



ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ САМОРОДНОГО ЗОЛОТА КАК ПРЯМЫЕ ПРИЗНАКИ РУДНО-ФОРМАЦИОННОЙ ПРИНАДЛЕЖНОСТИ ПРОЯВЛЕНИЙ РУДНОГО И РОССЫПНОГО ЗОЛОТА

Рассмотрены особенности распределения элементов-примесей в самородном золоте двух рудно-формационных типов месторождений золота. Определён типоморфный набор элементов для золото-полисульфидно-кварцевого и золотокварцевого малосульфидного оруденения. Предложены геохимические показатели для оценки рудно-формационной принадлежности самородного золота. Установлены различия в составе золота, обусловленные металлогенической специализацией региона. Получены данные о распределении в самородном золоте редкоземельных элементов, отражающие состав магматических пород, участвующих при формировании золото-полисульфидно-кварцевых месторождений.

Ключевые слова: элементы-примеси в самородном золоте, геохимические индикаторы.

Изучение состава самородного золота – одно из важнейших направлений при решении задач, связанных с типоморфизмом золота, и имеет большое практическое значение. Данные о составе можно получить, изучая комплексы типоморфных признаков самородного золота, в том числе элементов-примесей.

Классификация элементов-примесей в самородном золоте впервые предложена и впоследствии уточнена Н. В. Петровской, которая рассматривает распространение и концентрацию элементов-примесей как типоморфный признак и приводит данные об элементах-примесях в золоте трёх типов золоторудных месторождений: глубинных малосульфидных золотокварцевых, среднеглубинных умеренносульфидных золото-сульфидно-кварцевых и убогосульфидных малоглубинных [12].

Систематические исследования типоморфизма самородного золота, проводившиеся ЦНИГРИ на территории РФ и стран СНГ, сопровождались использованием количественного спектрального анализа золота на 15 элементов-примесей из навески 3–5 мг (чувствительность анализа $1 \cdot 10^{-3}$ – $1 \cdot 10^{-4}$ %) [6]. Среди элементов были выделены основные примеси (Fe, Cu, Pb), второстепенные (Hg, As, Sb, Bi, Te, Ti), спорадические (Cr, Ni, Co, Pt, Pd, Mn, W, Sn).

Для анализа информативности типоморфных признаков золота, в частности состава элементов-примесей, при определении рудно-формационной принадлежности проявлений коренного и россыпного золота была проведена математическая обработка базы данных, включающей более 120 месторождений, в результате которой получены количественные оценки информационного веса каждого признака. Было установлено, что состав и набор элементов-примесей по данным спектрального

Миляев Сергей Анатольевич

кандидат геолого-минералогических наук
ведущий научный сотрудник¹
milyaev@tsnigri.ru

Самосоров Георгий Германович

кандидат геолого-минералогических наук²

Яблокова Светлана Васильевна

кандидат геолого-минералогических наук
старший научный сотрудник¹

Шатилова Людмила Викторовна

старший научный сотрудник¹
shatilova@tsnigri.ru

Позднякова Наталья Николаевна

кандидат геолого-минералогических наук
научный сотрудник¹
natali-silver@bk.ru

¹ ФГБУ «Центральный научно-исследовательский геологоразведочный институт цветных и благородных металлов», г. Москва

² Институт криминалистики Центра специальной техники ФСБ России, г. Москва

анализа оказались недостаточно информативными, главным образом из-за ограниченных возможностей метода [10].

Для более полной геохимической характеристики золота необходимо было использовать более чувствительные аналитические методы, позволяющие определять широкий спектр элементов-примесей и расширить круг изучаемых объектов.

Такую возможность дало применение приближенно-количественного масс-спектрометрического анализа с индуктивно-связанной плазмой (ICP-MS). Этот метод анализа был впервые применён Р. С. Вотлингом [17] для изучения элементов-примесей в самородном золоте месторождений разных регионов мира. Позднее Р. С. Вотлинг с коллегами использовали данный анализ для выявления состава золота рудных объектов Австралии [15].

Определение содержаний элементов-примесей в самородном золоте методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой начали проводиться в ЦНИГРИ с 2005 г. Для этого был использован способ предварительного химического разложения образца царской водкой с переводом золота и его примесей в раствор и последующим инструментальным определением элементов из раствора. Определение содержаний элементов выполнялось параллельно в растворах золота и в нулевой (холостой) пробе. Количественные определения Cu, Zn, Sn, Pb, As, Sb, Bi, Te, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Pt проводились с использованием эталонных сплавов на золото-серебряных основах [10]. Анализы производились с помощью прибора «Элан 6100» фирмы «Перкин Элмер» на 70 химических элементов из 5 мг навески золота без видимых минеральных примесей. Предел обнаружения анализируемых содержаний для разных химических элементов 1–0,01 г/т.

Анализ 490 образцов рудного и россыпного золота методом ICP-MS позволил установить спектры элементов-примесей в самородном золоте трёх наиболее распространённых рудно-формационных типов золоторудных месторождений: золото-полисульфидно-кварцевом, золотокварцевом малосульфидном и золото-серебряном из разных золотоносных провинций и районов РФ [9]. Определён типоморфный набор элементов для золота каждого из типов. Впервые получены данные о распределении в самородном золоте редкоземельных, редких щелочных и щёлочноземельных

элементов. Установлены различия в составе самородного золота, обусловленные региональными металлогеническими особенностями золотоносных провинций [7, 8, 16].

Ниже приводятся новые данные о распределении элементов-примесей в самородном золоте золоторудных провинций и районов РФ, ранее не включённых в рассмотрение или представленных ограниченным числом образцов. Анализы 170 образцов золота методом ICP-MS выполнялись в Казанском федеральном университете.

Состав элементов-примесей в золоте изучался для двух рудно-формационных типов золоторудных месторождений: золото-полисульфидно-кварцевого и золотокварцевого малосульфидного. Месторождения данных типов – основной источник россыпного золота.

