

GOLD IN THE BEDROCK SOURCE – PLACER SYSTEM

V. I. SOTNIKOV

Gold occurrences in the bedrock ore deposits as well as mechanical and chemical alterations of gold during its migration into placers are considered. Criteria for the search and evaluation of bedrock gold deposits based on specific features of gold particles in placers are discussed.

Рассмотрены формы нахождения золота в коренных рудных месторождениях и его механические и химические преобразования при миграции в россыпи. Обсуждаются критерии поисков и оценки коренных золоторудных месторождений по особенностям золотин в россыпях.

© Сотников В.И., 1998

ЗОЛОТО В СИСТЕМЕ КОРЕННОЙ ИСТОЧНИК – РОССЫПЬ

В. И. СОТНИКОВ

Новосибирский государственный университет

ВВЕДЕНИЕ

С доисторических времен до наших дней в мире добыто более 100 тыс. т золота, в том числе в России примерно 12 тыс. т [1]. Из этого количества на долю россыпей приходится около 25%. В самой России за всю историю около 85–90% золота получено именно из россыпных месторождений. В настоящее время мировая добыча золота из россыпей составляет 7,0–9,5%. В России в 1993 году на долю россыпей приходилось 71,4% добытого золота (рис. 1). В Магаданской области, добывающей 18,7% всего полученного в стране металла, россыпное золото составило 90%. В Иркутской области (при 14% общероссийских запасов золота) вся добыча производится из россыпей. Это свидетельствует о значительном неиспользованном ресурсном потенциале коренных золоторудных месторождений. Переход золотодобывающей промышленности от разработки россыпей к освоению коренных месторождений – процесс закономерный и неизбежный. Этому во многом способствует разностороннее изучение системы “коренной питающий источник – золотоносная россыпь”, что позволяет через изучение более легко открываемых россыпей выходить на коренные золоторудные месторождения.

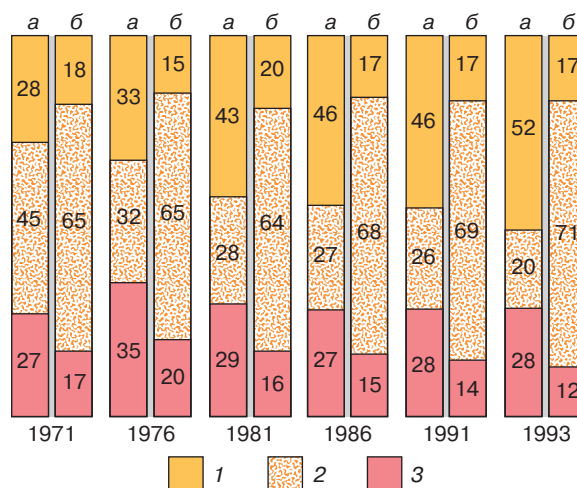


Рис. 1. Изменение структуры запасов (а) и добычи (б) золота (в %) в России за 1971–1993 годы [1]. Месторождения золота: 1 – комплексные; 2 – россыпные; 3 – собственно золоторудные

ЗОЛОТО В КОРЕННЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЯХ

Основными материнскими источниками питания золотоносных россыпей являются гидротермально минерализованные горные породы, и особенно руды месторождений (как собственно золоторудных, так и комплексных свинцово-цинковых, медных [2] и других, содержащих золото в качестве примесного компонента). Содержание Au в коренных золоторудных месторождениях обычно составляет 2–20 г/т, в комплексных – 0,06–0,5 г/т. Крупные месторождения имеют запасы золота 50–100 т и более. В коренных источниках золото в основном находится в трех формах: 1) макро- и микроскопические выделения свободного самородного золота; 2) выделения минеральных соединений золота, в основном теллуриды – две полиморфные модификации: (Au, Ag)Te₂ – калверит и креннерит, силванит (Au, Ag)Te₄, петцит AuTe₂ – и значительное реже селениды, сульфиды, антимониды; 3) невидимая примесь золота в различных минералах, преимущественно в сульфидах – особенно в пирите (FeS₂), арсенопирите (FeAsS), халькопирите (CuFeS₂), антимоните (Sb₂S₃) – и иногда в кварце (SiO₂). Невидимое золото представлено в основном субмикроскопическими тонкодисперсными частицами самородного металла размером в десятки–сотые доли микрометра. Содержание Au в пиритах и арсенопиритах золоторудных месторождений обычно составляет несколько граммов на тонну, но нередко достигает сотен граммов на 1 т, что часто и обеспечивает промышленную ценность таких месторождений. В целом наиболее распространенной формой являются свободное видимое золото и его серебросодержащая разность – электрум (AuAg), а также золотистое серебро – кюстелит (AgAu). Видимое золото чаще преобладает в малосульфидных золоторудных месторождениях.

