

## ЗАКОНОМЕРНОСТИ КОНЦЕНТРАЦИИ ИЗОМОРФНО-ПРИМЕСНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В МИНЕРАЛАХ ПРИ ГИДРОТЕРМАЛЬНОМ РУДООБРАЗОВАНИИ

**В.П. Самусиков**

*Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН, 677980, Якутск, просп. Ленина, 39, Россия*

Во многих золотоносных районах имеются десятки выявленных рудопроявлений золота, перспективы которых не ясны из-за слабой изученности. Учитывая высокую стоимость разведки, необходима предварительная их разбраковка с использованием малозатратных методов. Занимаясь изучением типоморфных особенностей минералов золоторудных месторождений Верхояно-Колымского региона, автором установлена зависимость содержания изоморфно-примесных элементов (ИПЭ) от степени пересыщения растворов (СПР). Предварительные результаты исследований показывают, что, исходя из этой зависимости, могут быть разработаны критерии для выявления «скрытой» минералого-геохимической зональности, а на ее основе критерии прогнозирования оруденения на глубину.

Основным фактором, определяющим поведение ИПЭ 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, при  $K < 1$  — увеличивается. При наличии в растворе ИПЭ с  $K > 1$  и  $K < 1$  они ведут себя независимо друг от друга в соответствии с их коэффициентами распределения. Иными словами, при увеличении СПР в процессе рудоотложения ранние выделения того или иного минерала будут характеризоваться повышенными содержаниями 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 восстанию рудных тел будет уменьшаться, а элементов с  $K < 1$  — увеличиваться («скрытая» минералого-геохимическая зональность).

На примере самородного золота приводится фактический материал в этом плане. Рассмотрены особенности поведения Ag, Sb, Hg, Cu, Ni, Co в следующих аспектах: в зависимости от глубины формирования месторождений от палеоповерхности (глубинные → малоглубинные), в вертикальном разрезе отдельных месторождений, по стадиям минерализации, в разрезе отдельных кристаллов с зональным строением. Показано, что Ag, Sb, Hg с одной стороны и Cu, Ni, Co — с другой во всех вышеуказанных аспектах ведут себя противоположно. Элементы первой группы по отношению к Au имеют  $K < 1$ , а второй —  $K > 1$ . Из них особый интерес представляют Cu и Sb. В вертикальном разрезе отдельных месторождений содержание Cu в золоте с глубиной увеличивается, а содержание Sb — уменьшается. Отношение содержаний этих элементов (Cu/Sb) можно использовать для оценки уровня эрозионного среза месторождений, что позволяет прогнозировать их возможное продолжение на глубину. Приводятся примеры хорошо разведанных месторождений.

*Пересыщение растворов, элементы-примеси, коэффициент распределения, золото, эрозионный срез.*

## REGULARITIES IN THE ISOMORPHIC-IMPURITY ELEMENT CONTENT OF MINERALS DURING HYDROTHERMAL ORE FORMATION

**V.P. Samusikov**

Many gold fields host scores of discovered gold ore occurrences with unclear prospects because of their insufficient geological exploration. Since exploration is expensive, the occurrences should be first appraised by low-cost methods. Studying the typomorphic features of minerals from the gold fields of the Upper Yana-Kolyma region, we have established a relationship between the contents of isomorphic impurity elements (IE) and the degree of solution supersaturation (DSS). Preliminary studies show that, based on this relationship, criteria can be developed for revealing “concealed” mineralogical-geochemical zonation and predicting mineralization to depth.

The determining factor for the behavior of IIE, depending on the DSS, is their distribution coefficient ( $K$ ) with respect to the host element. If  $K > 1$ , the content of these elements decreases with increasing DSS during ore deposition; if  $K < 1$ , it increases. When a solution contains IIE with  $K > 1$  and  $K < 1$ , they behave according to their distribution coefficients. In other words, when the DSS increases during ore deposition, IIE with  $K > 1$  will be typical of early mineral segregations, and IIE with  $K < 1$ , of late ones. If the crystallization front migrates, this must give rise to a vertical zonation in the content of both groups of elements. The content of elements with  $K > 1$  will decrease upsection, and that of elements with  $K < 1$  will increase (“concealed” mineralogical-geochemical zonation).

In connection with this subject, the paper reports data using native gold as an example. The behavior of Ag, Sb, Hg, Cu, Ni, and Co is discussed depending on the depth of deposit formation from the paleosurface (deep-seated → shallow); in the vertical section of individual deposits; depending on mineralization stages; in

the cross-section of individual crystals with a zonal structure. The behavior of Ag, Sb, and Hg has been shown to be opposite to that of Cu, Ni, and Co in all these aspects. With respect to Au, the first group of elements has  $K < 1$ , and the second one,  $K > 1$ . Copper and antimony are of particular interest. In the vertical section of individual deposits, the Cu content of gold increases with depth and the Sb content decreases. The Cu/Sb ratio can be used to estimate the erosional truncation level of deposits and thus predict their extension to depth. Examples of well-explored deposits are given.

*Solution supersaturation, impurity elements, distribution coefficient, gold, erosional truncation level*

## ВВЕДЕНИЕ

Состав минералов служит одним из главных источников информации о физико-химических условиях рудоотложения, поэтому выявление причинно-следственных связей между составом минералов и характеристиками минералообразующих процессов является важнейшей задачей генетической минералогии. Не менее важно это и в практическом отношении для разработки минералогических прогнозно-оценочных критериев. Одним из направлений для выявления таких связей является изучение особенностей поведения изоморфных примесей в минералах во времени и пространстве в процессе рудоотложения.

Кристаллохимические факторы определяют лишь потенциальные возможности вхождения изоморфных примесей в решетку того или иного минерала, реализация же этих возможностей регулируется физико-химическими параметрами гидротермальных растворов. Общеизвестно, что такими параметрами являются температура, давление, концентрация растворов и их pH и Eh. В то же время во многих случаях установлено, что прямой зависимости содержаний изоморфных примесей с названными параметрами не наблюдается. Для краткости сошлемся на авторитеты. Н.В. Петровская в своей монографии [1973] при обсуждении возможных причин изменчивости химсостава самородного золота приходит к следующему заключению. «Очевидно, влияние температуры на вхождение Ag в структуру кристаллизовавшегося золота не было определяющим. Нет достаточного основания и для вывода о значении общей концентрации Ag в верхних частях зоны гидротермальной деятельности: прямой зависимости пробы золота от богатства месторождений серебром не наблюдается» [1973, с. 95]. Аналогичное заключение относительно температуры и давления имеется в работе В.Г. Моисеенко [1977, с. 203] по месторождениям Приамурья. «Самородное золото месторождений Селемджинского района отлагалось при сходных температурах, и различие пробы самородного золота нельзя в данном случае объяснить температурным фактором... Расчет влияния давления на состав золота по формуле Клаузиуса—Клайперона показывает, что при столь небольшой разнице в давлении заметных изменений пробы золота не будет». Накопилось много фактов, которые не согласуются с известным выводом А.Е. Ферсмана [1939] о закономерном очищении минералов на поздних стадиях рудоотложения (принцип автолизии). Можно привести и другие примеры, которые пока не имеют удовлетворительного объяснения.

Автор на основании детального изучения типоморфных особенностей основных минералов золоторудных месторождений пришел к выводу, что между вышеуказанными параметрами гидротермальных растворов и конечным результатом (составом минералов) существует еще один фактор — это степень пересыщения растворов, при которой идет кристаллизация данного минерала. Именно этот фактор, по мнению автора, и регулирует поведение изоморфных примесей.

## ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ

Из работ В.Г. Хлопина [1957] известно, что при равновесной кристаллизации распределение изоморфно-примесных элементов (ИПЭ) между жидкой и твердой фазами подчиняется закону Бертелло—Нернста (закон распределения):  $C_T = K \cdot C_{ж.}$ , где  $C_T$  и  $C_{ж.}$  — относительная концентрация элемента-примеси в твердой и жидкой фазах соответственно,  $K$  — коэффициент распределения этого элемента между жидкой и твердой фазами. Как видно из уравнения, содержание элемента-примеси в твердой фазе зависит от его концентрации в жидкой фазе и от абсолютного значения  $K$ . По формулировке закона Бертелло—Нернста, при кристаллизации в равновесных условиях  $K$  для данной системы величина постоянная и зависит только от природы растворителя и растворенных в нем элементов, образующих твердую фазу. При этом, согласно правилу Руффа [Современная кристаллография, 1979], если основной элемент твердой фазы (элемент-хозяин) растворяется в данном растворе лучше, чем элемент-примесь, то для этой пары элементов  $K > 1$ , если хуже, то  $K < 1$ . При кристаллизации в неравновесных условиях  $K$  — величина переменная. Для систем с  $K > 1$  при увеличении степени пересыщения растворов относительно основного элемента абсолютное значение  $K$  уменьшается, для систем с  $K < 1$  — увеличивается [Жмурова, Хаимов-Мальков, 1970]. Таким образом, при кристаллизации в неравновесных условиях содержание изоморфной примеси в твердой фазе будет зависеть не только от ее концентрации в жидкой фазе, но и от степени пересыщения растворов (СПР), при которой идет кристаллизация. Применительно к природному

минералообразованию из этих исходных данных можно сделать некоторые выводы, позволяющие понять особенности поведения изоморфных примесей в различных минералах в процессе рудоотложения.

