

УДК 549.283

О МЕТОДИКЕ ИЗУЧЕНИЯ НАНОЗОЛОТА

Осовецкий Б.М.

Естественнонаучный институт ГОУ ВПО «Пермский государственный национальный исследовательский университет», Пермь, Россия (614990, Пермь, ул. Генкеля, 4, e-mail: opal@psu.ru

Нанозолото довольно широко распространено в корях выветривания, развитых на месторождениях золото-сульфидной и золото-сульфидно-кварцевой формаций, реже – в промежуточных коллекторах золота и древних россыпях. Основными типами выделений наночастиц золота являются одиночные индивиды и их агрегаты различной формы, приуроченные к углублениям микро- и нанорельефа поверхности зерен россыпного металла. Нанозолото выделяется из сульфидов в процессе их химического выветривания и превращения в гидроксиды железа. В дальнейшем оно осаждается на поверхности россыпеобразующих зерен золота благодаря высокой удельной поверхностной энергии наночастиц или под влиянием процессов природной амальгамации. Предлагаемая методика изучения природного нанозолота включает три последовательных этапа. Первый этап должен обеспечить выбор объектов, в которых ожидается наиболее высокая концентрация нанозолота. К ним относятся, в частности, рудопроявления с высокой долей пылевидных частиц свободного золота. Второй этап предусматривает визуализацию частиц нанозолота с применением высокоразрешающей электронной микроскопии. Третий этап включает диагностику нанозолота и определение его химического состава с применением микрозондового анализа.

Ключевые слова: нанозолото, электронная микроскопия, микрозондовый анализ.

ON THE METHODS OF NANO-GOLD INVESTIGATION

Osovetskiy B.M.

Natural-scientific Institute of Perm State National Investigation University, Perm, Russia (614990, Perm, street Genkel, 4), e-mail: opal@psu.ru

Nano-gold is rather wide-spread in the weathering crust of deposits of gold-sulfide and gold-sulfide-quartz formations, seldom in the intermediate collectors of gold and ancient placers. The main types of nano-gold forms are individual particles and their aggregates of various configurations situated at the hollows of surface micro- and nano-relief of placer gold grains. Nano-gold is extracted from sulfides during the process of their chemical alteration and transition to hydroxides of iron. Then nano-gold particles precipitate in the surface of placer gold grains due to their huge surface energy or under influence of natural amalgamation process. The offered method of natural nano-gold investigation includes three successive stages. The first one has to make sure the choice of objects with high concentration of nano-gold particles. For instance, they may be deposits with big percentage of auriferous gold particles. The second stage foresees visual observation of nano-gold particles in electron microscopes with very high resolution. The third stage includes diagnostics of nano-gold and definition of its chemical composition by microprobe analysis.

Key words: nano-gold, electron microscopy, microprobe analysis.

Введение

Полученные в последние годы данные свидетельствуют о достаточно широком распространении в природных объектах наночастиц самородного золота [4]. Они особенно характерны для кор выветривания, развитых на месторождениях золото-сульфидной и золото-сульфидно-кварцевой формаций, а также для промежуточных коллекторов, представляющих собой переотложенные коры выветривания. В меньшей степени нанозолото встречается в древних россыпях, расположенных в особых геотектонических обстановках.

Цель исследования

В связи с этим особую актуальность приобретает вопрос о применении эффективной методики изучения наноразмерного золота. Данная проблема чрезвычайно важна при исследовании объектов, которые в настоящее время принято называть «нетрадиционными» [7]. Для таких объектов характерно присутствие тонких и пылевидных индивидов золота размером менее 100 мкм. При этом в гранулометрическом спектре зерен благородного металла значительную долю составляют частицы крупностью менее 10 мкм. Последние с трудом различаются при большом увеличении под бинокулярным микроскопом с хорошей оптикой.

Присутствие большого количества таких частиц, выделяемых на лабораторной стадии из концентратов гравитационного обогащения проб, может служить показателем вероятного нахождения в объекте еще более мелких индивидов. Известно, что даже наиболее совершенными аппаратами, основанными на гравитационном способе концентрации золота, извлечение тонкого (100–50 мкм) металла обеспечивается на уровне порядка 50%. Пылевидный металл (50–10 мкм) извлекается значительно хуже, а золото крупностью менее 10 мкм – на уровне нескольких процентов. Отсюда можно сделать вывод о том, что при фактическом обнаружении частиц золота размером менее 10 мкм реальное их количество может быть значительно более высоким.