Для самородного золота характерно большое многообразие форм выделения [3]: жилковидно-пластинчатая (до чешуйчатой), губчатая, комковидная, ветвистая, кристаллическая, друзовидная, дендритовая, проволоковидная, игольчатая, угловатая, каплевидная (рис. 2). Общей особенностью является более широкое развитие огранных форм среди мелких выделений золота и неправильных форм среди крупных. Устанавливается определенная зависимость форм от глубины образования золоторудных месторождений. В частности, в малоглубинных месторождениях более развиты удлиненные вплоть до волосовидных и уплощенных и дендритовидные выделения золота.

Постоянными элементами-примесями в самородном золоте являются Ag, Hg, Cu, Pd, реже Sb, Cd, Pt, которые образуют с ним ограниченные твердые растворы и интерметаллические соединения. Распределение этих изоморфных примесей в золоте, как правило, равномерное, что отличает их от неравномерно распределенных механических при-

месей (включения в золоте других минералов, присутствующих в руде и горной породе).

Наибольшей изоморфной емкостью с золотом обладает Ag, которое образует непрерывный ряд твердого раствора в интервале содержаний Au до 45%. Пробность золота (Au/(Au + Ag + Cu + Hg + Pd)) × 1000 определяется прежде всего примесью серебра. Установлены природные золото-серебряные соединения с пробностью не ниже 390 единиц. Значительно меньше предел изоморфной смесимости с золотом у Hg, содержание которой колеблется от 0,001 до 10% и редко более. Максимальное количество Hg, зафиксированное в самородном золоте, составляет 19–20%. Твердый раствор Cu в золоте ограничен содержаниями 0,5–4,0%. Обычно количество Cu в золотой матрице отрицательно коррелируется с Ag. Концентрации Pd в самородном золоте могут составлять доли процента – первые проценты. Для золоторудных месторождений, образовавшихся на небольших глубинах, обычно характерен неоднородный и в целом низкопробный состав золота (в основном за счет повышенной примеси Ag и иногда Hg). Отмечаемые в некоторых случаях более высокие содержания Ag, Cu, Hg, Pd в самородном золоте связаны с присутствием интерметаллических соединений типа AuAg₃, Au₃Hg, Au₂Hg, Au₄Ag₃Hg₃, AuCu, AuCu₃, AuPd, (Cu, Pd)₃Au и др.

ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЗОЛОТА В БЛИЗКОПОВЕРХНОСТНОЙ ЗОНЕ

Питающим источником золотоносных россыпей являются верхние части рудных тел и золотосодержащих минерализованных пород, разрушающиеся в процессе физического и химического выветривания. Поэтому при анализе системы коренной источник – россыпь важно изучение поведения золота в приповерхностной обстановке в области циркуляции подземных вод, обогащенных кислородом (эта область, характеризующаяся широким развитием окислительных процессов, выделяется как зона гипергенеза). В зоне гипергенеза золоторудных месторождений происходят как преобразование видимого самородного золота, так и формирование его новообразованных разностей. Последние возникают за счет высвобождения тонкодисперсного золота из сульфидов при их разложении и последующей его сегрегации и укрупнения, а также за счет окисления и распада собственных минералов золота (типа теллуридов Au).

Сульфиды в зоне гипергенеза разлагаются по схеме $2\text{FeS}_2(\text{пирит}) + 2\text{H}_2\text{O} + 7\text{O}_2 = 2\text{FeSO}_4 + 2\text{H}_2\text{SO}_4$ с образованием неустойчивых сульфатов железа и освобождением рассеянного в них золота. Циркулирующие в этой зоне хлоридно-сульфатные воды могут растворять содержащееся в сульфидах тонкодисперсное золото с образованием хлоридных комплексов: $\text{Au}^0 + \text{FeCl}_3 + \text{HCl} = \text{HAuCl}_2 + \text{FeCl}_2$.