I. Для систем с  $K > 1$  максимальное вхождение элемента-примеси в тот или иной минерал возможно при его кристаллизации из слабо пересыщенных растворов относительно элемента-хозяина данного минерала, а для систем с  $K < 1$  — из сильно пересыщенных растворов (при прочих равных условиях).

II. При наличии в растворе ИПЭ с  $K > 1$  и  $K < 1$  при изменении пересыщения в процессе кристаллизации твердая фаза одновременно будет обогащаться одними элементами и обедняться другими в соответствии с их коэффициентами распределения.

III. При увеличении СПР в процессе рудоотложения ранние выделения минералов в сравнении с более поздними их выделениями будут обогащены ИПЭ с  $K > 1$ , а поздние — элементами с  $K < 1$ . Если при этом фронт кристаллизации перемещается в пространстве, в распределении концентраций ИПЭ должна наблюдаться та или иная зональность: для элементов с  $K > 1$  их содержание в соответствующих минералах в направлении движения растворов будет уменьшаться, для элементов с  $K < 1$  — увеличиваться.

IV. При уменьшении пересыщения растворов поведение элементов-примесей, по сравнению с предыдущим, будет обратным. Поскольку этот вариант возможен лишь при условии, если исходный раствор был предварительно заметно пересыщен (иначе кристаллизация прекратится), изменение концентрации примесных элементов в минералах в направлении движения растворов должно быть волнообразным. При этом элементы с  $K > 1$  и  $K < 1$  должны вести себя противоположно, т.е. максимумы содержаний элементов с  $K > 1$  в вертикальном разрезе месторождения должны совпадать с минимумами содержаний элементов с  $K < 1$  и наоборот.

V. При одновременном изменении  $K$  и  $C_{ж}$  в движущемся растворе характер концентрационных кривых одного и того же элемента в вертикальном разрезе месторождения может быть различным. Если раствор будет обедняться каким-то примесным элементом (кристаллизация собственных минералов), то для систем с  $K < 1$ , при увеличении пересыщения действия  $K$  и  $C_{ж}$  будут направлены в противоположные стороны ( $K$  — увеличивается,  $C_{ж}$  — уменьшается) и характер зональности в этом случае будет зависеть от соотношения сил между ними на разных участках рудоотложения (в зоне максимального рудоотложения возможен перегиб концентрационных кривых).

Таким образом, для оценки возможного поведения примесных элементов при кристаллизации того или иного минерала принципиальным является значение  $K$  этих элементов по отношению к элементу-хозяину данного минерала (больше или меньше единицы). Для оценки  $K$  можно предложить несколько вариантов.

1. Сравнение средних содержаний элементов-примесей в рассматриваемом минерале из месторождений, сформировавшихся в условиях повышенных и малых глубин. Руды близповерхностных месторождений, как известно, характеризуются многими чертами, указывающими на их образование из сильно пересыщенных растворов (колломорфные текстуры, микрозернистость, близкоодновременное выделение многих минералов, скелетные кристаллы, дендриты и т.д.). Следовательно, минералы из этих месторождений в сравнении с их аналогами из глубинных месторождений, должны отличаться повышенным содержанием примесных элементов с  $K < 1$  и пониженным — с  $K > 1$ .

2. Другим критерием для оценки  $K$  может служить ряд последовательности выделений из растворов наиболее распространенных минералов, который можно записать в виде их основных элементов (от ранних к поздним): (Co, Ni, Fe), As, Sn, Bi, (Zn, Cu) Pb, Au, Ag, Sb, Hg. Взаиморасположение элементов, заключенных в скобки, у разных авторов разное. Эта последовательность, по мнению некоторых исследователей [Хелгесон, 1967; Барнс, Чаманский, 1970; Петровская, Шадлун, 1972; и др.], обусловлена различной растворимостью комплексных соединений этих элементов в гидротермальных растворах — слева направо растворимость увеличивается. Если это так, то, в соответствии с правилом Руффа, коэффициент распределения каждого из них (в роли элемента-примеси) по отношению к элементам, расположенным правее его (когда они выполняют роль элемента-хозяина) будет больше единицы, а по отношению к элементам левее его — меньше единицы. Отсюда, в свою очередь, следует, что концентрация любого из этих элементов (при возможности изоморфизма) в минералах, основными компонентами которых являются элементы, расположенные справа от него, с увеличением пересыщения растворов должна уменьшаться ( $K > 1$ ), а слева — увеличиваться ( $K < 1$ ). Например, в сфалеритах при увеличении пересыщения растворов содержание Fe должно уменьшаться, а содержание Hg увеличиваться, поскольку Zn (элемент-хозяин) относительно Fe находится справа, а относительно Hg — слева. В галенитах аналогичным образом должны вести себя Bi и Sb, а в самородном золоте — Cu и Ag. В то же время поведение Cu в пиритах по сравнению с самородным золотом должно быть противоположным, так как Cu расположена относительно Au слева, а относительно Fe — справа, т.е. коэффициент распределения Cu по отношению к Au больше единицы, а по отношению к Fe меньше единицы. Эти логические выводы проверены на фактическом материале — противоречий нет.

3. Автором установлена следующая эмпирическая зависимость [Самусиков, Петрова, 1983]. Если собственные минералы элемента-примеси кристаллизуются раньше минерала, в котором он присутствует в роли примеси, то  $K$  этого элемента в данном минерале больше единицы, если позже — меньше единицы. Например, в сфалерите  $K$  для пары Fe-Zn больше единицы (пирит кристаллизуется раньше сфалерита), а для пары Hg-Zn меньше единицы (киноварь кристаллизуется позже сфалерита).

### ФАКТИЧЕСКИЙ МАТЕРИАЛ

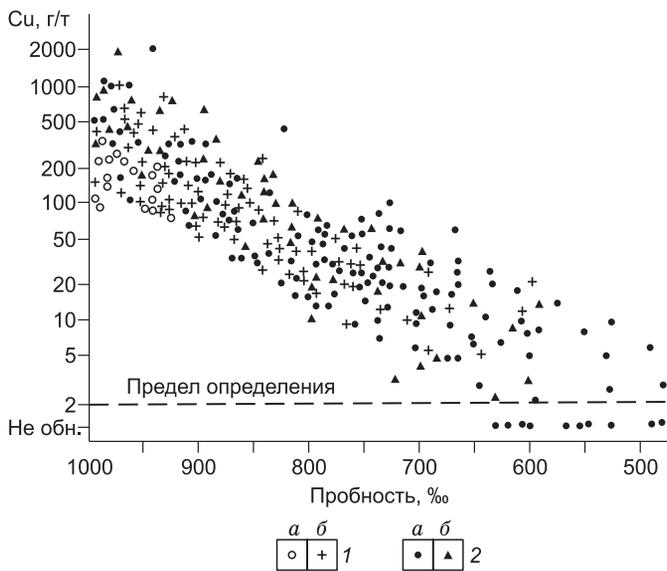
В свете вышеизложенного проанализированы (по личным и литературным данным) основные минералы золоторудных месторождений (самородное золото, пирит, сфалерит, галенит, блеклые руды и др.): 1) в зависимости от глубины формирования месторождений от палеоповерхности (глубинные — малоглубинные); 2) в вертикальном разрезе отдельных месторождений (по падению — восстанию рудных тел); 3) по стадиям минерализации; 4) в пределах отдельных выделений с зональным строением. Первые два направления позволяют выявить пространственные закономерности эволюции гидротермальных растворов в процессе рудоотложения, а последние — временные.

В связи с ограниченным объемом статьи приводится фактический материал лишь по самородному золоту. Общие сведения о химическом составе самородного золота и характеристика основных элементов-примесей в нем (Ag, Cu, Fe, Pb, Sb, As, Hg, Bi и др.) приведены в монографии Н.В. Петровской [1973]. В более поздней ее работе [Петровская, 1980] детально рассмотрен вопрос о состоянии изученности самородного золота в различных аспектах (химический состав, морфология, микроструктура и др.). При этом отмечается недостаточное внимание исследователей к элементам-примесям в золоте.

Основным примесным элементом в самородном золоте является Ag. Многочисленные литературные данные свидетельствуют, что содержание его в золоте с уменьшением глубины формирования месторождений увеличивается. «Максимально высокую пробу золото имеет в рудных телах, сформированных на больших глубинах, а минимальную — в близповерхностных месторождениях. Эта закономерность известна уже давно... и подтверждается новыми данными..., однако ее причины все еще недостаточно расшифрованы» [Петровская, 1973, с. 95]. В близповерхностных месторождениях проба золота, в среднем, как правило, не более 750 ‰, а в глубинных — свыше 900 ‰. При этом диапазон колебаний пробы золота в глубинных месторождениях составляет первые десятки единиц, а в малоглубинных — сотни единиц. Примечательно, что по мере перехода от глубинных месторождений к малоглубинным увеличивается роль дендритных выделений золота. «В рудах, сформировавшихся на относительно больших глубинах подобные образования отсутствуют. В среднеглубинных месторождениях они встречаются относительно редко..., распространенность дендритных выделений золота резко возрастает с переходом от среднеглубинных к малоглубинным месторождениям» [Петровская, 1973, с. 142]. Этот факт является прямым свидетельством увеличения степени пересыщения растворов с уменьшением глубины рудоотложения, поскольку дендритная кристаллизация характерна для растворов с высоким пересыщением [Современная кристаллография, 1979].

