

Литература

- Дистлер В. В., Кулагов Э. А., Служеникин С. Ф., Лапутина И. П. Закаленные сульфидные твердые растворы в рудах Норильского месторождения // Геология рудных месторождений. 1996. Т. 38. № 1. С. 41–53.
- Craig J. R., Kullerud G. Phase relations in the Cu-Fe-Ni system and their application to magmatic ore deposits // Economic Geology. 1969. Vol. 4. P. 344–358.
- Czamansky G. K., Moore J. G. Composition and phase chemistry of sulfide globules in basalt from the Mid-Atlantic Ridge rift valley near 37 N lat // Geological Society of America Bulletin. 1977. Vol. 88. № 4. P. 587–599.
- Genkin A. D., Evstigneeva T. L. Associations of platinum-group minerals of the Noril'sk copper-nickel sulfide ores // Economic Geology. 1986. Vol. 81. № 5. P. 1203–1212.
- Junge M., Wirth R., Oberthür T., Melcher F., Schreiber A. Mineralogical siting of platinum-group elements in pentlandite from the Bushveld Complex, South Africa // Mineralium Deposita. 2015. Vol. 50. № 1. P. 41–54.
- Mansur E. T., Barnes S.-J., Duran C. Textural and compositional evidence for the formation of pentlandite by peritectic reaction in massive sulphides of the Kharaelakh Intrusion, Polar Siberia, Russia // 13th International Platinum Symposium–2018. Polokwane, South Africa. 2018. P. 127–128.
- Peregoedova A., Ohnenstetter M. Collectors of Pt, Pd and Rh in a S-poor Fe–Ni–Cu sulfide system at 760 °C: experimental data and application to ore deposits // Canadian Mineralogist. 2002. Vol. 40. № 2. P. 527–561.
- Polovina J. S., Hudson D. M., Jones R. E. Petrographic and geochemical characteristics of postmagmatic hydrothermal alteration and mineralization in the J–M Reef, Stillwater Complex, Montana // Canadian Mineralogist. 2004. Vol. 42. № 2. P. 261–277.
- Zelenski M., Kamenetsky V. S., Mavrogenes J. A., Gurenko A. A., Danyushevsky L. V. Silicate-sulfide liquid immiscibility in modern arc basalt (Tolbachik volcano, Kamchatka): Part I. Occurrence and compositions of sulfide melts // Chemical Geology. 2018. Vol. 478. P. 102–111.

А. Ш. Хусаинова

*Институт геологии и минералогии СО РАН, г. Новосибирск
khusainova@igm.nsc.ru*

Признаки гипергенного роста самородного золота в отвалах полиметаллических месторождений (научный руководитель д.г.-м.н. Ю. А. Калинин)

Данная работа посвящена выявлению гипергенных признаков структур роста самородного золота в хвостохранилищах колчеданно-барит-полиметаллических месторождений. Объектами исследования являются хвостохранилища Урского рудного поля (Салаирский Кряж) и Змеиногорской золотоизвлекательной фабрики (ЗИФ) (Рудный Алтай). Особенность этих объектов заключается в том, что месторождения относятся к одному генетическому типу: золото в первичной руде присутствует как в самородном виде, так и в связанном виде в сульфидах [Болгов, 1937; Черепнин, 1953; Ковалев, 1969]. Длительное существование хвостохранилищ (более 80 лет), в которых происходили различные физико-химические и механические процессы преобразования вещества, способствовали формированию горизонта вторичного обогащения. В основании отвалов Ново-Урского и Белоключевского месторождений установлены

горизонты, обогащенные Au (0.6–11.0 г/т) и Ag (2.7–31.0 г/т). Из шлиховых концентратов этих горизонтов выделено значительное количество зерен самородного золота, изученных в работе.

Золото исследовалось с помощью методов сканирующей электронной микроскопии LEO VP 1430 (Carl Zeiss, Германия) INCA Energy SEM 350 (Oxford Instruments) и рентгеноспектрального микроанализа на приборе JEOL 01430VP (ИГМ СО РАН) в ЦКП многоэлементных и изотопных исследований СО РАН.