Объекты и методы исследования

Объектами наших исследований, в процессе которых нанозолото было обнаружено в значительных количествах, являлись коренные и россыпные месторождения и рудопроявления золота России и ряда зарубежных стран (в частности, Канады, Камбоджи, Казахстана, Узбекистана). Основное внимание было уделено россыпным месторождениям Урала, где в общей сложности изучено золото около 20 объектов [4].

На полевой стадии производилось обогащение шлиховых проб и проб объемом до 1 м³ на винтовом шлюзе или сепараторе с получением конечного концентрата массой до нескольких килограммов. В лаборатории из шлихов и концентратов с применением ряда операций (магнитной и электромагнитной сепарации, домывки в чашке с бромформом до ультраконцентрата и др.) выделялись частицы свободного золота. Они исследовались под электронными микроскопами (полевой сканирующий электронный микроскоп JSM 7500F с холодной эмиссией и сканирующий электронный микроскоп JSM 6390LV фирмы JEOL, последний с приставками для микронзондового анализа) с изучением характера поверхности и химического состава.

Результаты исследований

Основным результатом исследований являлось обнаружение наночастиц золота, расположенных на поверхности многих зерен россыпного металла. Наиболее характерными

формами выделений нанозолота являются отдельные наночастицы и их агрегаты различной конфигурации (ветвистые, гроздевидные, сотовые, уплощенные, удлиненные и т.д.). Иногда агрегаты наночастиц золота образуют сплошные плотного сложения пленки, налеты и корочки. Все они приурочены исключительно к отрицательным формам нано- и микрорельефа поверхности золотин (трещинам, бороздам, углублениям и т.д.).

Все наночастицы золота являются новообразованным металлом, постепенно оседавшим на поверхность россыпеобразующих зерен в ходе процессов корообразования. Под влиянием агентов химического выветривания золотосодержащие сульфиды (пирит, арсенопирит, пирротин, халькопирит и др.) окисляются и переходят в гидроксиды железа. Присутствующее в них золото (в т.ч. «невидимое») высвобождается и получает возможность свободно мигрировать в коре выветривания [2, 3, 6]. Тот факт, что на поверхности зерен золота в корах выветривания вышеуказанных формаций постоянно наблюдаются наночастицы металла, свидетельствует о широком распространении в сульфидах частиц золота нанометровой размерности (т.е. от 0,1 до 0,001 мкм).

Оседание наночастиц золота на поверхность россыпного металла обусловлено их исключительно высокой удельной поверхностной энергией и химической активностью [1, 5]. Кроме того, этому способствует процесс природной амальгамации, который развивается в зоне глубинных разломов благодаря поступлению по ним низкотемпературных флюидов с ртутью.

Опыт проведенных работ позволяет нам рекомендовать следующую методику изучения нанозолота в природных объектах, включающую три последовательные стадии.

На *первой стадии* основной задачей является выбор соответствующего объекта, в котором с наибольшей вероятностью следует ожидать присутствие нанозолота. При этом необходимо принимать во внимание формационный тип коренного рудопоявления, возраст и сохранность коры выветривания, гранулометрический состав зерен металла, результаты шлихового опробования в сопоставлении с данными прецизионных методов (атомно-абсорбционного, пробирного, нейтронноактивационного, масс-спектрометрического и др.).

Можно предположить, что основная масса частиц нанозолота рассеивается в осадочной оболочке Земли. Отсюда, необходимо на начальном этапе обратить особое внимание и исследовать наиболее вероятные зоны их концентрации в пределах перспективного объекта. Таким зонами являются, в частности, небольшие по площади участки поверхности крупных зерен россыпного металла, представленные различными отрицательными микроформами.

На *второй стадии* осуществляется непосредственное наблюдение наночастиц золота в сканирующем электронном микроскопе с высоким разрешением. Нами показано, что данная задача вполне корректно решается с применением увеличений порядка 100-300 тысяч раз,

что позволяет надежно различать отдельные наночастицы золота размером до 10 нм (рис. 1, 2). На данном уровне может быть охарактеризована морфология наночастиц золота и их агрегатов, а также определен гранулометрический состав [4].