Одновременно с увеличением серебрости золота (т.е. с уменьшением его пробы) в нем увеличивается содержание Sb и уменьшается содержание Cu. Фактический материал по этому вопросу имеется в работе И.П. Ланцева с соавторами [1971], проанализировавших количественным спектральным методом золото из многих месторождений России и зарубежных стран. В месторождениях больших глубин Sb в золоте не обнаружена (при чувствительности анализов 0.002 ‰). В месторождениях средних глубин частота встречаемости ее составляет 52 % при среднем содержании в большинстве проб 0.003—0.01 ‰. В близповерхностных месторождениях частота встречаемости 62 %, преобладающие содержания 0.006—0.04 ‰ (до 0.2 ‰).

Для Cu приводятся следующие цифры: глубинные месторождения — частота встречаемости 100 %, преобладающие содержания около 0.03 ‰; среднеглубинные — частота встречаемости 82 %, преобладающие содержания 0.006—0.01 ‰, близповерхностные — частота встречаемости 85 %, преобладающие содержания 0.01—0.2 ‰. По поводу повышенных содержаний Cu в золоте близповерхностных месторождений авторы указывают: «...не исключено, что это объясняется геохимическими особенностями регионов, для которых характерно развитие медной минерализации» [Ланцев и др., 1971, с. 135]. Иными словами, это результат повышенной концентрации Cu в растворах (влияние  $C_{ж}$ ). Учитывая вышеприведенное замечание авторов, нами проанализированы на Cu (по методике И.П. Ланцева) образцы золота из некоторых близповерхностных месторождений Северо-Востока и Дальнего Востока России. Получены следующие результаты (в скобках проба золота (‰) изученных образцов): Сопка Рудная — 0.0025—0.0035 ‰ (665—710); Агатовское — 0.0005—0.0015 ‰ (583—597); Юхонджа — 0.0015—0.0032 ‰ (583—627); Бухтянка — 0.0010—0.0016 ‰ (614—660); Аметистовое — 0.0006 ‰ (550—600). Судя по этим данным, содержание Cu в золоте близповерхностных месторождений малосульфидной золото-кварцевой формации составляет порядка 0.001—0.003 ‰ (10—30 г/т). Для сравнения отметим, что на месторождении Колар (Индия), которое является одним из наиболее глубинных золоторудных месторождений в мире



**Рис. 1. Зависимость содержаний меди в самородном золоте от его пробыности.**

1 — рудные проявления (а — золото-сурьмяные, б — золото-кварцевые), 2 — россыпные проявления (а — золото-кварцевые, б — золото-редкометалльные).

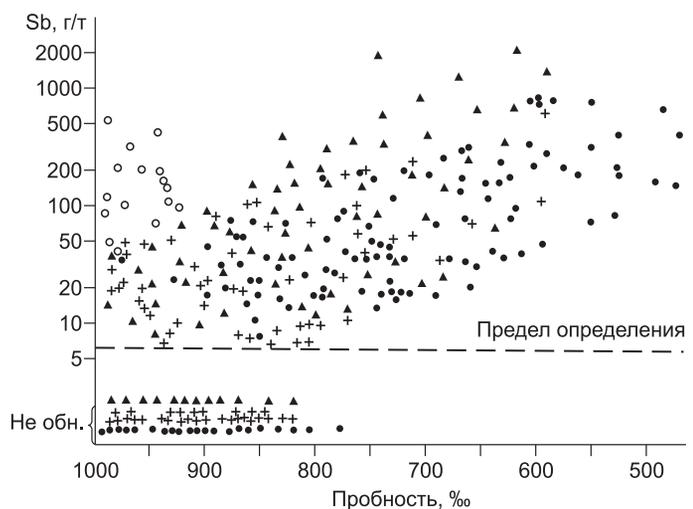
(разработка ведется уже на глубине >3.5 км и срез оценивается порядка 5—6 км), содержание Cu в золоте 0.12—0.18 ‰, проба золота 935—943 [Генкин и др., 1984].

Отчетливая статистическая связь содержаний Ag, Cu и Sb в золоте установлена нами на месторождениях Верхояно-Колымского региона [Самусиков, 1981; Самусиков, Петрова, 1983]. В золоте с пробой, близкой к 1000 ‰, содержание Cu в среднем около 500 г/т, Sb — первые г/т, при пробыности порядка 500 ‰ содержание Cu первые г/т, а содержание Sb в

среднем около 500 г/т (рис. 1, 2). Каждый анализ выполнялся из отдельной золотины с предварительной обработкой золотин в HF (1—2 ч) и разбавленных (1:1) HCl и HNO<sub>3</sub> (15—20 мин) с нагревом на водяной бане для удаления включений посторонних минералов. Проба золотин определялась микрозондовым методом, а элементы-примеси по методике И.П. Ланцева [1971]. Характерно, что в золоте месторождений золото-сурьмяной формации содержание Sb в несколько раз больше, чем в образцах из месторождений золото-кварцевой формации (влияние C<sub>ж</sub>).

Изменение содержаний Cu в пиритах по сравнению с самородным золотом противоположное. По данным М.И. Новгородовой с соавторами [1980], проанализировавших образцы из многих золоторудных месторождений, среднее содержание Cu в пиритах глубинной формации — 190 г/т, среднеглубинной — 340, малоглубинной — 1460. Частота встречаемости — 100 %.

Изоморфными элементами в самородном золоте считаются также Hg, Co и Ni. Публикации, в которых приводятся сведения о ртути в самородном золоте исчисляются многими десятками. Назовем некоторые из них: [Петровская, 1973; Самусиков, Сергеенко, 1974; Моисеенко, 1977; Назьмова, Спиридонов, 1979; Мурзин и др., 1981; Кузнецов и др., 1982; Сандомирская и др., 1983; Озерова, 1986; Васильев, 1991; Спиридонов, 1991; Амузинский и др., 1992; Росляков и др., 1995; Васильев, 2004; Наумов и др., 2005; Борисенко и др., 2006; и др.]. Содержание ртути в самородном золоте месторождений золото-кварцевых формаций в основном сотые и десятые доли процента, в золоте месторождений золото-ртутных формаций до 26 %. Впервые самородное золото с высоким содержанием ртути (12 %) обнаружено автором на золото-сурьмяно-ртутном месторождении Кючюс (Якутия) в 1974 г. [Самусиков, Сергеенко, 1974]. (В монографии Н.В. Петровской [1973] содержание ртути в самородном золоте оценивалось 0.00*n*—0.*n* ‰). Сведений о наличии Hg в золоте глубинных месторождений обнаружить в литературе нам не удалось. По-видимому, она не характерна для таких месторождений. Этот факт, в частности, отмечается в монографии Н.В. Петровской — «характерно отсутствие Hg в высокопробном золоте из метаморфизованных руд формации больших глубин» [Петровская, 1973, с. 103]. По данным Н. А. Озеровой и др. [1980], в среднеглубинных месторождениях Яно-Колымского пояса содержание Hg в золоте в среднем 190 г/т, а в близповерхностных золото-серебряных месторождениях соседнего с ним Охотско-Чукотского пояса — 760 г/т. В некоторых публикациях для близповерхностных месторождений этого региона приводятся и более высокие содержания: Сопка Рудная — до 0.5 % [Си-



**Рис. 2. Зависимость содержаний сурьмы в самородном золоте от его пробыности.**

Усл. обозн. см. на рис. 1.

**Рис. 3. Зависимость содержаний ртути в самородном золоте от его пробыности (золото-кварцевая формация).**

1 — образцы из рудных проявлений; 2 — образцы из россыпных проявлений.

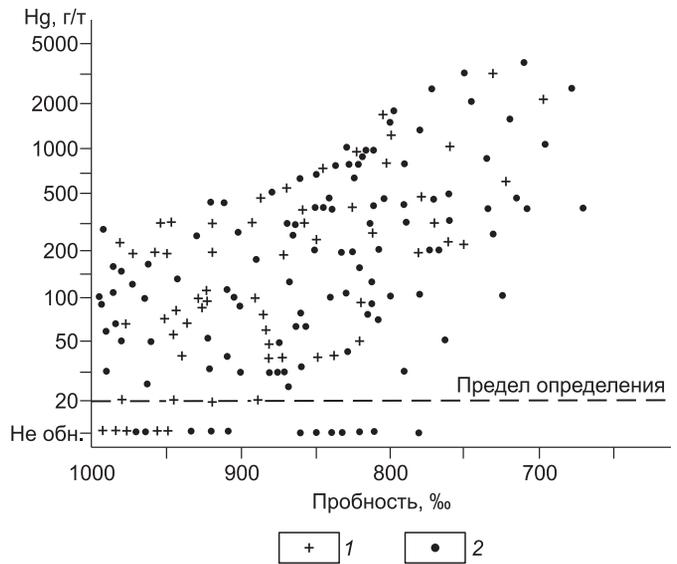
доров, 1966], Кубака — до 1.48 % [Степанов, Шишакова, 1994], Карамкен — до 1.2 % [Некрасова, 1980].