Золото-полисульфидно-кварцевые месторождения представляют собой классические плутоногенно-гидротермальные месторождения, связанные с гранитоидными интрузиями. Они широко распространены в складчатых областях фемического и сиало-фемического профиля, а также в структурах тектоно-магматической активизации с глубинным базитовым субстратом [14]. Оруденение представлено кварцевыми и кварц-карбонат-сульфидными жилами, жильно-прожилковыми зонами и штокверками, сульфидными залежами в карбонатных породах. К типовым особенностям оруденения относятся: интенсивные околорудные изменения березит-лиственитового типа, повышенная и высокая сульфидность руд (не менее 10 %), разнообразие состава рудной минерализации, в том числе широкое развитие минералов висмута; хорошо выраженные стадийность, а также вертикальная и латеральная минеральные зональности и неоднократное отложение самородного золота в процессе рудообразования.

На территории РФ основными районами распространения месторождений этого типа являются герциниды восточного склона Урала, каледониды Алтае-Саянской складчатой области, мезозоиды Сихотэ-Алиня в Приморье, зоны мезозойской тектоно-магматической активизации складчатых сооружений Монголо-Охотского пояса (Забайкалье, Верхнее Приамурье), а также Алданского щита Сибирской платформы.

Золотокварцевые малосульфидные месторождения распространены в складчатых областях мио-

геосинклинального типа развития в структурах сиалического профиля. Связь этих месторождений с гранитоидным магматизмом не так очевидна, как для месторождений предыдущего типа. Золотокварцевые малосульфидные месторождения локализованы в слабометаморфизованных (не выше зеленосланцевой фации) терригенных и карбонатно-терригенных углеродсодержащих толщах, нередко на значительном удалении от интрузивных массивов и вне видимой связи с ними. В отдельных провинциях они частично связаны с малыми доботолитовыми интрузиями диоритового состава и относятся некоторыми исследователями к самостоятельному рудно-формационному типу [3]. Оруденение представлено жилами (в том числе седловидными) и жильными телами, мощными и протяжёнными жильными и жильно-прожилковыми зонами и мегаштокверками. Оно характеризуется, в отличие от золото-полисульфидно-кварцевых месторождений, простым, монотонным, выдержанным на глубину существенно-кварцевым составом с незначительным (не более первых процентов) содержанием сульфидов, главным образом пирита и арсенопирита.

На территории РФ золотокварцевые месторождения широко распространены в байкалидах

Енисейского кряжа и Ленского района, а также в мезозоидах Верхояно-Чукотской области.

Основными отличительными особенностями объектов золото-полисульфидно-кварцевого типа являются повышенные содержания в золоте Bi, Cu, Te, Se, Pb, Sb, редкоземельных элементов (лантан и лантаноиды) [16]. Для золота месторождений золотокварцевого малосульфидного типа характерны повышенные содержания As, W, Sr, Ba, Rb, Cs – элементов с повышенными кларками в глинистых сланцах [13]. На рис. 1 представлена гистограмма распределения средних геометрических содержаний элементов-примесей в золоте объектов золото-полисульфидно-кварцевого и золотокварцевого малосульфидного типов, построенная по результатам анализа 170 образцов самородного золота.

Установлено, что абсолютные содержания ряда элементов-примесей в самородном золоте во многом зависят от металлогенической специализации золотороссыпных провинций. Например, Уральская и Алтайская характеризуются самыми высокими содержаниями меди; Южно-Енисейская и Восточно-Забайкальская – свинца; Тывинская – цинка. Аномально высокие содержания U и Th отмечены в самородном золоте Приаргунского

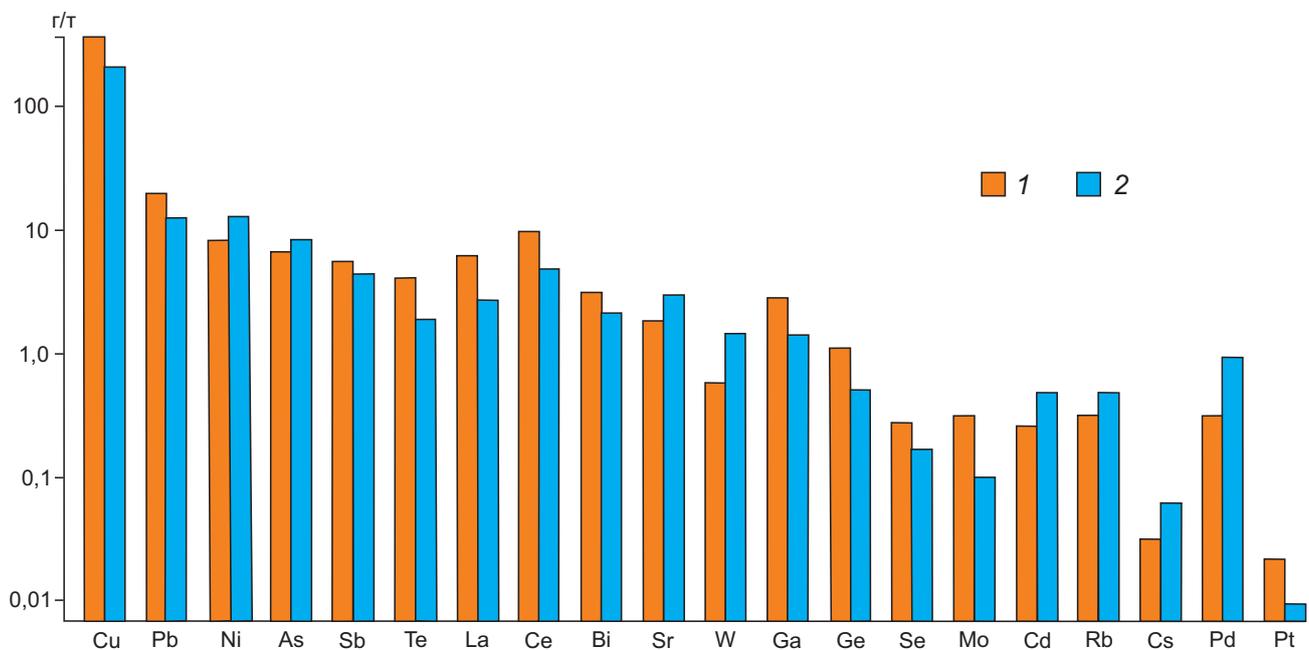


Рис. 1. ГИСТОГРАММА СРЕДНИХ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ СОДЕРЖАНИЙ ЭЛЕМЕНТОВ-ПРИМЕСЕЙ В САМОРОДНОМ ЗОЛОТЕ ЗОЛОТО-ПОЛИСУЛЬФИДНО-КВАРЦЕВОГО (1) И ЗОЛОТОКВАРЦЕВОГО МАЛОСУЛЬФИДНОГО (2) ТИПОВ

золотороссыпного района Восточного Забайкалья в пределах Монголо-Приаргунского вулканического пояса, в краевой части которого расположен Стрельцовский урановорудный район с 30 % общих запасов урана РФ.