В результате исследований морфологии золота выделены следующие признаки, показывающие, что золото подвергалось процессам роста и укрупнения в гипергенной среде:

1) Присутствие нано- и микрочастиц золота на поверхности золота, в пленках гидроксидов Fe и Mn, глинистых минералов, а также барита. Частицы размером 200–300 нм имеют преимущественно округлую и/или вытянутую (червеобразную) форму. Они встречаются как одиночные зерна и их скопления, преимущественно в углублениях или неровностях, но также и на ровной гладкой поверхности золота (рис. 1а). Часто скопления нано- и микрочастиц связаны с пленками различного состава, глинистыми минералами и включениями барита (рис. 1б).

2) Наросты золота на поверхности с образованием более крупных агрегатов. Наросты выглядят как сростки золота (рис. 1в), которые начинают свой рост в углублениях или неровностях поверхности, а затем постепенно заполняют свободное пространство. Чаще всего отдельные зерна этих сростков имеют вытянутую червеобразную, реже округлую форму.

Еще одним типом наростов являются одиночные зерна, преимущественно, округлой формы на различных возвышенностях рельефа. Например, на золоте отмечается сетчатая поверхность, в узлах которой округлые частицы золота осаждаются на вершинах (рис. 1г). Затем поверхность этого золота сглаживается за счет процессов диффузии. Золото нарастает на гранях сетки. Еще примером является осаждение частиц золота на бугорчатые поверхности рельефа. С каждым последующим поступлением материала, «бугорки» увеличиваются, образуя своеобразные «дюны».

3) Губчатое золото, агрегаты которого образуются преимущественно в зоне гипергенеза [Николаева и др., 2003]. Губчатые образования отмечались на поверхностях золотин Ново-Урского месторождения, преимущественно на частицах кристаллического облика (рис. 1д). Они находились в углублениях и неровностях поверхности. Возможно, губчатое золото является промежуточным звеном роста между стадией формирования массивного однородного золота и новообразованного. Также губчатое золото связано на поверхности с пленками гидроксидов Fe и Mn, включениями барита, глинистых минералов, на которые золото также осаждается. В результате, включения минералов захватываются и поглощаются основной массой золота.

Губчатое золото было также обнаружено на золоте агрегатного строения, которое формируется за счет образования губчатых форм, укрупняющихся до глобул или отдельных зерен (рис. 1е). Частицы выглядят как агломераты, напоминающие по форме дендриты. По Б. С. Осовецкому [2013], «агрегатное» золото – это золото, которое состоит из отчетливо различимых составных фрагментов, обычно имеющих глобулярное строение, угловатых, шестоватых. Предположительно, такие частицы золота сформировались непосредственно в гипергенной среде, о чем свидетельствует присутствие многообразия нано- и микрочастиц золота. Такой тип золотин был обнаружен в отвалах Змеиногорской ЗИФ.