| Золото в рудных месторождениях | | Золото в россыпях | | |
|--------------------------------|--|-------------------|------------------|----------------------|
| | | полуокатанное | хорошо окатанное | совершенно окатанное |
| Жилковидно-пластинчатое | | | | |
| Комковидное | | | | |
| Губчатое | | | | |
| Друзовое | | | | |
| Проволочное | | | | |
| Дендриты | | | | |
| Кристаллы | | | | |

Рис. 2. Изменение форм морфологических разновидностей золота в процессе окатывания и истирания золотин в россыпях

Свободное золото выделяется из растворов вследствие разрушения галогенидных комплексов AuCl_2^- , AuBr_2^- , AuJ_2^- . Разрушение комплексов происходит под воздействием восстановителей (Fe^{2+} , Mn^{2+} , H_2S , углистое вещество), а золото восстанавливается до металлического. Особенно активно этот процесс идет при фильтрации водных растворов в нижние горизонты зоны гипергенеза, где и сосредоточена основная масса выделяющегося золота. Очищенное от элементов-примесей новообразованное золото очень высокопробное (порядка 970–

1000). Преобладают мелкие, в том числе микроскопические и субмикроскопические, частицы, но встречаются и золотины (до 1,5 мм и более). Осадителями Au из гипергенных растворов могут служить также реликтовые выделения свободного золота. В этом случае на таких выделениях образуются каемки высокопробного золота.

При окислении и разложении собственных минералов Au (в основном теллуридов) образуется так называемое горчичное золото. Представлено оно мелкозернистыми землистыми микропористыми

агрегатами часто желтовато-коричневого цвета. Пробность высокая, обычно близкая к 1000. Выделения горчичного золота хотя и имеют довольно крупные размеры, но вследствие землистого микроагрегатного сложения очень неустойчивы к процессам механического переотложения и поэтому обладают слабыми россыпеобразующими свойствами.

Присутствовавшее в руде видимое свободное золото в зоне гипергенеза может быть частично или полностью преобразовано, что выражается в появлении по периферии его выделений кайм более высокопробного золота (иногда высокопробным становится все выделение). Это происходит за счет выноса примесных элементов, особенно Ag.

Наибольшие преобразования золота отмечают в районах с теплым и жарким климатом. Повышенные содержания хлора в водах этих районов связываются с существованием засушливых сезонов, когда происходят накопление Cl и других галогенидов и повышение общей солености вод. В условиях тропического климата возможно существование растворимых органических соединений Au. Высока эффективность микробиологического растворения золота. В меньших масштабах преобразования золота наблюдаются в обстановках умеренного и холодного климата. В зоне гипергенеза обычно происходит остаточное накопление золота вследствие выщелачивания других компонентов руд (карбонатов, сульфидов и др.). При этом отмечается снижение (в 1,2–1,5 раза) объемного веса рудного материала.

ЗОЛОТО В РОССЫПЯХ

Золотодобывающая промышленность в России работает с 1745 года, когда было открыто первое в стране крупное золоторудное месторождение – Березовское на Среднем Урале (за 250 лет его эксплуатации было добыто примерно 300–350 т золота) и началась разработка золото-серебряных руд Змеиногорского месторождения на Алтае. Золотоносные россыпи впервые были обнаружены в 1771 году по р. Чусовой на Урале, а разработка их началась только в 1814 году. Но уже к концу XVIII столетия в России основное золото получали из россыпей.

Несмотря на многолетнюю отработку и изучение золотоносных россыпей (в том числе крупных), вопрос о питающих их коренных источниках (рудных месторождениях) в некоторых районах остается до сих пор открытым. В то же время в россыпях обычно концентрируется не более 5–10% золота от общего его объема, выносимого из разрушающейся рудоносной зоны. Это свидетельствует о значительных перспективах обнаружения в таких районах коренных золоторудных месторождений. В связи с этим актуальными являются изучение системы коренной источник – россыпь и совершенствование критериев, которые дают возможность по

особенностям россыпного золота определять питающий их источник.

Россыпи представляют собой скопления зерен полезных минералов в рыхлых и сцементированных обломочных отложениях, возникших в результате разрушения горных пород и рудных месторождений [4, 5]. В строении россыпи обычно выделяют три основных фрагмента: пески, торфа и плотик (рис. 3). Песками называются продуктивные отложения, содержащие полезные минералы в повышенных, промышленных количествах. Пласт песков залегают обычно под слоем торфов – отложений, не содержащих полезные минералы или содержащих их в незначительном, непромышленном количестве. Плотик – породы, подстилающие промышленный пласт (часто это коренные породы – известняки, сланцы, граниты). Обогащенный крупным золотом пласт обычно приурочен к приплотиковой наиболее крупнообломочной части разреза россыпи. Крупные россыпи содержат не менее 25–50 т золота.