Ранее, исходя из теоретических соображений, автором был сделан вывод, что поведение Hg в золоте должно быть похожим на поведение сурьмы [Самусиков, Петрова, 1983]. Для проверки этого вывода были выполнены более сотни химических анализов из образцов рудных и россыпных месторождений Яно-Колымского пояса (ИГАиБМ СО РАН, Якутск, аналитик Л.Н. Цабул, методика Н.Х. Айдинян). Как видно из рис. 3, в образцах с содержанием Ag первые проценты содержание Hg в среднем около 50 г/т (с колебаниями от 0 до 200 г/т), при содержании Ag порядка 30 % содержание Hg в среднем около 2000 г/т (от 500 до 3000 г/т). Изучение литературных данных показывает, что аналогичная взаимосвязь Ag и Hg в золоте наблюдается и в других регионах. Например, в работе В.Г. Моисеенко [1977] для некоторых месторождений Приамурья приводятся следующие цифры: Золотая Гора — проба 973 ‰, Hg — 3 г/т; Октябрьское — 970 и 60; Кировское — 945 и 80; Афанасьевское — 880 и 830; Сагурское — 770 и 1110; Токур — 745 и 1503; Ясенское — 740 и 1100. Положительная корреляция этих элементов в золоте месторождений Кузнецкого Алатау отмечается в работе Л. К. Павловой [1993], для месторождений Урала в статье В.В. Мурзина с соавторами [1981]. С учетом этих данных можно говорить об общей закономерности концентрации Hg в самородном золоте. Поскольку Hg может образовывать твердые растворы и с Au, и с Ag, можно сделать вывод, что ее корреляция с Ag в самородном золоте обусловлена не кристаллохимическими, а геохимическими факторами (сопряженная эволюция этих элементов во времени и пространстве).

Следует отметить, что на месторождениях золото-ртутных формаций с повышенным содержанием ртути в золоте корреляция содержаний в паре Ag-Hg нарушается. Примером может служить месторождение Кючюс, где в золотилах с одинаковым содержанием Ag содержание Hg колеблется от 0.1 до 20 % [Озерова, 1986; Амузинский и др., 1992]. По-видимому, здесь Hg присутствует не только в виде изоморфной примеси. Возможно, что при высоких содержаниях Hg образуются ультрамикровключения интерметаллических соединений ртути с золотом или серебром. При микронзондовом изучении нередко в двух смежных точках содержание ртути различается в несколько раз, а в пределах отдельно взятого зерна варьирует от 0.1 до 15 % (микромозаичная неоднородность).

Кобальт и никель — это редкие элементы в золоте гидротермальных месторождений. Количественных данных для сравнения их содержаний в месторождениях разных глубин в литературе нами не обнаружено. По частоте встречаемости они считаются типоморфными для месторождений повышенной глубинности [Петровская, 1973]. По данным В.Г. Моисеенко, эти элементы положительно коррелируются между собой, а также с Au и Cu. «При прочих равных условиях с ростом пробы золота возрастает содержание в золотилах меди, висмута, никеля и кобальта» [Моисеенко, 1977, с. 166].

Интересные данные приведены в статье И.Я. Некрасова с соавторами [1988], в которой описано золото из кимберлитовой тр. Мир. В золотилах с содержанием Ag первые % содержание Ni в среднем 0.41—0.54 %, при содержании Ag 12—15 % содержание Ni — 0.17 %, а при содержании Ag 24—25 % никель не обнаружен. Таким же образом ведет себя и медь в этих образцах: в первой группе ее содержание 0.25—0.41 %, во второй — 0.1 %, в третьей — не обнаружена. Авторы указанной статьи считают, что это золото не гидротермальное, а магматогенное. «Очевидно, что в кимберлитовой магме золото и сопутствующие металлы находились в “капельно-жидком” состоянии. Кристаллизация расплава таких “капель” происходила в неравновесных условиях на фоне резкого падения температуры» [Некрасов и др., 1988, с. 1212]. Логически эти данные позволяют говорить об аналогии в поведении примесных элементов при кристаллизации золота из магматического расплава и из гидротермальных растворов. По-видимому, и факторы, определяющие их поведение, одни и те же — изменение степени пересыщения растворов (переохлаждения расплавов) в процессе рудоотложения. Можно предположить, что эти закономерности имеют место и при кристаллизации других минералов магматогенного происхождения.



Из приведенных данных следует, что коэффициенты распределения Ni, Co, Cu по отношению к Au должны быть больше единицы, а для Ag, Sb, Hg — меньше единицы. Такой же вывод можно сделать, исходя из расположения этих элементов в ряду последовательности выделения минералов из растворов: Ni, Co и Cu расположены слева от Au (элемент-хозяин), а Ag, Sb, Hg — справа. На более высокую растворимость исходных соединений Ag, Sb, Hg (относительно Au) в гидротермальных растворах указывает и тот факт, что в вертикальном ряду эндогенной геохимической зональности в золоторудных месторождениях они относятся к элементам надрудной зоны. В отношении Ag имеются и прямые доказательства его лучшей растворимости в гидротермальных растворах по сравнению с золотом — содержание Ag в газо-жидких включениях золотоносного кварца в десятки раз превышает содержание Au [Андрусенко, 1980; Баранова и др., 1980].

Особенности поведения элементов-примесей в золоте в пределах отдельных месторождений в их вертикальном разрезе практически не изучены; имеются лишь некоторые данные об изменении пробности. В подавляющем большинстве месторождений, отработанных на значительную глубину, установлено, что средняя проба золота по падению рудных тел увеличивается, но в ряде месторождений наблюдается обратная картина, а в некоторых она меняется волнообразно [Петровская, 1973; Нарсеев, 1973; Моисеенко, 1977]. Приведем несколько примеров, которые нам удалось обнаружить в литературе, где наряду с пробностью приводятся сведения и о других элементах-примесях в золоте. В работе В.Г. Моисеенко [1977] при характеристике одного из детально разведанных месторождений Верхнеселемджинского района (Приамурье) отмечается, что золото на нижнем горизонте по сравнению с верхним отличается более высокой пробой, повышенным содержанием Cu и пониженным Sb. В работе Н.М. Давиденко [1970] по одному из месторождений Западной Чукотки приводятся следующие данные: верхний горизонт — содержание Ag в золоте 16.4 %, Cu — 0.003 %; нижний — соответственно 11.1 и 0.02 %. Одновременно отмечается, что на верхних горизонтах «обильны дендриты», а на нижних — золото «комковидное, грубопластинчатое, зернистое» (с. 106).

Интересный пример поведения Cu приведен в статье Г.Н. Гамянина [1993], в которой одновременно даны сведения по золоту и пириту на трех гипсометрических уровнях (Восточная Якутия, месторождение Кысылга). Уровень 820 м — содержание (г/т) Cu в золоте 11, в пирите — 1830; уровень 700 м — в золоте 30, в пирите — 1270; уровень 570 м — в золоте 74, в пирите — 1010 (в золоте содержание Cu с глубиной увеличивается, в пирите — уменьшается). В другой работе Г.Н. Гамянина [2001] приведены анализы золота с двух эксплуатационных горизонтов месторождения Игуменовское (Яно-Колымский пояс). Проба золота с глубиной увеличивается — 762 и 860 ‰, одновременно увеличивается и содержание Cu — 41 и 81 г/т. Содержание Sb и Hg — уменьшается: Sb — 67 и 21 г/т, Hg — 225 и 124 г/т (рис. 4).

В работе А.А. Сидорова [1966] по золото-серебряным месторождениям Охотско-Чукотского пояса указывается, что золото глубоко эродированных рудопроявлений является более высокопробным и содержит больше Cu, чем в слабо эродированных. Одним из примеров этого является месторождение Промежуточное [Волков, Сидоров, 2001]. Месторождение тектонически расчленено на два блока, в результате чего рудные тела в северном блоке срезаны глубже, чем в южном. В южном блоке (жила № 8) проба золота 670—740 (средняя 714 ‰), содержание Cu — 7, Sb — 60 г/т; в северном блоке (жила № 1) проба золота увеличивается до 900 ‰, содержание Cu увеличивается до 300 г/т, а содержание Sb уменьшается до 6 г/т.

Аналогичные данные приводятся в работе В.Г. Дзасохова [1987] для двух смежных рудных полей с разной глубиной эрозионного среза (район не указан). В рудных телах слабо эродированного рудного поля проба золота (‰) 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 одном из рудных участков Нагольного Кряжа (Донбасс) содержание Hg в золотилах до глубины 600 м колеблется от 1.5 до 2.5 %, в интервале глубин 1070—1820 м в среднем 0.69 %, а на глубине 2705—3290 м — 0.07 %. К сожалению, проба золота по выделенным интервалам не указана, а в целом она колеблется от 551 до 962 ‰ [Кузнецов и др., 1982]. Поскольку в этом районе имеются ртутные проявления

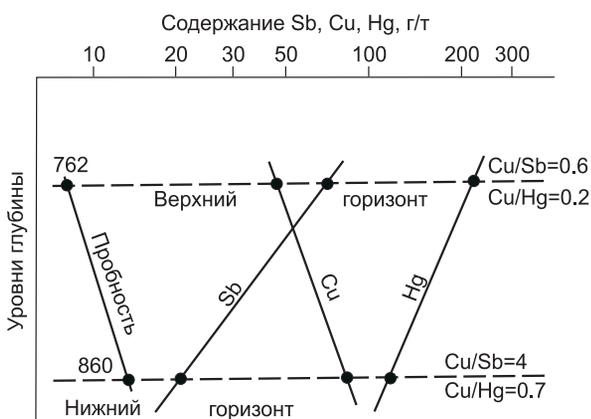


Рис. 4. Изменение состава золота с глубиной на месторождении Игуменовское (анализы Г.Н. Гамянина).