В то же время применение еще более высокого увеличения (свыше 300 тысяч раз) показывает, что нередко даже столь малые наночастицы состоят из еще более мелких по размеру образований. Характерно, что отдельные наночастицы в агрегатах цементируются, вероятно, сплошной массой неструктурированного вторичного золота (см. рис. 2). Эти данные свидетельствуют о многоуровневом строении агрегатов наночастиц золота и длительном по времени процессе их формирования.

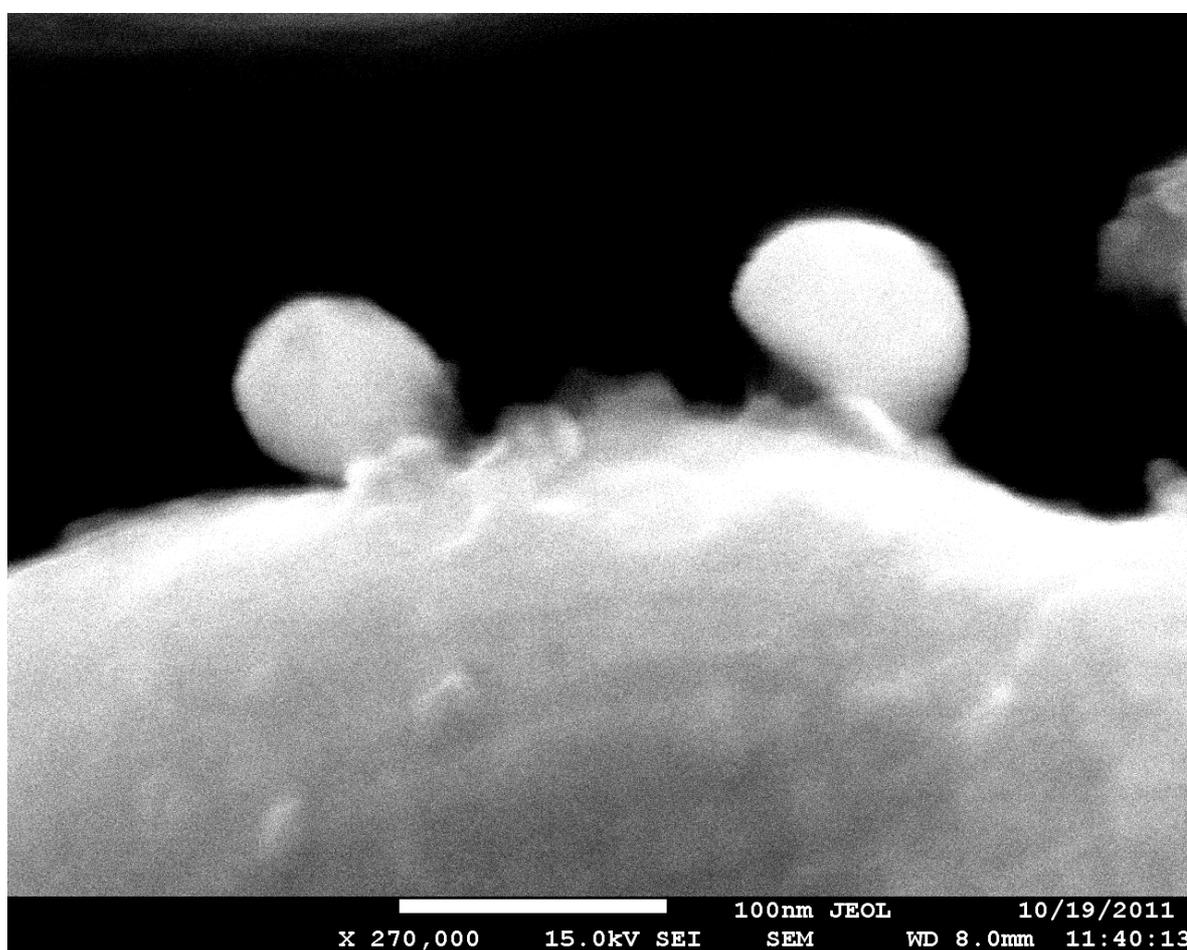


Рис. 1. Одиночные наночастицы золота размером 70 нм на стенке трещины на поверхности рыхлого металла