Как показали исследования состава золота на рентгеноспектральном микроанализаторе, элементы-примеси в нём распределены неравномерно. Это подтверждается также сопоставлением содержаний элементов-примесей в самородном золоте по данным ICP-MS анализа в 39 одноимённых образцах золота массой 300 и 50 мг, которое показывает, что отклонения содержаний микроэлементов в среднем имеют пятикратное значение.

Неравномерное распределение обусловлено весьма разнообразными формами вхождения элементов-примесей в самородное золото. Золото может формировать твёрдые растворы, в которых атомы золота замещаются в узлах кристаллической решётки атомами другого элемента; к непрерывному ряду твёрдых растворов относится Au-Ag, Au-Cu. Известны многочисленные интерметаллиды золота, образующиеся в результате процессов сплавления, конденсации флюидов или взаимной диффузии. Интерметаллические связи золото образует с Cu, Pt, Pd, Sn, Sb, Ni и другими элементами. В зависимости от формационного типа в золоте могут присутствовать минеральные включения или сростки с минералами, находящимися с ним в парагенетической ассоциации: алтаита ($PbTe$), теллурувисмутита (Bi_2Te_3), тетрадимита (Bi_2Te_2S), буланжерита ($Pb_5Sb_4S_{11}$), арсенопирита, галенита и целого ряда других минералов. Благодаря высокой пластичности и мягкости на поверхности золота могут фиксироваться микроскопические обломки шлиховых минералов, характерных для данной территории. В ряде образцов золота отмечаются резко повышенные содержания циркония, гафния, урана, тория, входящих в состав циркона (Zr, Hf, U, Th) SiO_4 , ниобия и тантала в виде колумбита и танталита, вольфрама в виде шеелита, олова в виде касситерита.

В природных объектах наблюдаемые распределения признаков являются следствием воздействия бесконечного множества разнообразных факторов, учесть влияние которых практически невозможно из-за сложного характера их взаимодействия. Наиболее приемлемым для классификации самородного золота по элементам-примесям является корреляционный анализ, позволяющий

совместно рассматривать распределения большого числа статистически взаимосвязанных химических элементов.

Проведённый корреляционный анализ позволил установить значимые положительные корреляционные связи для отдельных пар химических элементов. В объектах золото-полисульфидно-кварцевого формационного типа положительные корреляционные зависимости образуют Ga-Ge, Bi-Te, Pb-Sb, Cu-Se, Pb-Bi, Bi-Sb. Для ряда месторождений золотокварцевого малосульфидного формационного типа отмечены корреляционные связи As-Rb, Rb-Cs, W-Pd. Для количественного выражения сходства и различия между этими типами были вычислены значения геохимических показателей, сформированных из пар корреляционно зависимых химических элементов.

На рис. 2 приведена двумерная характеристика изученных золотороссыпных провинций в координатной плоскости мультипликативных геохимических показателей $Cu \times Se$ и $Ga \times Ge$. При наличии характерных различий совокупность

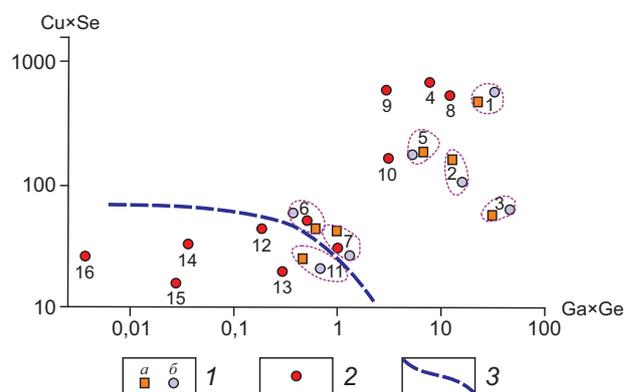


Рис. 2. ДИАГРАММА ДЛЯ КЛАССИФИКАЦИИ ОБРАЗЦОВ ЗОЛОТА ПО СРЕДНИМ ЗНАЧЕНИЯМ ПОКАЗАТЕЛЕЙ $Cu \times Se$ И $Ga \times Ge$:

1 – одноимённые образцы (а – масса 300 мг, б – масса 50 мг); 2 – разноимённые образцы массой 50 мг; 3 – кривая, разделяющая объекты золотокварцевого и золото-полисульфидно-кварцевого типов; золотороссыпные провинции и районы: 1 – Алтайский край, 2 – Кемеровская область (Полуденный), 3 – Южно-Енисейский район, 4 – Забайкальский край, 5 – юг Красноярского края, 6 – Р.Хакасия, 7 – Р.Тыва, 8 – Урал, 9 – Новосибирская область, 10 – Кемеровская область, 11 – Северо-Енисейский район, 12 – Таймыр, 13, 14 – Центральная Колыма (13 – Чай-Урья, 14 – Наталка), 15 – Чукотка, 16 – Ленский район (Догалдын)

объектов золото-полисульфидно-кварцевого типа располагается в диапазонах показателей $Cu \times Se - 40-640$, $Ga \times Ge - 0,6-50$. Самородное золото объектов золотокварцевого малосульфидного типа характеризуется относительно пониженными содержаниями Cu , Se , Ga , Ge . На диаграмме они расположены в интервалах значений геохимических показателей $Cu \times Se - 14-45$, $Ga \times Ge - 0,0024-0,9$.