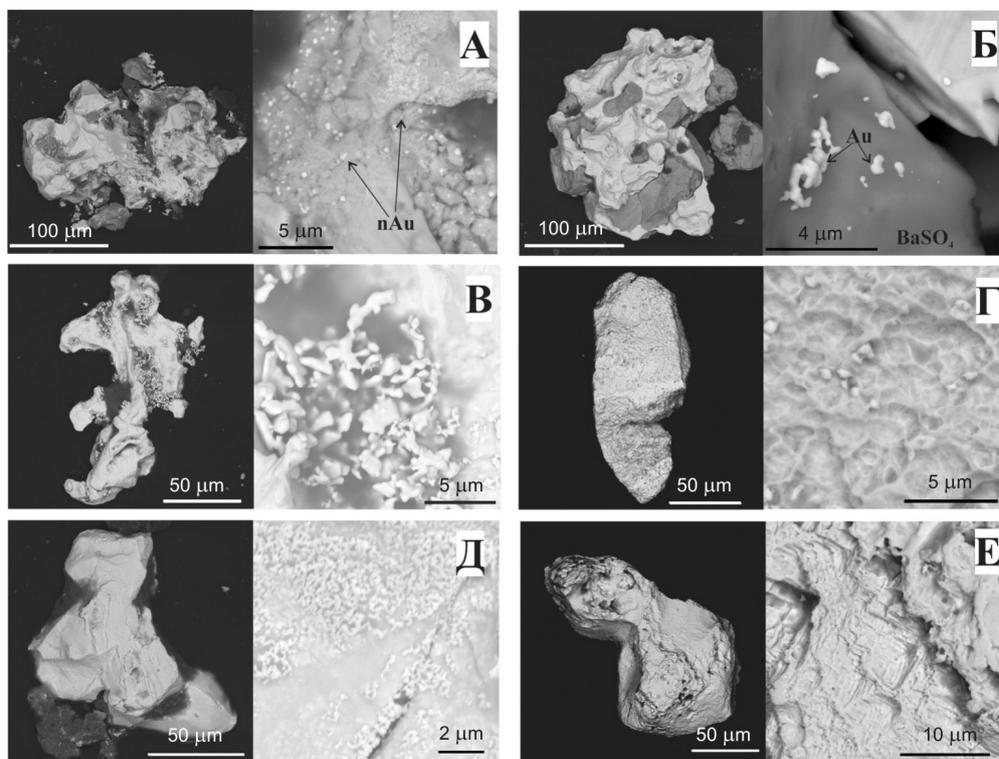


Рис. 1. Структуры роста в гипергенном золоте. BSE-фото.

Формирование такого золота происходит за счет образования одного или нескольких кристаллических центров, вокруг которых происходит рост основной массы золота. Золото осаждается из растворов или коллоидов в виде наноразмерных частиц округлой и/или вытянутой (червеобразной) формы на различные «затравки». Такими «затравками» могут служить соединения гидроксидов железа, глинистые минералы, барит, золото. Затем наночастицы укрупняются до микронных размеров, постепенно нарастая, наслаиваясь друг на друга, создавая своеобразные губчатые формы (рис. 2а–в). При их росте образуется естественная пористость (рис. 2г), которая неравномерно распределена в пространстве. В результате, эти скопления могут быть очень рыхлыми и хрупкими к механическим воздействиям. Параллельно с ростом нано- и микрочастиц, происходят процессы диффузии: губчатые скопления золота проникают друг в друга, формируя более массивные агрегаты (см. рис. 2б, в). Таким образом, образуются своеобразные частицы (глобулы) золота (рис. 2д). Их внешняя поверхность сглаживается с сохранением на некоторых участках пористости (см. рис. 2г). В результате формируется более крупный агломерат золота (рис. 2е), связующим веществом в котором, вероятно, является вторичное (коллоидное) неструктурированное золото. Оно распространено в агрегатах неравномерно и обуславливает локальную цементацию фрагментов структуры [Осовецкий, 2013].