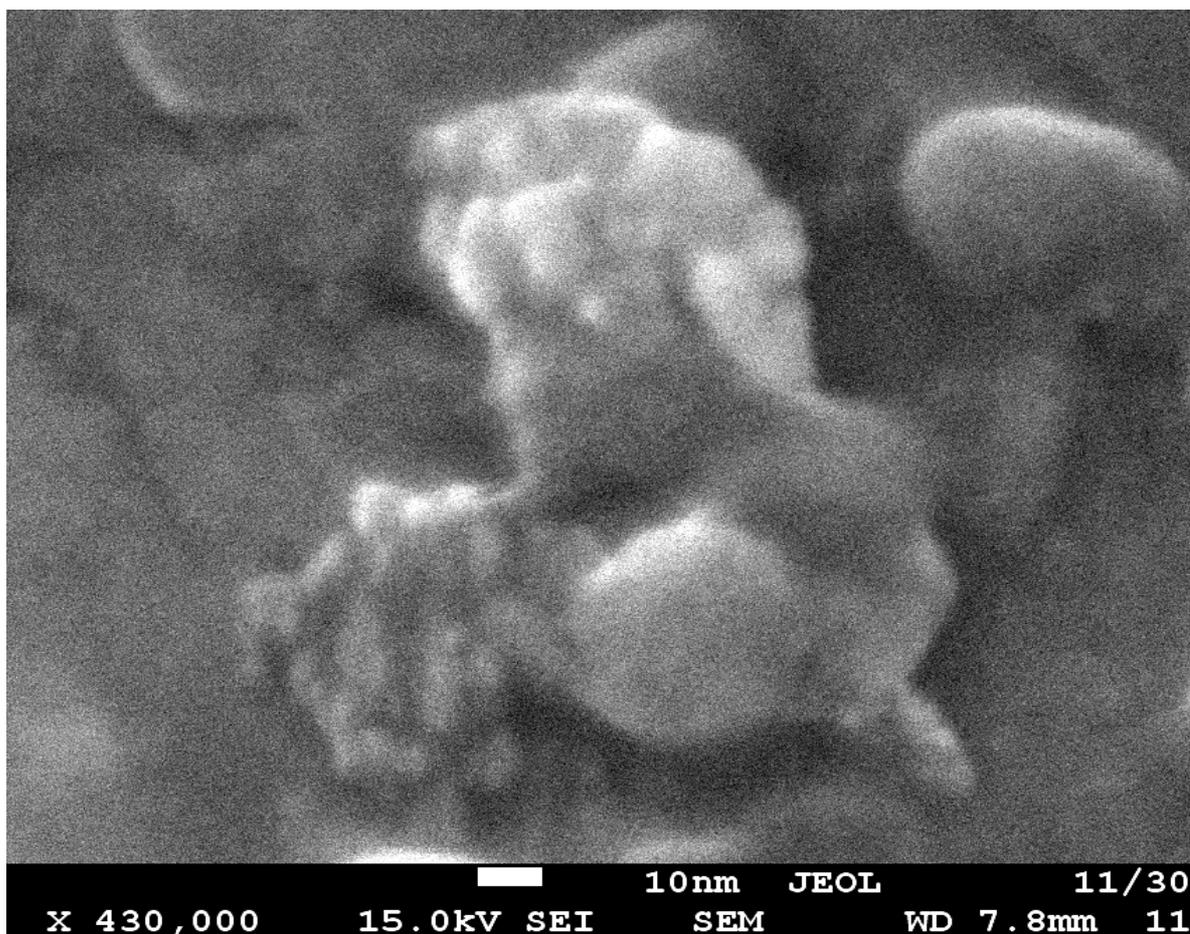


Рис. 2. Частицы золота размером 5-10 нм в наноагрегатах

Детальное изучение структуры наноагрегатов золота возможно с применением атомно-силового, туннельного или ближнепольного микроскопов. Они позволяют различить частички золота размером в десятые доли нанометра.

На *третьей стадии* одновременно с точной диагностикой наночастиц производится определение их химического состава. Необходимо прежде всего убедиться, что мы имеем дело именно с золотом. Тем самым достигается разбраковка наночастиц по вещественному составу и исключение из рассмотрения похожих на золото по морфологии и другим признакам (например, вещественному контрасту) металлов и интерметаллидов.