Золотоносные россыпи в основном образовались в четвертичный и реже в третичный периоды. Более древние россыпи редки, они в большей части уничтожены эрозией. По происхождению различают следующие типы россыпей: элювиальные (без существенного смещения обломочного материала относительно разрушавшегося коренного источника), делювиальные (представляют материал элювиальных россыпей, смещенный силой тяжести вниз по склону, на котором расположено коренное рудное месторождение), аллювиальные (формируются в процессе переноса обломочного материала речным потоком и располагаются обычно в речных долинах), прибрежные (образуются в береговой зоне морей, океанов и крупных озер под воздействием волн и прибрежных течений), ледниковые (перенос и накопление обломочного материала движущимися по долинам ледниками). Наибольшее промышленное значение имеют прибрежно-морские и особенно

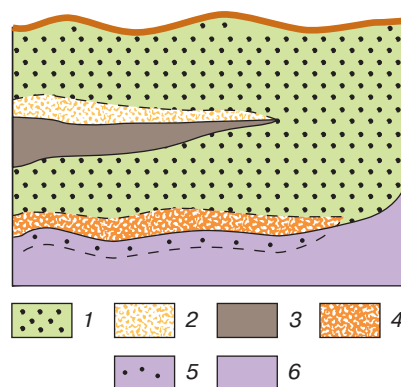


Рис. 3. Строение золотоносных россыпей: 1 – торф; 2, 4 – пески; 3 – ложный плотик; 5, 6 – плотик

аллювиальные россыпи золота. В зависимости от положения относительно речного русла среди них выделяются русловые, косовые (залегающие на галечных островах, косах и отмелях), долинные, террасовые. Протяженность аллювиальных россыпей достигает нескольких километров. В них выделяются головная часть, в которой заключены основные запасы, и хвостовая (иногда несколько десятков километров). Металлоносность аллювиальных россыпных месторождений России распределяется следующим образом: русловые – 0,1%, долинные – 55,5%, террасовые – 44,4% [4].

На путях миграции от коренного источника и в пределах самой россыпи самородное золото испытывает механические и химические преобразования. Механические преобразования выражаются в освобождении его частиц от сростков с другими минералами, в окатывании, истирании, сковывании золотин и разделении их по крупности и степени уплощенности. На золотилах часто появляются многочисленные царапины, бороздки, вмятины. Хорошим показателем длительности нахождения самородного золота на пути к россыпи и в определенной степени дальности переноса золотин от коренного рудного источника является степень их окатанности (см. рис. 2). Для оценки дальности сноса используется также анализ крупности золотин и их уплощенности. Если головная часть россыпей (наиболее приближенная к коренному источнику) характеризуется более крупными, слабо окатанными выделениями золота, то в ее хвостовой части обычно преобладают чешуйчатые, сильно уплощенные золотины. Дифференциация частиц по уплощенности происходит не только по длине россыпи, но и вкост ее простирания (в богатых центральных частях струй преобладают менее уплощенные и более крупные частицы золота).

Подвижность выделений золота в русловом потоке определяется в основном гидродинамическим режимом (ГР) водного потока (ГР включает скорость и живую силу потока, уклон и характер ложа, состав переносимого обломочного материала) и гидравлической крупностью (ГК) частиц золота. Последняя связана прямой зависимостью с массой частиц (P) и обратной с площадью их наибольшего сечения (S): $GK = P/S$, а также зависит от характера поверхности золотин. Существующие классификации самородного золота по гидравлической крупности включают его дифференциацию по степени уплощенности, окатанности, количеству вростков и размеру (главным образом толщине) [6]. Использование этих зависимостей помогает понять механизм формирования россыпных концентраций и является дополнительным критерием определения характера связи россыпи с коренным рудным источником.