Объекты Хакасии и Тывы на рис. 2 располагаются близко друг к другу. Вместе с тем они существенно отличаются по распределению других элементов-примесей. На рис. 3 приведены средние геометрические содержания для наиболее значимо различающихся по содержаниям элементов-примесей в золоте. Наиболее контрастные различия отмечаются для Bi , Te , Pb , Sb . На рис. 4 отражено положение изученных образцов золота в координатной плоскости $Pb \times Sb$ и $Bi \times Te$. Образцы Хакасии заключены в достаточно узкий интервал значений показателя $Bi \times Te$ (среднее значение 3,5). Для объектов Тывы значения этого показателя значительно выше (370). Менее контрастные различия состава самородного золота проявлены при рассмотрении значений показателя $Pb \times Sb$: средние значения для Хакасии 490, для Тывы – 62.

Полученные данные позволяют предложить ряд геохимических показателей $Ga \times Ge$; $Bi \times Te$; $Pb \times Sb$; $Cu \times Se$; $Pb \times Bi$; $Bi \times Sb$, $As \times Rb$; $W \times Pd$, составленный из пар корреляционно зависимых химических элементов, количественно характеризующих сходство и различия между формационными типами рудных и россыпных проявлений золота.

Редкоземельные элементы (РЗЭ) являются чувствительными геохимическими индикаторами природных геологических процессов. Самые высокие содержания РЗЭ в самородном золоте характерны для золото-полисульфидно-кварцевых – плутоногенно-гидротермальных месторождений, тесно связанных с гранитоидными интрузивами [7]. Гранитоидная магма является основным генерирующим субстратом РЗЭ. Процессу накопления РЗЭ способствует повышенная щёлочность гранитоидной магмы [1, 11].

В самородном золоте установлена прямая зависимость между $\Sigma РЗЭ$ и отношением лёгких лантаноидов к тяжёлым. На рис. 5 приведена диаграмма, показывающая зависимость La/Er от суммы

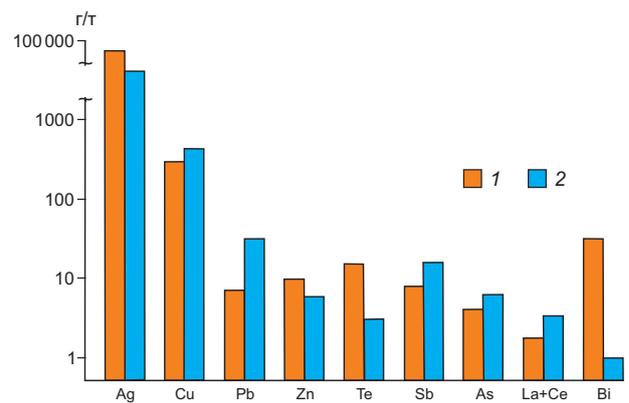


Рис. 3. СРЕДНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ СОДЕРЖАНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ-ПРИМЕСЕЙ В ЗОЛОТЕ РЕСПУБЛИК ТЫВА (1) И ХАКАСИИ (2)

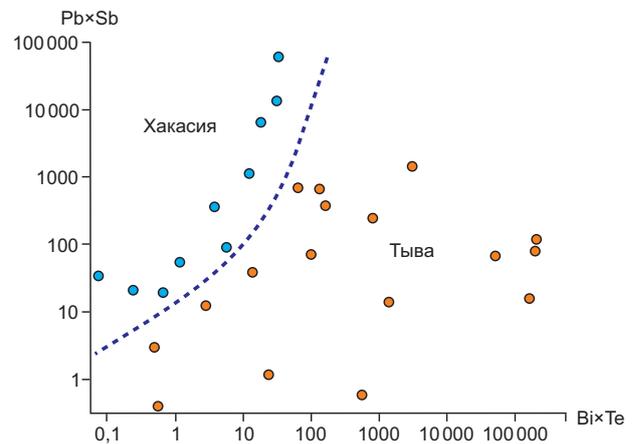


Рис. 4. ДВУМЕРНАЯ ГЕОХИМИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ЗОЛОТА РЕСПУБЛИК ТЫВА И ХАКАСИИ В КООРДИНАТАХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ $Pb \times Sb$ И $Bi \times Te$

содержаний РЗЭ в самородном золоте. Не рассматривался Pm , который не имеет стабильных изотопов, а также Tm , Yb , Lu – крайние члены ряда с содержаниями, близкими к пределам их обнаружения. Все золото-полисульфидно-кварцевые объекты сосредоточены в правом верхнем углу диаграммы, объекты золотокварцевого малосульфидного типа расположены в левом нижнем углу.

Относительное увеличение содержаний лёгких лантаноидов с ростом суммы содержаний РЗЭ в самородном золоте подтверждается полем корреляции La/Er и $\Sigma РЗЭ$, отмеченном в золотороссыпных узлах Забайкальского края (рис. 6).

Магматические породы по химическому составу разделяются на фемические – тёмноцветные, содержащие много магния и железа, и салические – светлоокрашенные, содержащие много кремния и алюминия. Главная масса лёгких лантаноидов сосредоточена в светлоокрашенных ми-

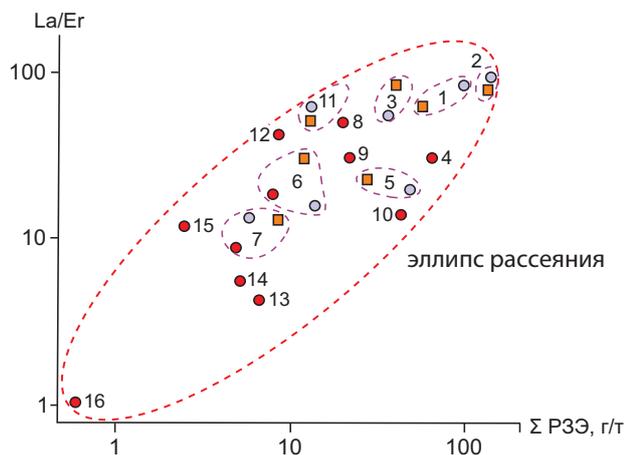


Рис. 5. ДИАГРАММА ДЛЯ КЛАССИФИКАЦИИ ОБРАЗЦОВ ЗОЛОТА ПО СРЕДНИМ ЗНАЧЕНИЯМ ПОКАЗАТЕЛЕЙ La/Er И Σ PЗЭ:
усл. обозн. см. рис. 2