Особенности химического состава наночастиц золота могут свидетельствовать о геохимической обстановке в среде минералообразования и процессе формирования агрегатов. Применение микронзондового анализа для решения этой задачи связано с некоторыми ограничениями. Во-первых, диаметр электронного зонда (порядка 1 мкм) слишком велик и не позволяет получить данные о химическом составе одиночной частицы нанозолота, диаметр которой, по крайней мере, на порядок меньше.

Во-вторых, теория микрозондового анализа разработана для идеально гладкой поверхности твердого тела, что требует изготовления тщательно отполированной шайбы. Однако ее изготовление приводит к полному уничтожению наночастиц золота, которые механическим путем легко удаляются с поверхности зерен россыпного металла.

Нами предлагается определять с поверхности средний химический состав группы наночастиц золота, находящихся в структуре плотного агрегата. При этом суммарное содержание элементов обычно снижается до 70-80%, что приводит к необходимости нормализации. Часть анализов с меньшим суммарным содержанием элементов лучше не принимать во внимание. Кроме того, при изучении ртутистых фаз нанозолота приходится учитывать испарение ртути в ходе микрозондового анализа [4].

Применение такой методики оказалось достаточно эффективным. Результаты показали, что наночастицы обычно представлены высокопробным самородным золотом, серебристым золотом, ртутистым золотом и амальгамами. В составе агрегатов присутствует много нетипичных для золота литофильных элементов (O, Si, Al, Fe, Ti, Ca, Mg, Mn), а также K, Na, Cl. Эти элементы могут свидетельствовать о составе цементирующего золота вещества.

Выводы

Нанозолото является важной составной частью ресурсного потенциала россыпных месторождений золота, приуроченных к корам выветривания пород золото-сульфидной и золото-сульфидно-кварцевой формаций. Для его изучения необходимо применять комплекс современных методов исследования, включающих опробование и обогащение проб в полевых условиях, особые способы пробоподготовки в лаборатории, методы электронной микроскопии высокого разрешения и микрозондовый анализ.

Результаты исследований позволяют выделить два основных механизма концентрации нанозолота в природе: 1) осаждение на поверхность зерен россыпного металла благодаря высокой удельной поверхностной энергии наночастиц и 2) процесс природной амальгамации.

Детальное изучение нанозолота в природных объектах позволит в будущем получить более полное представление о его распространенности в осадочной оболочке Земли и законах миграции. Полученные сведения могут быть использованы в нанотехнологии при разработке способов концентрации и извлечения нанозолота из руд «нетрадиционных» объектов.

Исследования выполнены при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант РФФИ № 11-05-96002-р_урал_а).

Список литературы

1. Бахтизин Р.З. Сканирующая электронная микроскопия – новый метод изучения поверхности твердых тел // Соросовский образоват. журн. – 2000. – № 11. – С. 83-89.
2. Николаева Л.А. «Новое» золото в россыпях Ленского района // Труды ЦНИГРИ. – М., 1958. – Вып. 25, кн. 2. – С. 19-122.
3. Новгородова М.И., Генералов М.Е., Грубкин Н.В. Новое золото в корях выветривания Южного Урала (Россия) // Геология рудных месторождений. – 1995. – Т. 37, № 1. – С. 40-53.
4. Осовецкий Б. М. Наноскульптура поверхности золота. Пермь: Пермский госуниверситет, 2012. – 232 с.
5. Панкратов С., Панов В. Поверхности твердых тел // Наука и жизнь. – 1986. – № 5-6. – С. 34-65.
6. Петровская Н. В. Самородное золото. – М.: Наука, 1973. – 345 с.
7. Савельева К. П., Баранников А. Г. Золотое оруденение нетрадиционного типа в зоне Серовско-Маукского глубинного разлома на Северном Урале // Литосфера. – 2006. – № 2. – С. 157-166.

Рецензенты:

Наумов Владимир Александрович, доктор геолого-минералогических наук, директор Естественнонаучного института Пермского государственного национального исследовательского университета, г. Пермь.

Ибламинов Рустем Гильбрахманович, доктор геолого-минералогических наук, доцент, заведующий кафедрой минералогии и петрографии Пермского государственного национального исследовательского университета, г. Пермь.