Подавляющая масса добываемого из россыпей золота представлена частицами от 0,1 до 10 мм в по-

перечнике. Исключение составляют самородки, вес которых может достигать нескольких килограммов, например в Австралии найден самородок “Желанный Незнакомец” весом 74,5 кг. Обычное содержание золота в россыпях составляет 0,4–2 г/м³. Высокой подвижностью обладает тонкое, особенно чешуйчатое золото, которое способно переноситься водными потоками во взвешенном или полувзвешенном состоянии на десятки километров и многократно переотлагаться. Вынос такого золота может быть значительным. Так, подсчитано, что р. Индигирка (Колыма) переносит за сутки паводка во взвешенном состоянии 10,5 кг золота, а р. Амур выносит в море около 8,5 т золота в год.

Химические преобразования выражаются в формировании в золотилах высокопробных кайм и высокопробных межзерновых прожилков, аналогичных тем, которые образуются в зоне гипергенеза. Масштабы их формирования обычно увеличиваются с возрастом и глубиной залегания золотоносных отложений. Особенно интенсивно преобразовано золото в россыпях, сформированных в доледниковые теплые и влажные эпохи. Высокопробные каймы могут формироваться как в результате диффузионного выщелачивания серебра из серебродержащих золотин, так и путем замещения золото-серебряного сплава относительно чистым золотом. Формированию высокопробных кайм может способствовать гидрокарбонатный состав вод, благоприятный для миграции Ag. Подвижность Au в этих условиях слабая. В процессе хемогенного преобразования самородного золота наряду с Ag обычно выносятся Hg и Cu.

В геологической литературе длительное время обсуждался вопрос: растет ли золото в россыпях и восстанавливаются ли отработанные россыпи за счет его хемогенного привноса и новообразования? Этому во многом способствует неоднократное возвращение к отработке ранее уже разрабатывавшихся россыпей. Предпосылки для образования в россыпях “нового” золота имеются, особенно в районах, характеризующихся аридным жарким климатом, где природные воды отличаются повышенной общей минерализацией, нередко имеют сульфатно-хлоридный состав и повышенные содержания галогенов. Одной из возможных форм переноса золота в таких водах являются гидрохлоридные комплексы (AuClOH⁻). Укрупнение золота может происходить также за счет природной амальгамации, в результате которой отмечается цементация нескольких золотин. Однако в целом, как считает Г.В. Нестеренко [7], уделявший этой проблеме большое внимание, масштабное формирование “нового” золота в россыпях не характерно даже для жарких климатических зон. По его мнению, хемогенного восстановления россыпей в природе не происходит. В то же время хемогенное перераспределение золота в пределах россыпей является достаточно

распространенным явлением. Что касается неоднократной отработки россыпей, то это, скорее всего, связано с совершенствованием технологических схем извлечения золота.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Самородное золото, переходя из коренных рудных источников в россыпи, в той или иной степени испытывает преобразования в составе и строении его выделений. Однако при этом многие особенности состава сохраняются. Унаследованность состава самородного золота в россыпях от питающего источника позволяет использовать этот параметр для суждения о типе и местоположении коренной золоторудной минерализации. В совокупности с учетом механических и химических преобразований золота в зоне окисления рудных месторождений и россыпях это позволяет устанавливать критерии связи россыпей золота с питающими их рудными источниками, что является важным в решении актуальной для России задачи перехода золотодобывающей промышленности на преимущественную разработку коренных месторождений золота.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Беневольский Б.И.* Золото России. М.: Геоинформмарк, 1995. 33 с.

2. *Сотников В.И.* Основные тенденции развития теории рудообразования // Соросовский Образовательный Журнал. 1996. № 12. С. 56–61.

3. *Петровская Н.В.* Самородное золото. М.: Наука, 1973. 347 с.

4. *Шило Н.А.* Основы учения о россыпях. М.: Наука, 1981. 383 с.

5. *Нестеренко Г.В.* Происхождение россыпных месторождений. Новосибирск: Наука, 1977. 310 с.

6. *Избеков И.Д.* Образование и эволюция россыпей. Новосибирск: Наука, 1985. 189 с.

7. *Нестеренко Г.В.* Прогноз золотого оруденения по россыпям. Новосибирск: Наука, 1991. 190 с.

* * *

Виталий Иванович Сотников, доктор геолого-минералогических наук, профессор кафедры месторождений полезных ископаемых Новосибирского государственного университета, зав. лабораторией рудно-магматических систем Объединенного института геологии, геофизики и минералогии Сибирского отделения РАН, действительный член Международной академии минеральных ресурсов. Лауреат Государственной премии СССР. Область научных интересов: рудообразование и металлогения. Автор восьми монографий и более 250 научных статей.