности) меняется в 10–15 раз, на рис. 2 – примерно в 50 раз. Здесь месторождения с различным уровнем среза разграничены между собой более четко: слабо эродированные располагаются у нижней границы графика, средне эродированные – в центральной части, а сильно эродированные – у верхней границы графика. Не вписываются в эту схему золото-сурьмяные месторождения, что объясняется изначально повышенным содержанием Sb в золоте. Их коэффициенты (Cu/Sb) для всех уровней среза в несколько раз меньше в сравнении с месторождениями золото-кварцевой формации с аналогичной пробой золота. Для них необходима своя цифровая шкала, но фактического материала пока недостаточно (разведаны лишь единичные месторождения). Для ориентировочной оценки можно предложить их коэффициент (Cu/Sb) умножить на 5.

На рис. 1 наряду с данными по рудному золоту нанесены данные и по россыпному золоту. Статистически заметной разницы между ними не наблюдается. Следовательно, в принципе по россыпному золоту можно определить не только формационный тип коренных источников, но и оценить уровень их эрозионного среза, в том числе и не выявленных рудопроявлений.

Анализ литературных данных показывает, что рассмотренные особенности поведения Cu и Sb в самородном золоте (взаимосвязь с пробностью и



**Рис. 2.** Распределение месторождений с различным уровнем эрозионного среза в зависимости от пробности и отношения содержаний Cu/Sb в золоте. *a* – золото-кварцевая, *b* – золото-сурьмяная, *v* – золото-редкометалльная формации. Уровень среза: 1 – верхнерудный, 2 – среднерудный, 3 – нижнерудный.

**Таблица 1.** Среднее содержание Cu и Sb (г/т) в самородном золоте месторождений с различным уровнем эрозионного среза

Формационный тип м-ния	Уровень эрозион. среза	Название м-ния	Средняя проба золота	Cu	Sb	Cu/Sb	Число анализов	Источник информ.
Золото-кварцевые малосульфидные	Верхнерудный	Бадран	924	144	116	1.2	12	Автор
		Нежданника	780	26	31	0.8	68	[9]
		Школьное	766	35	127	0.3	6	Автор
		Хаптагай-хая	760	17	96	0.2	8	»
	Среднерудный	Утинка	941	200	50	4	12	[10]
		»	926	180	79	2.3	5	[9]
		Штурмовское	933	296	78	4	7	[9]
		»	918	400	50	8	7	[10]
		Тихое	881	124	36	3.5	5	[9]
		Юглер	868	100	25	4	7	Автор
		Светлое	858	80	40	2	?	[8]
		Жданное	836	46	24	2	14	Автор
		Алешкино	828	45	25	2	38	[9]
		Наталка	780	26	31	0.8	4	Автор
		Якутское	660	14	55	0.3	8	»
	Нижнерудный	Мальдяк	930	300	4	75	11	[10]
		Кокарин	917	155	7	22	8	Автор
		Золотой рог	910	290	Не обн.	>100	3	»
		Сана	894	110	9	12	8	»
Базовское		832	55	9	6	6	»	
Туора-Тас		770	54	7	8	7	»	
Золото-сурьмяные	Верхнерудный	Малтан	990	102	165	0.6	6	Автор
		Сарылах	984	155	320	0.5	7	»
		Сентачан	976	75	242	0.3	6	»
	Среднерудный	Тан	993	106	50	2	3	[11]
		Луч	989	264	134	2	5	[9]
	Нижнерудный	Эль	983	560	90	6	2	[11]
Золото-редкометальные	Верхнерудный	Эргелях	785	67	203	0.3	4	[9]
		Тугучак	600	20	800	0.03	3	Автор
	Среднерудный	Ат-Юрях	925	500	90	5.5	2	Автор
	Нижнерудный	Дыбы	923	250	Не обн.	>100	4	[9]

изменение содержаний на глубину) имеют место и в других золотоносных районах. Приведем несколько примеров. В работе Н.М. Давиденко [12] по одному из месторождений Западной Чукотки приводятся следующие величины: верхний горизонт – содержание Ag в золоте 16.4%, Cu 0.003%; нижний горизонт – содержание Ag 11.4%, Cu 0.02%. В работе А.В. Волкова и др. [13] по золото-серебряным месторождениям Восточной Чукотки интересные данные приводятся по месторождению Промежуточное. Месторождение тектонически

расчленено на два блока, в результате чего рудные тела в Северном блоке срезаны глубже, чем в Южном. В жиле № 8 (Южный блок) проба золота 670–740‰ (средняя 714‰), содержание Cu 7 г/т, Sb 60 г/т (Cu/Sb = 0.1). В Северном блоке проба золота увеличивается до 900‰ (жила №1), содержание Cu увеличивается до 300 г/т, а содержание Sb уменьшается до 6 г/т (Cu/Sb = 50). Аналогичные данные приводятся в работе В.Г. Дзасохова [14] для двух смежных рудных полей с разной глубиной эрозионного среза (район не указан).