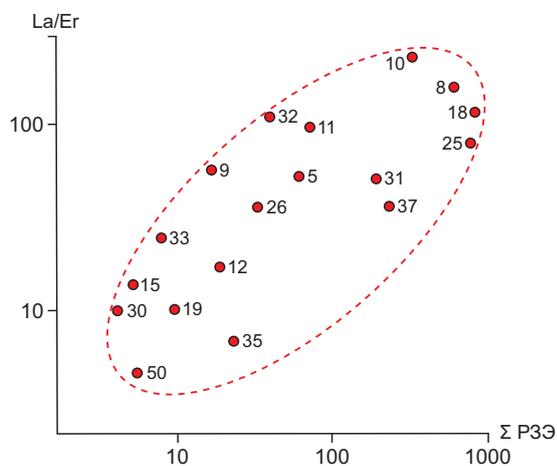


Рис. 6. КОРРЕЛЯЦИОННАЯ ЗАВИСИМОСТЬ МЕЖДУ La/Er И Σ PЗЭ В ЗОЛОТЕ ЗАБАЙКАЛЬСКОГО КРАЯ:

золотороссыпные узлы: 5 – Бухта-Черемнинский, 8 – Верхне-Амазарский, 9 – Могоча-Амазарский, 10 – Итакинский, 11 – Урюмский, 12 – Горбица-Желтугинский, 15 – Карийский, 18 – Будюмканский, 19 – Дарасунский, 25 – Кручининский, 26 – Кия-Ингодинский, 30 – Быстринско-Лугиинский, 31 – Балейско-Казаковский, 32 – Аргалей-Цаган-Челутайский, 33 – Тура-Оленгуйский, 35 – Шахтаминский, 37 – Борзинский, 50 – Бальджиканский

нералах, и, наоборот, основная доля тяжёлых лантаноидов отмечается в тёмноцветных минералах [1]. Гранитоидная магма по мере перехода от кислых разностей к средним будет обогащаться тяжёлыми PЗЭ, а ΣPЗЭ и отношение La/Er будут закономерно падать.

Различия в петрохимическом составе гранитоидной магмы отчётливо видны на графиках нормированных содержаний PЗЭ в золоте Забайкальского края. Золотороссыпные узлы 8, 10, 25 преимущественно развиваются на площади интрузивных пород кислого состава с падением содержаний в сторону тяжёлых PЗЭ (рис. 7). Узлы 15, 19, 30 локализованы в зонах контактов массивов гранитоидов с породами среднего состава, для которых отмечается относительный рост содержаний тяжёлых PЗЭ в самородном золоте. На рисунке также отмечаются минимумы и максимумы Eu. Причинами появления отрицательных и положительных аномалий Eu являются его фракционирование в полевых шпатах и изменение валентности. Минимум Eu связан с избирательной концентрацией Eu^{+2} полевыми шпатами при их кристаллизации при температурах 500–800° [11]. При более низких температурах в окислительной обстановке Eu^{+2} меняет валентность на Eu^{+3} с переходом в твёрдую фазу [1]. Именно этим объясняется максимум Eu в золоте Карийского золотороссыпного узла (15). Формирование золоторудных объектов Карийского рудного поля, являющегося основным источником россыпей, проходило в окислительной обстановке с перераспределением рудного вещества при наложении поздних аргиллитов на рудоносные березиты [5].

Относительное содержание δEu может отражать и другие петрохимические особенности гранитоидов. Определяется оно по формуле:

$\delta Eu = [Eu] / [Eu]^*$, где [Eu] – измеренное содержание европия, $[Eu]^*$ – геометрическое содержание по концентрациям Sm и Gd [1], рассчитывается как среднее.

Натриевые гранитоиды обладают повышенной концентрацией европия $\delta Eu > 1$, в то время как калиевые гранитоиды далеко не всегда обогащаются европием, их относительные содержания чаще всего расположены в интервалах ниже единицы ($\delta Eu < 1$) [2]. Такая же зависимость отмечается в самородном золоте, а именно – обратная корреляция между степенью обогащения гранитоид-

дов δEu и отношением Rb/Sr. В данном случае Rb рассматривается как геохимический аналог калия, а Sr – натрия. На рис. 8 приведены данные по распределению Rb/Sr и δEu в самородном золоте рудных узлов Забайкальского края.

Важность изучения распределения РЗЭ обусловлена особенностями их фракционирования в магматическом и осадочном процессах. Неоднородность распределения и поведения РЗЭ в процессах выплавления первичных магм и их фракционной кристаллизации, а также разделение РЗЭ при формировании коры выветривания, переносе РЗЭ природными водами и в ходе континентального осадкообразования в разных тектонических условиях [1] находят своё отражение в первичном накоплении и перераспределении РЗЭ в самородном золоте.

Отличительный признак золота связан с особенностями распределения в нём ассоциаций РЗЭ, редких щелочных и щёлочноземельных элементов. Рассчитанные коэффициенты частной корреляции [4] показали наличие положительных корреляционных связей между щёлочноземельными и редкими щелочными элементами. Значимые положительные корреляционные связи отмечены для Rb–Cs, Sr–Ba, Sr–Cs, Ba–Rb [7]. Щёлочноземельные и редкие щелочные элементы имеют повышенные содержания в некоторых типах осадочных пород, главным образом в глинах и глинистых сланцах континентов [13]. В качестве элементов-примесей они доминируют в самородном золоте золото-кварцевых малосульфидных месторождений (см. рис. 1).

Для сравнения объектов двух рудно-формационных типов предложен геохимический коэффициент $Rb \times Cs \times Sr \times Ba / La \times Ce \times Pr \times Nd$, числитель которого сформирован из щелочных и щёлочноземельных элементов, знаменатель – из редкоземельных элементов (РЗЭ). Выбранный коэффициент характеризуется большим размахом – более чем в $1 \cdot 10^6$ раз, что существенно превышает любые погрешности ICP-MS анализа. На рис. 9 приведена гистограмма значений этого коэффициента для объектов золото-полисульфидно-кварцевого и золотокварцевого малосульфидного типов. Интервал значений геохимического коэффициента для объектов золото-полисульфидно-кварцевого типа составил $1 \cdot 10^{-3}n - 1 \cdot 10^{-5}n$, для золото-кварцевого малосульфидного – $1 \cdot 10^{-3}n - 10n$.