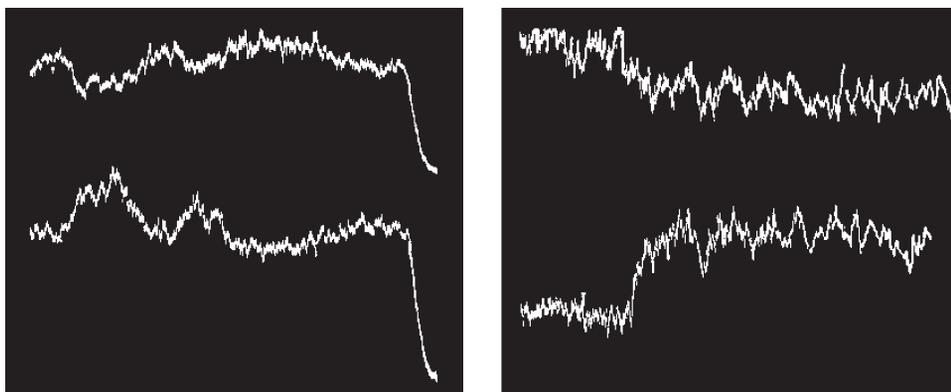
ния, высокое содержание Hg в золоте можно объяснить изначально повышенной ее концентрацией в гидротермальных растворах (влияние  $C_{ж}$ ).

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). Аналогичные сведения приводятся в работе С.А. Ананьева и др. [1991] для Саралинского месторождения (Южная Сибирь). В поверхностных горных выработках проба золота 660 ‰, содержание Hg — 0.36 %; на 16 горизонте соответственно — 770—800 ‰ и 0.02—0.03 %; на 22 горизонте — 750 ‰ и 0.09 %.

Удовлетворительного объяснения причин всех этих видов зональности пока нет. Относительно пробности золота обычно высказывается предположение об изменении концентрации Ag в растворах в процессе рудоотложения. По мнению автора, основным фактором является изменение пересыщения растворов в процессе их перемещения в пространстве. Первый тип зонального изменения пробности (уменьшение к верхним горизонтам) связан с увеличением пересыщения растворов в направлении их движения (см. вывод III в разделе «Теоретические предпосылки»). Прямым подтверждением этого является увеличение роли дендритных выделений в головках рудных тел [Петровская, 1973]. Второй тип (увеличение пробы к верхним горизонтам) может быть вызван либо уменьшением пересыщения растворов, либо уменьшением концентрации Ag в растворах. Последнее вполне возможно на месторождениях с повышенным содержанием сульфидов, обладающих большой изоморфной емкостью в отношении Ag и выпадающих из растворов раньше золота (галенит, блеклые руды, сульфосоли висмута). Для третьего типа (волновая зональность) наиболее вероятно изменение знака пересыщения по вертикали (увеличение  $\rightleftharpoons$  уменьшение). Для однозначного ответа в каждом конкретном случае необходимо выяснить поведение других элементов-примесей в золоте. Например, на Старо-Берикульском месторождении, поскольку одновременно с изменением концентрации Ag в золоте синхронно меняется и концентрация Hg, можно считать, что эти изменения вызваны переменной знака пересыщения растворов (от нижнерудных горизонтов к среднерудным пересыщение уменьшалось, а далее вверх — увеличивалось). Не исключено, что в ряде случаев месторождения с уменьшением пробы золота с глубиной — это лишь фрагменты более крупных месторождений с волновой зональностью.

На месторождениях с несколькими продуктивными стадиями, как показывает анализ литературы, 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. Например, по данным Л.Н. Шишаковой [1981] на одном из близповерхностных месторождений Охотско-Чукотского пояса (оруденение третичного возраста) золото первой продуктивной стадии (золото I) имеет пробу в среднем 650; золото II — 600; золото III — с первой минеральной ассоциацией — 549, со второй — 535, с третьей — 470; золото IV — с ранней минеральной ассоциацией — 475, с поздней — от 450 до 240 ‰.

Одновременно с понижением пробности золота в поздних генерациях наблюдается увеличение содержаний Sb и Hg и уменьшение — Cu. Например, по данным А.Ф. Коробейникова и А.Д. Микова [1983], на месторождениях Алтае-Саянской зоны и Забайкалья в золотилах первой генерации содержание Cu в среднем в 2.5 раза больше, а Sb в 3 раза меньше, чем в золотилах второй генерации. В работе В.Г. Моисеенко [1977, с. 147] при описании месторождений Верхнего Приамурья указывается, что «в самородном золоте от первой к третьей генерации увеличивается содержание не только серебра, но также ртути и сурьмы». Цифровые данные по одному из месторождений этого района приведены в статье В.П. Новикова [1986]: золото I — проба 680—750 ‰ (примеси не определялись); золото II — проба 625—735, Sb — 20 г/т, Cu — 7 г/т; золото III — проба 595—670, Sb — 100 г/т, Cu — не обнаружена. Об увеличении Hg в поздних генерациях золота имеются указания в статьях [Озерова и др., 1980; Петровская, 1980], причем это характерно для месторождений разных формаций. В упоминавшейся выше статье по Старо-Берикульскому месторождению [Широких и др., 2000] приводятся следующие данные о пробности и содержании Hg в золоте для четырех генераций (среднее значение от ранних к поздним): пробы — 957, 754, 722, 673 ‰, содержание Hg соответственно <0.1, 0.12, 0.14, 0.18 % (золото-кварцевая формация). В статье Г.В. Ломакиной [1984] при описании одного из месторождений золото-редкометалльной формации в горах Тянь-Шаня приводятся следующие сведения для трех генераций золота: золото I — проба 914—1000 ‰ (средняя 965), содержание Hg — 0.11 %; золото II — проба 805—980 (средняя 832), содержание Hg — 0.16 %; золото III — проба 500—740 (средняя 643), содержание Hg — 0.24 %. При этом отмечается, что с глубиной средняя проба золота увеличивается. В статье Я.В. Яковлева и Л.И. Соловьева [1992] приводится характеристика золота из оловорудных месторождений — картина по генерациям та же. Месторождение Алысхайское: золото I — проба 752—774, Hg — 0.2—0.4 %; золото II — проба 560—575, Hg — 1.3—1.5 %.



**Рис. 5. Распределение содержаний золота (верхний профиль) и серебра (нижний) в разрезе низкопробных золотин.**

Все эти данные согласуются с выводом III или, иначе говоря, в большинстве случаев степень пересыщения растворов в процессе рудоотложения от ранних стадий к поздним возрастает. Весьма показательно, что от ранних продуктивных ассоциаций к поздним возрастает и роль дендритных выделений золота [Петровская, 1973].

Одной из характерных особенностей близповерхностных месторождений, в отличие от более глубинных, является широкое развитие низкопробных золотин с зональным строением. Изменение содержания Ag в разрезе таких золотин иногда плавное, иногда резкое; в одних случаях обогащены Ag краевые зоны (наиболее распространенный вариант), в других — центральные, в третьих наблюдается чередование обогащенных и обедненных зон (рис. 5). Общий диапазон колебаний концентраций Ag в таких золотинах достигает 20—30 %. Кроме этих уже известных фактов, нами установлено, что при наличии Hg в таких золотинах ее распределение по зонам отчетливо коррелируется с содержанием Ag (больше Ag — больше Hg). Примеры (месторождение Имтачан, Восточная Якутия): 1) в центре золотины Ag — 38.4 %, Hg — 0.11 %; в промежуточной зоне Ag — 42.0 %, Hg — 0.19 %; в краевой зоне Ag — 51.3 %, Hg — 0.38 %; 2) в центре Ag — 64.9 %, Hg — 0.28 %; в промежуточной Ag — 30.0 %, Hg — 0.13 %; в краевой Ag — 25.9 %, Hg < 0.1 %; 3) в центре Ag — 33.0 %, Hg — 0.63 %; край Ag — 25.5 %; Hg — 0.31 %; противоположный край Ag — 22.5 %, Hg — 0.28 %. Зональных золотин с повышенным содержанием Sb и Cu (достаточных для микрозондовых анализов, т.е. >0.1 %) в изученных нами месторождениях обнаружить не удалось. Приведенные факты, с точки зрения автора, обусловлены колебаниями степени пересыщения растворов в процессе роста таких золотин. При общей тенденции увеличения пересыщения от ранних стадий рудоотложения к поздним происходили кратковременные пульсационные изменения пересыщения в ту или другую сторону. Это предположение представляется автору более логичным, чем изменение концентраций Ag в растворах (к чему склоняются многие исследователи), поскольку термодинамические условия при близповерхностном рудообразовании являются крайне нестабильными. Свидетельством этого служат признаки неоднократного вскипания растворов в процессе рудоотложения и большие перепады температуры и давления.