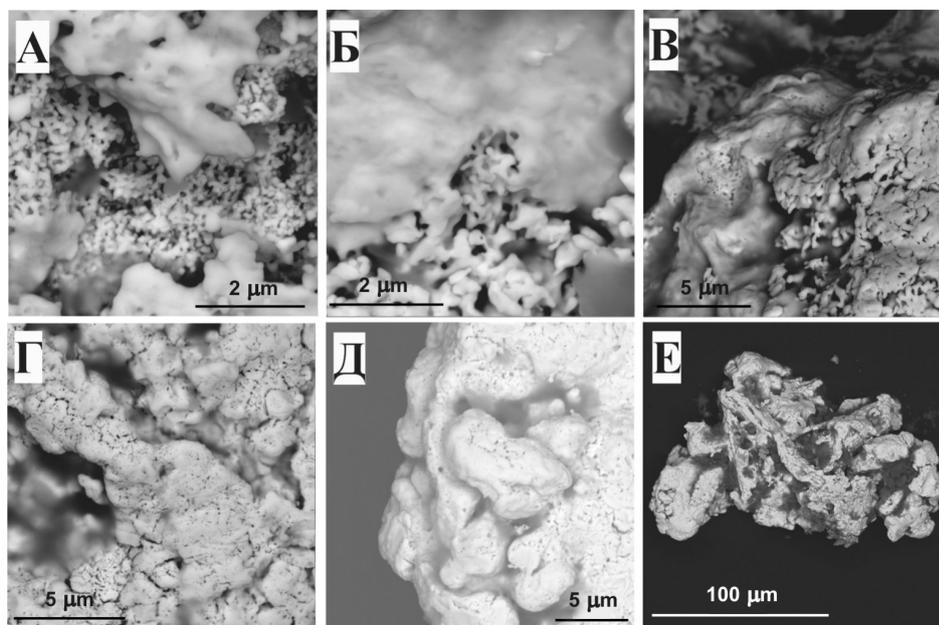


Рис. 2. Этапы формирования золота агрегатного строения из отвалов Змеиногорской ЗИФ: а) образование скоплений губчатого золота; б, в) ассоциация массивного однородного губчатого золота; г) пористая поверхность на золоте; д) фрагмент агрегатного зерна золота, состоящий из разных глобул; е) зерно агрегатного строения. BSE-фото.

Другая разновидность губчатых форм – это скопления губчатого золота, которое выглядит как «колонии микроорганизмов» (см. рис. 1д). Их особенностью является равномерное распределение по всей поверхности золота и равномерная толщина. Возможно, оно сформировалось при прижизненной деятельности микроорганизмов [Амосов, Васин, 1993]. Для этого типа золота характерны биогенные формы. Возможно, поэтому мы наблюдаем равномерное распределение новообразованного золота. Частицы размером 300–400 нм состоят из тонких вытянутых (как веретено) звеньев, которые формируют губчатую поверхность. Затем, как и в большинстве других случаев, происходит постепенное слияние (диффузия) двух поверхностей (основного массивного золота и наростов).

4) На поверхности золота из отвалов Ново-Урского и Белоключевского месторождений наблюдаются углубления воронкообразной формы (см. рис. 1е). Такие образования называются скелетными формами или, в зарубежной литературе, кристаллы Хоперра. Их особенностью являются полностью сформированные края кристаллов и незаполненное внутреннее пространство. Воронкообразная форма углублений возникает при преобладании диффузионного лимита в процессе роста [Краснова, Петров, 1997]. Рост скелетных форм, как известно, происходит в результате быстрого роста кристаллов, когда электрическое напряжение выше по краям и углам кристаллов, чем в центре. На формирование скелетных кристаллов может оказывать влияние и химический состав среды, т. е. эти процессы идут и при смешанном лимите процесса роста (с преобладанием диффузионного лимита).

Таким образом, обнаруженные структуры роста на поверхности золота указывают на его гипергенные преобразования: укрупнение и рост в хвостохранилище. Сложное сочетание одновременных агрегатов золота свидетельствует о длительном процессе преобразования и неоднократном изменении условий среды минералообразования. Известно, что на территории Урского рудного поля добыча золота осуществлялась методом кучного выщелачивания, а на момент складирования отвалов свободного самородного золота в них не было. В конечном итоге, в основании отвала сформировался горизонт вторичного золотого обогащения, сложенный «гипергенным» золотом.

Работа выполнена по государственному заданию ИГМ СО РАН.

Литература

- Амосов Р. А., Васин С. Л.* Золотые микрофоссилии // Руды и металлы. 1993. № 3. С. 101–107.
- Болгов Г. П.* Сульфиды Салаира, Урская группа полиметаллических месторождений // Известия Томского индустриального института. 1937. Т. 53. Вып. 11. С. 45–96.
- Ковалев К. Р.* Особенности формирования руд колчеданно-полиметаллических месторождений Северо-Восточного Салаира и Восточной Тувы. Дис. ... канд. геол.-мин. наук. Новосибирск, 1969.
- Краснова Н. И., Петров Т. Г.* Генезис минеральных индивидов и агрегатов. СПб: Невский курьер, 1997. 228 с.
- Николаева Л. А., Гаврилов А. М., Некрасова А. Н., Яблокова С. В., Шатилова Л. В.* Атлас самородного золота рудных и россыпных месторождений России. М.: ЦНИГРИ, 2003. 184 с.
- Осовецкий Б. М.* Природное нанозолото. Пермь: Пермский государственный национальный исследовательский университет, 2013. 176 с.
- Черепнин В. К.* К вопросу о составе и генезисе руд Урских месторождений Салаира // Известия Томского политехнического института. 1953. Т. 90. С. 56–68.