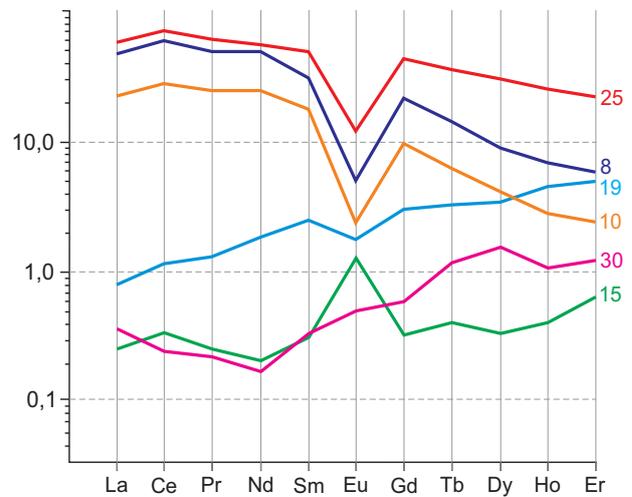


Рис. 7. НОРМИРОВАННЫЕ СОДЕРЖАНИЯ РЗЭ В САМОРОДНОМ ЗОЛОТЕ ЗАБАЙКАЛЬСКОГО КРАЯ:

усл. обозн. см. рис. 2

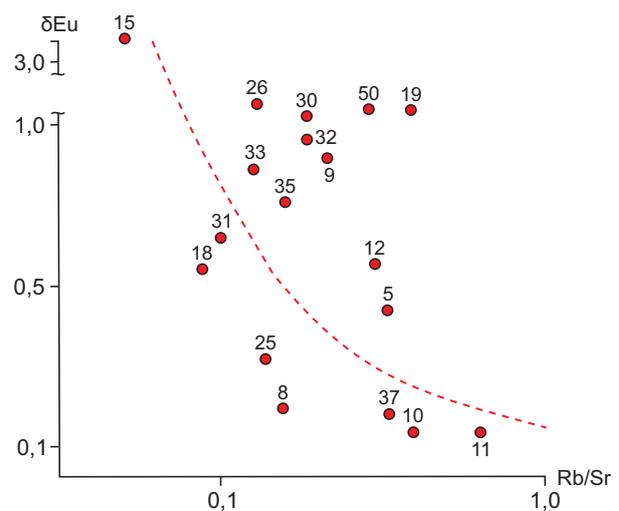


Рис. 8. КОРРЕЛЯЦИЯ ВЕЛИЧИН δEu И Rb/Sr В ЗОЛОТЕ ЗАБАЙКАЛЬСКОГО КРАЯ:

усл. обозн. см. рис. 6

Выводы.

1. С помощью высокочувствительного приближенно-количественного ICP-MS анализа установлен широкий спектр элементов-примесей в самородном золоте двух рудно-формационных типов золоторудных месторождений из разных золотоносных провинций и районов РФ, представляющих самостоятельный промышленный интерес.

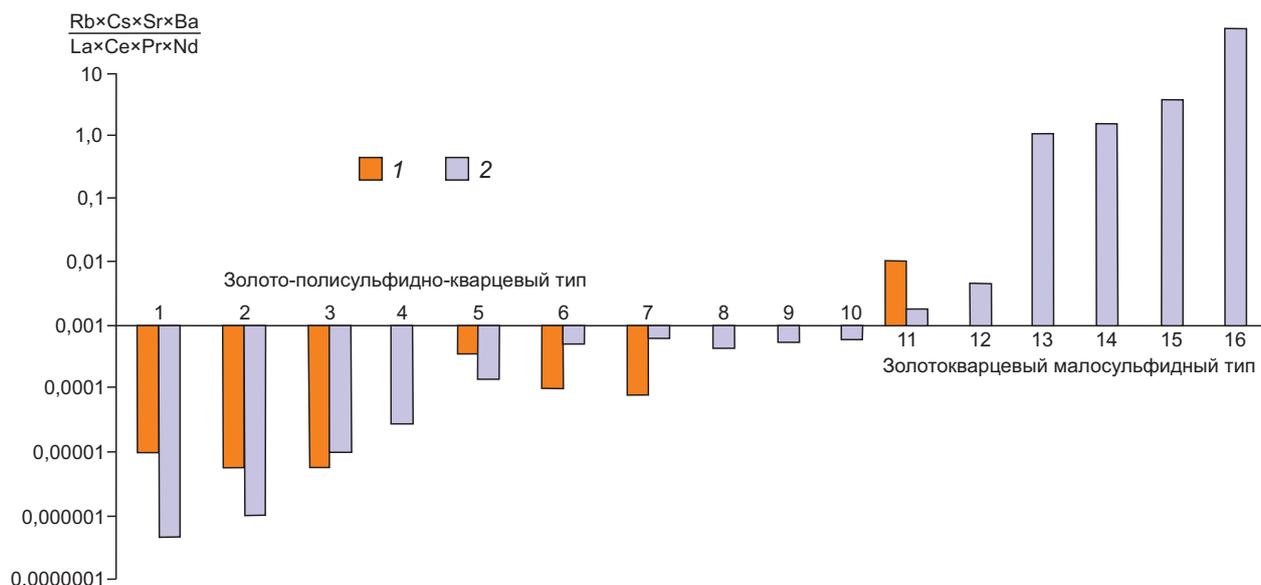


Рис. 9. ГИСТОГРАММА ЗНАЧЕНИЙ ГЕОХИМИЧЕСКОГО КОЭФФИЦИЕНТА $Rb \times Cs \times Sr \times Ba / La \times Ce \times Pr \times Nd$ ДЛЯ ЗОЛОТО-РОССЫПНЫХ ПРОВИНЦИЙ И РАЙОНОВ РФ:

1 – навеска массой 300 мг; 2 – навеска массой 50 мг; остальные усл. обозн. см. рис. 2

2. Определён типоморфный набор элементов для каждого из типов месторождений. Золото-полисульфидно-кварцевые объекты характеризуются повышенными содержаниями в золоте Bi, Cu, Te, Pb, Se, Sb, группы PЗЭ (лантан и лантаноиды), золотокварцевые малосульфидные – повышенными содержаниями As, W, Rb, Cs, Sr, Ba.