#### **ОБСУЖДЕНИЕ ФАКТИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛА**

Предлагаемая точка зрения не противоречит существующим представлениям о ведущей роли в рудном процессе таких факторов, как температура, давление, pH и Eh растворов, так как пересыщение — это не причина изменений физико-химических параметров гидротермальной системы, а следствие этих изменений. Главная роль в создании конкретной обстановки рудоотложения, безусловно, принадлежит этим факторам, но действуют они через пересыщение растворов, поскольку без пересыщения кристаллизация вообще невозможна. При этом решающее значение для создания той или иной степени пересыщения, по мнению автора, имеют не абсолютные величины этих факторов, а скорость их изменения во времени и пространстве — чем больше градиент этих изменений, тем сильнее меняется пересыщение. При таком подходе становится понятным, например, отсутствие прямой зависимости между температурой отложения минералов и содержанием в них элементов-примесей. Выше было показано, что состав и содержание последних в одних и тех же минералах разноглубинных месторождений заметно различаются между собой, в то же время по современным данным температурный диапазон отложения продуктивных стадий на всех золоторудных месторождениях примерно одинаковый — «главные продуктивные ассоциации золотых руд на всех глубинах возникали в удивительно сходных температурных условиях — 150—220°» [Петровская, 1973, с. 27].

Хорошо объясняются с этих позиций и некоторые другие специфические черты разноглубинных месторождений. Глубина рудообразования сама по себе не определяет степени пересыщения растворов, но она обуславливает ту или иную степень структурной «открытости—закрытости» гидротермальной системы, а от этого фактора зависит режим изменения физико-химических параметров растворов в процессе рудоотложения. На относительно больших глубинах рудоотложение идет практически в закрытой системе с очень медленным изменением всех параметров растворов, в связи с чем они не могут достичь значительного пересыщения. Скорость возникновения центров кристаллизации и линейная скорость их роста при слабом пересыщении минимальны [Самусиков, 1975], поэтому процесс рудоотложения растянут во времени. Следствием этого является большой размах интервала оруденения по глубине в месторождениях этой формации (2—3 км и более) и сравнительно равномерное, но низкое среднее содержание золота во всем этом интервале (обычно до 10, редко 20—30 г/т). Незначительный градиент изменения термодинамических параметров растворов в направлении их движения является причиной слабо выраженной вертикальной зональности этих месторождений. По этой же причине абсолютное значение  $K$  в процессе рудоотложения не может меняться в широких пределах, поэтому концентрация элементов-примесей в минералах зависит в основном от их концентрации в растворах ( $C_{ж}$ ). Этим можно объяснить общеизвестный факт уменьшения дисперсии пробы золота с увеличением глубины формирования месторождений. Поскольку  $K$  в системе Au—Ag меньше единицы, а в системе Au—Cu больше единицы, кристаллизуется золото с пониженным (относительно малоглубинных месторождений) содержанием Ag, но с повышенным содержанием Cu (см. вывод I в разделе «Теоретические предпосылки»).

С приближением уровня рудоотложения к палеоповерхности структурная «открытость» гидротермальных систем в целом, несомненно, увеличивается и соответственно увеличиваются возможности для более быстрого изменения термодинамических параметров растворов. Однако в связи с тем, что зависимость пересыщения от глубины является не прямой, а опосредованной, реализация этих возможностей в том или ином рудном узле будет зависеть от его конкретных геолого-тектонических особенностей, поэтому месторождения, сформировавшиеся примерно на одной глубине, могут существенно различаться между собой. Этим можно объяснить большое разнообразие среднеглубинных золоторудных месторождений по масштабности оруденения, минеральному составу, концентрации полезного компонента и его параметрам (морфологии, гранулометрии, пробыности). При этом структурная «открытость» верхних зон месторождений в целом должна быть больше в сравнении с нижнерудными зонами. Это обеспечивает появление различных видов зональности данной группы месторождений, в том числе и изменение химического состава отдельных минералов. При стадийном рудоотложении «открытость» месторождений от ранних стадий к поздним должна возрастать, поскольку отделение стадий друг от друга обусловлено проявлением внутрирудных тектонических подвижек.

Наиболее благоприятные условия для быстрого изменения термодинамических параметров растворов создаются при близповерхностном рудообразовании. При этом основным фактором, регулирующим контрастность их изменений, по-видимому, служит давление, поскольку оно наиболее чутко реагирует на все изменения тектонического режима в период рудоотложения. Колебания давления, несомненно, будут сказываться и на других параметрах гидротермальной системы. Например, резкий спад давления при раскрытии трещин вызовет вскипание растворов и отделение летучей фазы, а эти процессы повлекут за собой изменение pH и Eh растворов, уменьшение их температуры и увеличение относительной концентрации нелетучих компонентов. Все это приведет к резкому нарушению равновесия в гидротермальной системе и вызовет быстрый распад исходных комплексных соединений рудогенных элементов, в результате чего произойдет скачкообразное увеличение степени пересыщения растворов. По-видимому, в такие моменты и образуются «бонанцевые» скопления золота с аномально высокими его содержаниями (десятки кг/т), так как при сильном пересыщении происходит массовое возникновение центров кристаллизации [Самусиков, 1975]. Быстрое изменение термодинамических параметров растворов обуславливает почти одновременное пересыщение и, соответственно, близкоодновременную кристаллизацию многих минералов, что является характерной чертой рассматриваемых месторождений. Если при этом учесть обилие центров кристаллизации, образующиеся руды, естественно, должны быть мелкозернистыми. Колломорфно-зональное строение руд можно объяснить пульсационным изменением степени пересыщения растворов в процессе рудоотложения. Причиной этого, по всей вероятности, является пульсирующий режим тектонических движений. По данным ряда исследователей [Ляхов, 1968; Сидоров, 1973], вертикальный температурный градиент охлаждения рудоносных растворов в близповерхностных золоторудных месторождениях составляет в среднем около 20 °C на 100 м, а общий температурный диапазон отложения продуктивных стадий, как указывалось выше, примерно 100 °C; следовательно, возможная протяженность промышленного оруденения на глубину составляет порядка 500 м, учитывая эрозионный срез, реально получаем первые сотни метров. Эти цифры хорошо согласуются с данными эксплуатации многих месторождений этого типа. Большинство из них обрабатывались только до глубины 200—300 м, единичные до 500 м.

## ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗНАЧЕНИЕ

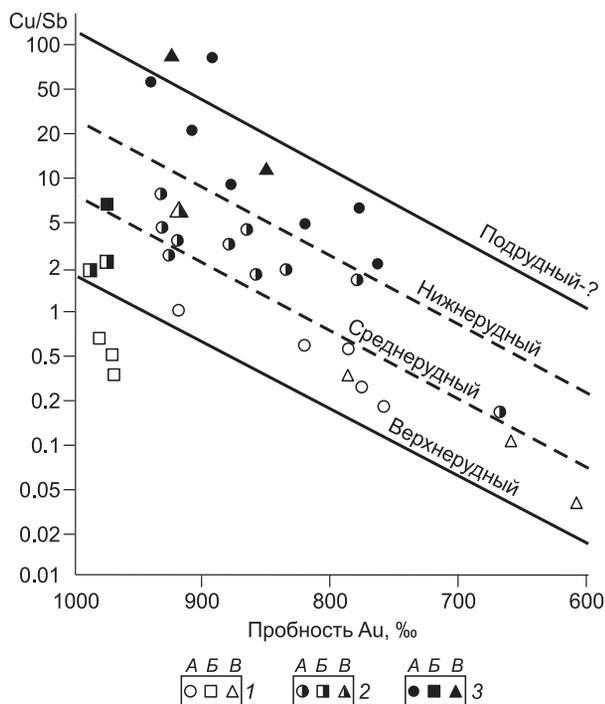
В пределах Северо-Востока России известны сотни рудопоявлений золота, но перспективы большинства из них не ясны из-за слабой изученности. Учитывая высокую стоимость разведочных работ, необходима их предварительная разбровка по степени перспективности с использованием малозатратных методов оценки. При этом одной из важнейших задач является определение уровня эрозионного среза. Решается эта задача путем изучения различных видов эндогенной зональности месторождений (геохимической, минералогической, структурно-морфологической и т.д.). Однако эти виды зональности на золоторудных месторождениях не всегда проявлены четко, поэтому оценка уровня среза бывает затруднительной. Существенную помощь в этом плане может оказать выявление «скрытой» минералогеохимической зональности отдельных минералов. В самородном золоте автор предлагает использовать для этой цели отношение содержаний Cu и Sb. Для определения представительности средних данных по месторождениям для некоторых из них были выполнены по 20—30 анализов. Расчеты средних для Sb и Cu при группировке анализов в различных комбинациях с разным числом в выборке показали, что при большом разбросе пробности (первые десятки единиц) выборки по 5 анализов имеют удовлетворительную сходимость (отклонения от общего среднего для Cu в основном  $\pm 10$ —15, для Sb  $\pm 20$ —30 %).