В рудных телах слабоэродированного рудного поля проба колеблется от 600 до 800‰ (средняя 693‰), содержание Cu в золоте до 10 г/т, содержание Sb до 100 г/т. В рудном поле с повышенным срезом проба золота 900–950‰ (средняя 903‰), содержание Cu от 100 до 500 г/т, Sb не обнаружена. В работе В.Г. Моисеенко [15] при характеристике одного из месторождений Верхне-Селемджинского района (Приамурье) отмечается, что золото на нижнем горизонте, по сравнению с верхним, отличается более высокой пробой, повышенным содержанием Cu и пониженным содержанием Sb.

Есть все основания предполагать, что описанные выше особенности поведения Sb и Cu в самородном золоте являются общей закономерностью золоторудных месторождений. Абсолютные значения их содержаний, по всей вероятности, в каждом районе будут свои (влияние металлогенической и геохимической специфики районов).

Аналогичный анализ, проведенный нами на единичных месторождениях для Hg в золоте [5], показывает, что ее поведение в принципе похоже на Sb – такая же взаимосвязь с пробностью золота и такой же характер изменения в вертикальном разрезе месторождений. Схожесть их поведения обусловлена тем, что коэффициент распределения Hg в самородном золоте, так же как и Sb, меньше единицы. Со временем, при более детальном изучении этого вопроса, можно будет рекомендовать для оценки уровня среза коэффициент Cu/Hg или Cu/(Sb + Hg).

Анализы золота выполнены в Институте геологии алмаза и благородных металлов Якутского научного центра СО РАН: микронзондовые – Н.В. Лескова, Л.А. Павлова; атомно-абсорбционные – Н.Н. Олейникова; спектральные – Н.И. Петрова. Автор выражает благодарность названным сотрудникам. Автор признателен доктору геол.-мин. наук Г.Н. Гамянину и В.М. Суплецову за обсуждение фактического материала в процессе подготовки статьи.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Спектрографическое определение элементов-примесей в самородном золоте. Инструкция № 141. М.: ВИМС, 1976. 41 с.
2. Диаграммы состояния двойных металлических систем: Справочник / Под ред. Н.П. Лякишева. М.: Машиностроение. 1996. Т. 1. 992 с.
3. Кренделев Ф.П., Теплов С.Н., Карманов Н.С. Неоднородность минералов и рост кристаллов. Материалы XI съезда ММА. Новосибирск, 1978. М.: Наука, 1980. С. 95–104.
4. Нестеренко Г.В., Кузнецова А.И., Лаврентьев Ю.Г. // Геология и геофизика. 1980. № 10. С. 129–133.
5. Самусиков В.П. // ДАН. 1985. Т. 284. № 6. С. 1467–1470.
6. Жмурова З.И., Хаимов-Мальков В.Я. // Кристаллография. 1970. Т. 15. В. 1. С. 142–148.
7. Хлопин В.Г. Избранные труды. М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1975. Т. 1. 370 с.
8. Многофакторные прогнозно-поисковые модели месторождений золота и серебра Северо-Востока России / Под ред. М.М. Константинова. М., 1992. 140 с.
9. Гамянин Г.Н. Минералого-геохимические аспекты золотого оруденения Верхояно-Колымских мезозоид. М.: Геос, 2001. 222 с.
10. Геология россыпей золота Северо-Востока СССР / Под ред. О.Х. Цопанова. Магадан, 1979. 200 с.
11. Суплецов В.М., Жданов Ю.Я. В сб.: Редкие самородные металлы и интерметаллиды коренных и россыпных месторождений Якутии. Якутск, 1992. С. 20–39.
12. Давиденко Н.М. // Геология руд. месторождений. 1970. Т. 12. № 2. С. 103–106.
13. Волков А.В., Сидоров А.А. Уникальный золоторудный район Чукотки. М.; Магадан, 2001. 180 с.
14. Дзасохов В.Г. В сб.: Поисковая минералогия: современное состояние и перспективы развития. Алма-Ата, 1987. С. 77–78.
15. Моисеенко В.Г. Геохимия и минералогия золота рудных районов Дальнего Востока. М.: Наука, 1977. 304 с.