

21. Пальянова Г.А., Колонин Г.Р. Геохимическая подвижность Au и Ag в условиях гидротермального переноса и отложения (Термодинамическое моделирование) // Геохимия. 2007. №8. С. 814—828.
22. Пальянова Г.А., Савва Н.Е. Генезис сульфидов золота и серебра на месторождении Юное (Магаданская обл., Россия) // Геология и геофизика. 2009. (в печати)
23. *Shvarov Yu. V., Bastrakov E.N.* HCh: a software package for geochemical equilibrium modelling. User's Guide. AGSO Record 1999/25. Canberra. 1999
24. *Helgeson H.C.* Mass transfer among minerals and hydrothermal solutions // *Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits* 1976. (2 edition). (H.L.Barnes - ed.). John Wiley & Sons, N.-Y. P.568-610.
25. *Борисов М.В.* Геохимические и термодинамические модели жильного гидротермального рудообразования. М.: Научный мир, 2000. 360 с.
26. *Гричук Д.В.* Термодинамические модели субмаринных гидротермальных систем. М.: Научный мир, 2000. 304 с.
27. Краткий справочник по геохимии. М.: Недра, 1977. 184 с.
28. *Drummond S.E., Ohmoto H.* Chemical evolution and mineral deposition in boiling hydrothermal systems // *Econ. Geol.*, 1985. V.89. P.126—147.
29. *Spycher N.F., Reed M.H.* Evolution of a broadlands-type epithermal ore fluid along alternative P-T paths: implications for the transport and deposition of base, precious and volatile metals // *Econ. Geology*. 1989. V. 84. P. 328—359.
30. *Thiensch P.C., Williams-Jones A. E., Clark J.R.* Mineralization and ore controls of the Shasta Au-Ag deposit, Toadoggonne River district, British Columbia // *Mineralium Deposita*. 1997. V.32. P.44—57.
31. *Nagaseki H. and Hayashi. K.-I.* Experimental study of the behavior of copper and zinc in a boiling hydrothermal system // *Geology*. 2008. V. 1, 36(1), P. 27—30.
32. *Zein D.Yu., Migdisov A.A., Williams-Jones A. E.* The solubility of gold in hydrogen sulfide gas: an experimental study // *Geochim. Cosmochim. Acta*. 2007. V.71. P. 3070—3081.
33. *Heinrich C.A., Guenther D., Audetat A., Ulrich T., Frischknecht R.* Metal fractionation between magmatic brine and vapor, determined by microanalysis of fluid inclusions // *Geology*. 1999. V. 27. N 8. P. 755—758.
34. *Taran Yu.A., Bernard A., Gavilanes J.C., Africano F.* Native gold in mineral precipitates from high-temperature volcanic gases of Colima volcano, Mexico // *Appl. Geochem.* 2000. 15. P. 337—346.
35. *Williams-Jones A. E., Heinrich C. A.* 100th Anniversary Special Paper: Vapor Transport of Metals and the Formation of Magmatic-Hydrothermal Ore Deposits // *Econ. Geol.* 2005. V. 100. N7. P. 1287 – 1312.
36. *Simon A.C., Pettke T., Candela P.A., Piccoli P.M., Heinrich C.* Copper partitioning in a melt–vapor–brine–magnetite–pyrrhotite assemblage // *Geochim. Cosmochim. Acta*. 2006. V. 70. N 22. P. 5583—5600.
37. *Simon A.C., Pettke T., Candela P.A., Piccoli P.M., Heinrich C.* The partitioning behavior of silver in a vapor – brine – rhyolite melt assemblage // *Geochim. Cosmochim. Acta*. 2008. V.72. N6. P. 1638-1659.
38. *Simon A.C., Pettke T., Candela P.A., Piccoli P.M., Heinrich C.A.* The partitioning behavior of As and Au in S-free and S-bearing magmatic assemblages // *Geochim. Cosmochim. Acta*. 2007. V. 71. N7. P. 1764—1782
39. *Pokrovski G.S., Borisova A.Yu., Harrichoury J.C.* The effect of sulfur on vapor–liquid fractionation of metals in hydrothermal systems // *Earth and Planetary Science Letters*. 2008. V. 266. N3-4. P. 345—362. 1999. № 6. P. 646—652.