Поскольку содержание Cu и Sb зависит от содержаний серебра (проба золота), необходимо все эти три элемента рассматривать совместно во взаимосвязи друг с другом. Это можно сделать графически — по одной оси откладывать значения пробности золота, а по другой — коэффициент отношения Cu/Sb. Для примера на рис. 6 показано распределение некоторых детально разведанных (либо тематически хорошо изученных) месторождений Якутии и Магаданской области с различным уровнем эрозионного среза. Цифровые данные приведены в таблице. Как видно из рис. 6, месторождения с различным уровнем среза занимают разные области графика — слабо эродированные располагаются у нижней границы, средне эродированные — в центральной части, а глубоко эродированные — у верхней границы графика. Не вписываются в этот график золото-сурьмяные месторождения, что объясняется изначально повышенным содержанием Sb в золоте этих месторождений. 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 нужна своя цифровая шкала, но фактического материала пока недостаточно (разведаны лишь единичные месторождения). Для ориентировочной оценки (при использовании этого графика) можно предложить их коэффициент (Cu/Sb) увеличивать примерно в 5 раз.

Поскольку поведение Hg в золоте однотипно с поведением Sb (такая же взаимосвязь с пробностью и такой же характер изменения содержаний в вертикальном разрезе месторождений), она тоже может быть использована для оценки уровня эрозионного среза в виде коэффициентов Cu/Hg или Cu/Sb + Hg (см. рис. 4). Кстати, упоминавшиеся выше месторождения Сопка Рудная, Кубака и Карамкен с повышенным содержанием Hg в золоте по данным разведки и отработки оценены как слабо эродированные.

На рис. 1—3, наряду с данными по рудному золоту, нанесены данные и по россыпному золоту. Статистически заметной разницы между ними не наблюдается. Сравнительное изучение рудного и россыпного золота на ряде месторождений, где россыпи пространственно связаны с коренными источниками, показывает, что при переходе рудного золота в россыпь (в условиях Северо-Востока России) и его удалении от коренного источника на расстояние первых сотен метров заметных изменений пробности золота и содержаний Cu, Sb и Hg не происходит. Следовательно, по россыпному золоту можно оценить уровень эрозионного среза невыявленных коренных источников.

При изучении пиритов для характеристики зональности рудных тел нередко используют отношение содержаний Co/Ni. При таком сочетании эти



**Рис. 6. Распределение месторождений с различным уровнем эрозионного среза в зависимости от пробности и отношения содержаний меди и сурьмы в самородном золоте.**

Формации: А — золото-кварцевая, Б — золото-сурьмяная, С — золото-редкометалльная.  
Уровень среза: 1 — верхнерудный, 2 — среднерудный, 3 — нижнерудный.

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

Формационный тип м-ния	Уровень эрозион. среза	Название месторождения	Средняя проба золота	Cu	Sb	Cu/Sb	Кол-во анализов	Источник информации
Золото-кварцевые малосульфидные	Верхнерудный	Бадран	924	144	116	1.2	12	Данные автора
		Хангалас	819	33	82	0.4	10	[Гамянин, 2001]
		Нежданское	780	26	31	0.8	68	»
		Школьное	766	35	127	0.3	6	Данные автора
		Хаптагай-хая	760	17	96	0.2	8	»
	Среднерудный	Утинка	941	200	50	4	12	[Геология..., 1979]
		»	926	180	79	2.3	5	[Гамянин, 2001]
		Штурмовское	933	296	78	4	7	»
		»	918	400	50	8	7	[Геология..., 1979]
		Тихое	881	124	36	3.5	5	[Гамянин, 2001]
		Юглер	868	100	25	4	7	Данные автора
		Светлое	858	80	40	2	?	[Многофакторные..., 1992]
		Жданное	836	46	24	2	14	Данные автора
		Алешкино	828	45	25	2	38	[Гамянин, 2001]
	Нижнерудный	Наталка	780	26	31	0.8	4	Данные автора
		Якутское	660	14	55	0.3	8	»
		Мальдяк	930	300	4	75	11	[Геология..., 1979]
		Кокарин	917	155	7	22	8	Данные автора
Золотой рог		910	290	н/обн	>100	3	»	
Сана		894	110	9	12	8	»	
Золото-сурьмяные	Верхнерудный	Базовское	832	55	9	6	6	»
		Туора-Тас	770	54	7	8	7	»
		Власыч	770	80	30	2.7	2	[Геология..., 1979]
	Среднерудный	Малтан	990	102	165	0.6	6	Данные автора
		Сарылах	984	155	320	0.5	7	»
		Сентачан	976	75	242	0.3	6	»
		Тан	993	106	50	2	3	[Суплецов, Жданов, 1992]
		Луч	989	264	134	2	5	[Гамянин, 2001]
		Эль	983	560	90	6	2	[Суплецов, Жданов, 1992]
Золото-редкометалльные	Верхнерудный	Эргелях	785	67	203	0.3	4	[Гамянин, 2001]
		Дорожное	~650	50	300	0.17	3	[Геология, 1979]
		Тугучак	600	20	800	0.03	3	Данные автора
	Среднерудный	Ат-Юрях	925	500	90	5.5	2	Данные автора
	Нижнерудный	Дыбы	923	250	н/обн	>100	4	[Гамянин, 2001]

элементы малоинформативны, поскольку по отношению к Fe (элемент-хозяин пирита) у обоих элементов  $K > 1$ , т.е. изменения их содержаний в вертикальном разрезе месторождений являются однонаправленными. Зональность проявится гораздо контрастнее, если использовать отношения содержаний элементов с  $K > 1$  и  $K < 1$ , например  $(Co + Ni)/(Ag + Sb)$ . Учитывая, что Cu в пиритах и в самородном золоте ведет себя противоположно, отношения их содержаний тоже можно использовать при изучении зональности месторождений. Например, для месторождения Кысылга, данные по которому приведены в тексте, коэффициент отношения содержания Cu в пирите к содержанию Cu в золоте имеет следующие значения: горизонт 820 м — 166, горизонт 700 м — 42, горизонт 570 м — 14.

Изучение особенностей поведения элементов-примесей в блеклых рудах [Самусиков, 1993] позволяет рекомендовать для выявления «скрытой» минералого-геохимической зональности рудных тел использовать отношения содержаний  $(Cu + As)/(Ag + Sb)$  (содержания Ag и Sb при увеличении СПР будут увеличиваться, а Cu и As — уменьшаться).

В сфалеритах для этой цели можно использовать отношение содержаний индий — галлий: содержание индия с глубиной увеличивается, содержание галлия — уменьшается (коэффициент распределения в паре In—Zn больше единицы, в паре Ga—Zn — меньше единицы). В касситеритах индий ведет

себя противоположно по сравнению со сфалеритом (коэффициент распределения в паре In—Sn меньше единицы), поэтому при изучении зональности оловорудных месторождений можно использовать отношение его содержаний в этих двух минералах (аналогично Cu в пиритах и в золоте).

## ВЫВОДЫ

1. Концентрация изоморфных примесей в том или ином минерале зависит не только от концентрации этих элементов в гидротермальном растворе, но и от степени пересыщения раствора в момент кристаллизации данного минерала.

2. При изменении степени пересыщения раствора в процессе рудоотложения концентрация одних элементов в одном и том же минерале может увеличиваться, а других уменьшаться в зависимости от абсолютного значения их коэффициентов распределения (больше или меньше единицы) относительно элемента-хозяина этого минерала.

3. Если при этом раствор перемещается в пространстве, образуется пространственная концентрационная зональность примесных элементов в минерале-хозяине — содержание одних элементов в направлении движения растворов будет расти, других — уменьшаться («скрытая» минералого-геохимическая зональность).

4. Отношение содержаний изоморфно-примесных элементов с противоположной зависимостью от степени пересыщения растворов может служить критерием для определения уровня эрозийного среза рудных тел и прогнозирования их продолжения на глубину.

5. Анализ литературных данных об особенностях концентрации элементов-примесей в самородном золоте магматогенного происхождения позволяет проводить аналогию о влиянии на состав минералов пересыщения растворов при гидротермальных процессах и переохлаждения расплавов при магматических процессах.

За любезно предоставленные образцы по некоторым месторождениям автор выражает благодарность д.г.-м.н. Г.Н. Гамянину (Якутск, ИГАБМ), д.г.-м.н. Н.А. Горячеву (Магадан, СВКНИИ), д.г.-м.н. Н.Е. Савве (Магадан, СВКНИИ). За выполнение микрозондовых анализов автор благодарит Н.В. Лескову (Якутск, ИГАБМ), микроспектральных анализов — Н.И. Петрову (Якутск, ИГАБМ), за техническую помощь при обработке материала и подготовке статьи выражаю благодарность В.В. Мухутдиновой (Якутск, ИГАБМ).

## ЛИТЕРАТУРА

**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, 1992, с. 50—64.

**Ананьев С.А., Сазонов А.М., Ананьева Т.А., Леонтьев С.И.** Золотоносность малосульфидных кварцевых жил и типоморфизм слагающих их минералов // Зап. ВМО, 1991, № 2, с. 17—24.