3. Для количественного выражения сходства и различия между рудно-формационными типами объектов предложены геохимические показатели, составленные из пар корреляционно зависимых химических элементов: Ga x Ge, Bi x Te, Pb x Sb, Cu x Se, Pb x Bi, Bi x Sb, As x Rb, Rb x Cs, W x Pd.

4. Важной характеристикой рудно-формационной принадлежности объектов служат особенности распределения в самородном золоте щёлочноземельных, редких щелочных и редкоземельных элементов. Надёжным геохимическим индикатором является коэффициент $Rb \times Cs \times Sr \times Ba / La \times Ce \times Pr \times Nd$, принимающий значения $1 \cdot 10^{-3}n - 1 \cdot 10^{-5}n$ для золото-полисульфидно-кварцевых месторождений и $1 \cdot 10^{-3}n - 10n$ – для золотокварцевых малосульфидных объектов.

5. Получены новые данные о распределении в самородном золоте PЗЭ. Установленные зависимости между $\Sigma PЗЭ$ и La/Er, Rb/Sr и δEu могут от-

ражать состав магматических пород, участвующих при формировании золото-полисульфидно-кварцевых месторождений Забайкальского края.

6. Установлены различия в составе золота, обусловленные региональной металлогенической специализацией регионов. Уральская и Алтайская золотоносные провинции характеризуются самыми высокими абсолютными содержаниями меди, Южно-Енисейская и Восточно-Забайкальская – свинца, Тывинская – цинка. Аномально высокие содержания урана и тория отмечены в самородном золоте Восточного Забайкалья в пределах Стрельцовского урановорудного района.

7. Повышение геологической эффективности при использовании элементов-примесей в качестве классификационного признака возможно путём дальнейшего накопления данных об их распределении в самородном золоте. Данные о геохимических особенностях самородного золота позволяют судить о рудно-формационной принадлежности проявлений коренного и россыпного золота на ранних стадиях геологоразведочного процесса. Данные изучения геохимических особенностей самородного золота могут быть также использованы при криминалистических исследованиях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Балашов Ю. А. Геохимия редкоземельных элементов. – М.: Наука, 1976. – 266 с.
2. Балашов Ю. А. Изотопно-геохимическая эволюция мантии и коры Земли. – М.: Наука, 1985. – 221 с.
3. Волков А. В., Егоров В. Н., Прокофьев В. Ю., Сидоров А. А., Горячев Н. А., Бирюков А. В. Месторождения золота в дайках Яно-Колымского пояса // Геология рудных месторождений. – 2008. – Т. 50, № 4. – С. 311–337.
4. Воробьев С. А. Информатика. Математическая обработка геолого-геохимических данных. – Барнаул: ИП Колмогоров И. А., 2016. – 266 с.
5. Золоторудные месторождения СССР в 5 тт. Т. 4. Геология золоторудных месторождений Востока СССР. – М.: ЦНИГРИ, 1988. – 264 с.
6. Ланцев И. П., Денисова Л. К. Элементы-примеси в золоте // Инструкция №141-с НСАМ. – М.: ВИМС, 1976. – 41 с.
7. Некрасова А. Н., Николаева Л. А., Миляев С. А., Яблокова С. В. Первые данные о распределении R3Э, Li, Rb, Cs, Sr, Ba в самородном золоте месторождений основных золотоносных провинций России // Доклады Российской академии наук. – 2010. – Т. 432, № 5. – С. 660–663.
8. Николаева Л. А., Миляев С. А., Яблокова С. В. Новые данные по геохимии самородного золота в месторождениях различных формаций // Материалы всероссийской конференции, посвященной столетию Н. В. Петровской. – М.: ИГЕМ РАН, 2010. – Т. II. – С. 103–105.
9. Николаева Л. А., Гаврилов А. М., Некрасова А. Н., Яблокова С. В., Шатилова Л. В. Самородное золото рудных и россыпных месторождений России: Атлас. – М.: Аквапель, 2015. – 200 с.
10. Николаева Л. А., Некрасова А. Н., Чижова И. А., Яблокова С. В. Количественная оценка типоморфных признаков самородного золота различных золоторудных формаций // Руды и металлы. – 1995. – № 5. – С. 20–25.
11. Перетяжко И. С., Савина Е. А. Тетра-эффекты в спектрах распределения редкоземельных элементов гранитоидных пород как индикатор процессов фторидно-силикатной жидкостной несмесимости в магматических системах // Петрология, 2010. – Т. 18, № 5. – С. 536–566.
12. Петровская Н. В. Самородное золото. – М.: Наука, 1973. – 347 с.
13. Справочник по геохимическим поискам полезных ископаемых / Под ред. А. П. Соловова. – М.: Недра, 1990. – 335 с.
14. Фогельман Н. А., Константинов М. М., Курбанов Н. К. Принципы систематики золоторудных месторождений для прогноза и поисков // Отечественная геология. – 1995. – № 3. – С. 31–41.
15. Hancock E. A., Thorne A. M., Morris P. A., Watling R. J., Cutten H. N. C. Mineralogy and trace element chemistry of lode and alluvial gold from the western capricorn orogen / Centre for Forensic Science. Geological Survey of Western Australia // Record. – 2009. – № 6. – 30 p.
16. Nikolaeva L. A. [et al.] Type chemistries of native gold from deposits of various styles // 34th International geological congress, Brisbane, 2012, Australia. – 2012. – V. 4. – P. 105–109.
17. Watling R. S. [et al.] Gold fingerprinting by laser ablation inductively coupled plasma mass spectrometry // Spectrochemical Acta. – 1994. – V. 49b, № 2. – P. 205–219.