**Андрусенко Н.И.** Газово-жидкие включения как показатели физико-химических условий формирования малоглубинных золоторудных месторождений // Новые данные о типоморфизме минералов. М., Наука, 1980, с. 58—72.

**Баранова Н.Н., Козеренко С.В., Григорян С.С., Дарьина Т.Г., Савельев Б.В.** Экспериментальные данные о концентрациях золота и серебра в гидротермальных растворах // Геохимия, 1980, № 8, с. 1146—1157.

**Барнс Г.Л., Чаманский Г.К.** Растворимость и перенос рудных минералов // Геохимия гидротермальных рудных месторождений. М., Мир, 1970, с. 286—324.

**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.

**Васильев В.И.** Некоторые итоги изучения ртутистого золота // Геология и геофизика, 1991 (2), с. 66—73.

**Васильев В.И.** Минералогия ртути. Новосибирск, Изд-во СО РАН, филиал «Гео», 2004, 152 с.

**Волков А.В., Сидоров А.А.** Уникальный золоторудный район Чукотки. М.; Магадан, 2001, 180 с.

**Гамянин Г.Н.** Зональность золоторудных месторождений Верхояно-Колымской складчатой области // Минералого-генетические аспекты магматизма и оруденения Якутии. Якутск, 1993, с. 5—23.

**Гамянин Г.Н.** Минералого-геохимические аспекты золотого оруденения Верхояно-Колымских мезозойд. М., «Геос», 2001, 222 с.

**Генкин А.Ф., Сафронов Ю.Г., Боронихин В.А.** Новые данные по минералогии и геохимии золоторудного поля Колар, Индия // Геология и полезные ископаемые древних платформ. М., Наука, 1984, с. 82—99.

- Геология россыпей золота Северо-Востока СССР / Ред. О.Х. Цопанов.** Магадан, Магадан. кн. изд-во, 1979, 200 с.
- Давиденко Н.М.** О зональности золоторудных тел Кэпэрвеемского узла Западной Чукотки // Геология рудных месторождений, 1970, т. XII, № 2, с. 103—106.
- Дзасохов В.Г.** Использование типоморфных рудных минералов для поисково-оценочных целей // Поисковая минералогия: современное состояние и перспективы развития. Алма-Ата, 1987, с. 77—78.
- Жмурова З.И., Хаимов-Мальков В.Я.** Распределение изоморфных примесей при кристаллизации из водных растворов // Кристаллография, 1970, т. 15, вып. 1, с. 142—148.
- Коробейников А.Ф., Миков А.Д.** Особенности кристалломорфологии и химического состава золота ряда месторождений Сибири // Типоморфизм минералов и его прикладное значение. Чита, 1983, с. 61—65.
- Кузнецов Ю.А., Шаркин О.П., Самойлович Л.Г.** О первых находках ртутистого золота на Украине // Минералогический журнал, 1982, т. 4, № 2, с. 72—74.
- 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.
- Ломакина Г.В.** Типоморфные особенности самородного золота в каледонских гранитоидах Тянь-Шаня // Тр. ЦНИГРИ, вып. 193, 1984, с. 34—40.
- Ляхов Ю.В.** О горизонтальной и вертикальной зональности в пределах Балецкого рудного поля // Минералогия, термометрия и барометрия. М., Наука, 1968, с. 240—248.
- Многофакторные** прогнозно-поисковые модели месторождений золота и серебра Северо-Востока России / Ред. М.М. Константинов. М., Комитет по геологии и использованию недр РФ, 1992, 140 с.
- Моисеенко В.Г.** Геохимия и минералогия золота рудных районов Дальнего Востока. М., Наука, 1977, 304 с.
- 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.
- Назьмова Г.Н., Спиридонов Э.М.** Ртутистое золото // Докл. АН СССР, 1979, т. 246, № 3, с. 702—705.
- Нарсеев В.А.** Эндогенная зональность золоторудных месторождений Казахстана. Алма-Ата, АОНТИ, Казимс, 1973, 237 с.
- Наумов Е.А., Задорожный М.В., Боровиков А.А., Гущина Л.В.** Условия формирования и особенности состава самородного золота скарных месторождений Алтае-Саянской складчатой области // Материалы конференции «Строение литосферы и геодинамика». Иркутск, 2005, с. 170—172.
- Некрасов И.Я., Яковлев Я.В., Павлова Л.А., Готовцев В.В.** Необычные включения в самородном золоте из кимберлитовой трубки «Мир» // Докл. АН СССР, 1988, т. 303, № 5, с. 1209—1213.
- Некрасова А.Н.** Типоморфизм самородного золота одного из близповерхностных золото-серебряных месторождений Охотско-Чукотского вулканогенного пояса // Минералогия самородных элементов. Владивосток, 1980, с. 123—126.
- Новгородова М.И., Гамянин Г.Н., Цепин А.И., Кортман Р.В., Чинова И.А.** Типоморфизм золотоносных сульфидов и их минеральных ассоциаций // Новые данные о типоморфизме минералов. М., Наука, 1980, с. 44—57.
- Новиков В.П.** Поведение золота в зоне окисления золото-серебряного месторождения // Тр. ЦНИГРИ, 1986, вып. 208, с. 23—27.
- Озерова Н.А.** Ртуть и эндогенное рудообразование. М., Наука, 1986, 292 с.
- Озерова Н.А., Петкович М.С., Муравицкая Г.Н.** Примесь ртути — типоморфный признак золоторудных месторождений // Научные основы и практическое использование типоморфных минералов. М., Наука, 1980, с. 221—230.
- Павлова Л.К.** Геолого-геохимические особенности золото-скарновых месторождений Кузнецкого Алатау и Горного Алтая: Автореф. дис. ... к.г.-м.н. Новосибирск, ОИГТМ СО РАН, 1993, 24 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., Шадлун Т.Н.** Типоморфизм парагенетических минеральных ассоциаций некоторых рудных формаций // Типоморфизм минералов и его практическое значение. М., Недра, 1972, с. 227—233.
- Росляков Н.А., Нестеренко Г.В., Калинин Ю.А.** Золотоносность кор выветривания Салаира. Новосибирск, Изд-во СО РАН, 1995, 172 с.

**Самусиков В.П.** Минералогические особенности самородного золота как критерии физико-химических условий рудоотложения // Золоторудные формации и геохимия золота Верхояно-Чукотской складчатой области. М., Наука, 1975, с. 309—328.

**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.** Корреляционная зависимость содержаний некоторых элементов в блеклых рудах от концентрации в них серебра // Минералого-генетические аспекты магматизма и оруденения Якутии. Якутск, 1993, с. 40—49.

**Самусиков В.П., Сергеенко А.И.** Некоторые особенности самородного золота Куларского района // Вопросы рудоносности Якутии. Якутск, 1974, с. 212—230.

**Самусиков В.П., Петрова Н.И.** Корреляционная зависимость содержаний серебра, сурьмы и меди в самородном золоте // Типоморфные особенности рудных минералов эндогенных образований Якутии. Якутск, 1983, с. 39—53.

**Сандомирская С.М., Яблокова С.В., Преис В.К.** Изучение распределения и форм нахождения ртути в самородном золоте методом локального рентгеноспектрального анализа // Тр. ЦНИГРИ, 1983, вып. 178, с. 25—33.

**Сидоров А.А.** Золото-серебряное оруденение Центральной Чукотки. М., Наука, 1966, 146 с.

**Сидоров А.А.** Проблемы зональности золото-серебряных месторождений // Новые данные по геологии Северо-Востока СССР. Магадан, 1973, с. 109—118.

**Современная кристаллография.** Т. II / Ред. Б.К. Вайнштейн. М., Наука, 1979, 356 с.

**Спиридонов Э.М.** Самородное ртутистое золото Северного Казахстана // Новые данные о минералах. М., Наука, 1991, вып. 37, с. 108—127.

**Степанов В.А., Шишакова Л.Н.** Кубакинское золото-серебряное месторождение. Владивосток, Дальнаука, 1994, 196 с.

**Суплецов В.М., Жданов Ю.Я.** Типоморфные особенности золото-ауростибитового парагенезиса сурьмяных месторождений Якутии // Редкие самородные металлы и интерметаллиды коренных и россыпных месторождений Якутии. Якутск, 1992, с. 20—39.

**Ферсман А.Е.** Геохимия, т. 4. Л., Гостехиздат, 1939, 513 с.

**Хелгесон Г.К.** Комплексообразование в гидротермальных растворах. М., Мир, 1967, 184 с.

**Хлопин В.Г.** Избранные труды. Т. 1, М.-Л., Изд-во АН СССР, 1957, 370 с.

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

**Шишакова Л.Н.** Типоморфные свойства золота в близповерхностном золото-серебряном месторождении // Тр. ЦНИГРИ, 1981, вып. 159, с. 49—52.

**Яковлев Я.В., Соловьев Л.И.** Самородные элементы и интерметаллические соединения в оловорудных месторождениях Якутии // Редкие металлы и интерметаллиды коренных и россыпных месторождений Якутии. Якутск, 1992, с. 4—20.

*Рекомендована к печати 23 января 2009 г.  
А.С. Борисенко*

*Поступила в редакцию  
24 ноября 2008 г*