REFERENCES

1. Balashov Yu. A. Geokhimiya redkozemel'nykh elementov [Geochemistry of rare earth elements], Moscow, Nauka Publ., 1976, 266 p.
2. Balashov Yu. A. Izotopno-geokhimicheskaya evolyutsiya mantii i kory Zemli [Isotope-geochemical evolution of the Earth's mantle and crust], Moscow, Nauka Publ., 1985, 221 p.
3. Volkov A. V., Egorov V. N., Prokof'ev V. Yu., Sidorov A. A., Goryachev N. A., Biryukov A. V. Mestorozhdeniya zolota v daikakh Yano-Kolym'skogo poyasa [Gold deposits in the dikes of the Yano-Kolyma belt], *Geologiya rudnykh mestorozhdenii* [Geology of Ore Deposits], 2008, V. 50, No 4, pp. 311–337. (In Russ.).
4. Vorob'ev S. A. Informatika. Matematicheskaya obrabotka geologo-geokhimicheskikh dannykh [Informatics. Mathematical processing of geological and geochemical data], Barnaul, IP Kolmogorov I. A. Publ., 2016, 266 p.
5. Zolotorudnye mestorozhdeniya SSSR v 5 tt. T. 4. Geologiya zolotorudnykh mestorozhdenii Vostoka SSSR [Gold deposits of the USSR in 5 vols. V. 4. Geology of gold deposits in the East of the USSR], Moscow, TsNIGRI Publ., 1988, 264 p.

6. Lantsev I. P., Denisova L. K. Elementy-primesi v zolote [Elements-impurities in gold], *Instruktsiya №141-s NSAM* [Instruction No. 141-c NSAM], Moscow, VIMS Publ., 1976, 41 p.
7. Nekrasova A. N., Nikolaeva L. A., Milyaev S. A., Yablokova S. V. Pervye dannye o raspredelenii RZE, Li, Rb, Cs, Sr, Ba v samorodnom zolote mestorozhdenii osnovnykh zolotonosnykh provintsii Rossii [The first data on the distribution of REE, Li, Rb, Cs, Sr, Ba in native gold from deposits of the main gold-bearing provinces of Russia], *Doklady Rossiiskoi Akademii nauk* [Reports of the academy of Sciences], 2010, V. 432, No 5, pp. 660–663. (In Russ.).
8. Nikolaeva L. A., Milyaev S. A., Yablokova S. V. Novye dannye po geokhimii samorodnogo zolota v mestorozhdeniyakh razlichnykh formatsii [New data on the geochemistry of native gold in deposits of various formations], *Materialy vserossiiskoi konferentsii, posvyashchennoi stoletiyu N. V. Petrovskoi* [Materials of the All-Russian Conference dedicated to the centenary of N. V. Petrovskaya], Moscow, IGEM RAN Publ., 2010, V. II, pp. 103–105. (In Russ.).
9. Nikolaeva L. A., Gavrilov A. M., Nekrasova A. N., Yablokova S. V., Shatilova L. V. Samorodnoe zoloto rudnykh i rossypnykh mestorozhdenii Rossii : Atlas [Native gold from ore and placer deposits in Russia], Moscow, Akvarel' Publ., 2015, 200 p.
10. Nikolaeva L. A., Nekrasova A. N., Chizhova I. A., Yablokova S. V. Kolichestvennaya otsenka tipomorfnykh priznakov samorodnogo zolota razlichnykh zolotorudnykh formatsii [Quantitative assessment of typomorphic features of native gold of various gold-bearing formations], *Rudy i metally* [Ores and Metals], 1995, No 5, pp. 20–25. (In Russ.).
11. Peretyazhko I. S., Savina E. A. Tetra-effekty v spektrakh raspredeleniya redkozemel'nykh elementov granitoidnykh porod kak indikator protsessov fluoridno-silikatnoi zhidkostnoi nesmesimosti v magmaticheskikh sistemakh [Tetra-effects in the distribution spectra of rare-earth elements of granitoid rocks as an indicator of fluoride-silicate liquid immiscibility in magmatic systems], *Petrologiya* [Petrology], 2010, V. 18, No 5, pp. 536–566. (In Russ.).
12. Petrovskaya N. V. Samorodnoe zoloto [Native gold], Moscow, Nauka Publ., 1973, 347 p.
13. Spravochnik po geokhimicheskim poiskam poleznykh iskopaemykh [Handbook of Geochemical Prospecting for Mineral Resources], Moscow, Nedra Publ., 1990, 335 p.
14. Fogel'man N. A., Konstantinov M. M., Kurbanov N. K. Printsipy sistematiki zolotorudnykh mestorozhdenii dlya prognoza i poiskov [Principles of taxonomy of gold deposits for forecasting and prospecting], *Otechestvennaya geologiya* [National Geology], 1995, No 3, pp. 31–41. (In Russ.).
15. Hancock E. A., Thorne A. M., Morris P. A., Watling R. J., Cutten H. N. C. Mineralogy and trace element chemistry of lode and alluvial gold from the western capricorn orogen, *Record*, 2009, No 6, 30 p.
16. Nikolaeva L. A. et al. Type chemistries of native gold from deposits of various styles, *34th International geological congress, Brisbane, 2012, Australia*, V. 4, pp. 105–109.
17. Watling R. S. et al. Gold fingerprinting by laser ablation inductively coupled plasma mass spectrometry, *Spectrochemical Acta*, 1994, V. 49b, No 2, pp. 205–219.

GEOCHEMICAL FEATURES OF NATIVE GOLD AS DIRECT SIGNS OF ORE FORMATION LODE AND ALLUVIAL GOLD OCCURRENCE TYPES

S. A. Milyaev (PhD, leading researcher¹)

G. G. Samosorov (PhD²)

S. V. Yablokova (PhD, senior researcher¹)

L. V. Shatilova (senior researcher¹)

N. N. Pozdnyakova (PhD, researcher¹)

¹ FSBI Central Research Institute of Geological Prospecting for Base and Precious Metals, Moscow

² FSS Center of Special Equipment Institute of Forensic Science, Moscow

The features of impurity element distribution in native gold of two ore formation gold deposit types are considered. A typomorphic set of elements for gold-polysulfide-quartz and gold-quartz low-sulfide mineralization is determined. Geochemical indicators for estimating ore formation types of native gold are offered. The differences in gold composition due to metallogenic specialization of regions are established. Data on the distribution of rare-earth elements in native gold are obtained, which allows to predict igneous rocks composition during gold-polysulfide-quartz deposit formation.

Keywords: impurity elements in native gold, geochemical indicators.