## ТОНКОДИСПЕРСНОЕ ЗОЛОТО В РУДАХ МЕСТОРОЖДЕНИЯ МАЛОМЫР И ВОЗМОЖНОСТЬ ЕГО ИЗВЛЕЧЕНИЯ

**Ожогин Д.О.<sup>1</sup>, Дубинчук В.Т.<sup>1</sup>, Орлова Н.И.<sup>1</sup>, Ружсицкий В.В.<sup>1</sup>, Власов Н.Г.<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> ФГУП «ВИМС», г. Москва; <sup>2</sup>ОАО “Покровский рудник”, г. Благовещенск

Посвящается минералогу Лидии Павловне Викуловой

В Приамурье золотодобыча ведется уже не одну сотню лет, но официально она была зарегистрирована лишь в 1867 году и продолжается до настоящего времени. Доля рудного (коренного) золота составляла менее 6% от общей золотодобычи. Ситуация кардинально изменилась в начале XXI века, когда в эксплуатацию было введено Покровское месторождение. За неполные десять лет доля добычи коренного золота выросла в три раза и достигла практически 50% от общей массы добываемого в Приамурье золота. Начиная с 2003 года, прослеживается явное снижение добычи золота из россыпей. Дальнейшую золотодобычу в этом регионе связывают с интенсификацией разработки, главным образом, коренных золоторудных месторождений, общие запасы которых на сегодняшний день составляют первые сотни тонн, а прогнозные ресурсы достигают тысячи тонн.

Золоторудное месторождение Маломыр было выявлено в конце 1960-х. До 2000 года проводились поисково-оценочные работы на этом месторождении. В результате проведенных работ выявлены основные особенности геологического строения месторождения и установлена его принадлежность к золотосульфидной формации. Месторождение Маломыр находится на северо-востоке Амурского региона в Верхнеселемджинском золоторудном районе, в 80 км западнее районного центра Экимчан.

Маломырское рудное поле расположено в западной части Селемджино-Кербинской структурно-формационной зоны, объединяющей зонально-метаморфизованные в филлитовой, зелёносланцевой фациях вулканогенные и терригенные отложения палеозоя, образующие систему линейных, купольных и межкупольных складчатых структур и занимающие самую западную часть Приохотского звена Монголо-Охотской геосинклинальной складчато-надвиговой системы (ГСНС).

Комплекс континентально-осадочных метаморфизованных отложений, слагающих Маломырское рудное поле, отнесен к златоустовской свите среднего карбона, образования которой в пределах месторождения представлены преимущественно переслаиванием сланцев различного состава: кварц-полевошпат-слюдистых, полевошпат-кварц-слюдистых, хлорит-полевошпат-кварцевых, углерод-слюдисто-кварцевых, слудисто-кварцевых с редкими прослоями кварцитов, а также кварц-полевошпат-слюдисто-карбонатных и эпидот-хлорит-полевошпат-карбонат-кварцевых сланцев. Мощности прослоев вышеперечисленных пород колеблются от первых сантиметров до первых метров, редко достигают 10-12 м. В нижних горизонтах отмечаются дайки дацитов и андезитов, мощность которых изменяется от десятков сантиметров до 5-7 метров. Рудовмещающие породы подвержены интенсивным прерудным кварц-серицитовым изменениям. На измененные породы накладывается собственно рудная -золотосульфидная минерализация. Оруденение приурочено к внутренним частям ореолов развития кварц-серицитовых метасоматитов, распространение которых контролируется тектоническими нарушениями. Детального изучения минерального состава и строения руд и вмещающих пород до настоящего времени практически не проводилось. И только в последние годы рудная минерализация достаточно подробно изучена рядом исследователей [1, 2].

Целью проведенных нами электронно-микроскопических исследований являлось выявление форм нахождения тонкодисперсного золота, приуроченного к сульфидам (пириту и арсенопириту) и кварцу, извлечение которого весьма затруднительно при технологической переработке рассматриваемых руд.

Исследования проводились методами растровой и просвечивающей электронной микроскопии соответственно. В просвечивающем электронном микроскопе Теспаи-12 (Голландия) изучались угольные реплики с экстракцией и суспензионные препараты. Диагностика выявленных минеральных фаз проводилась микродифракционно. В растровом электронном микроскопе Tesla BS-301(Словения), оснащенный микрозондовой приставкой, изучались фрагменты руд, зафиксированные на просмотровой шайбе.

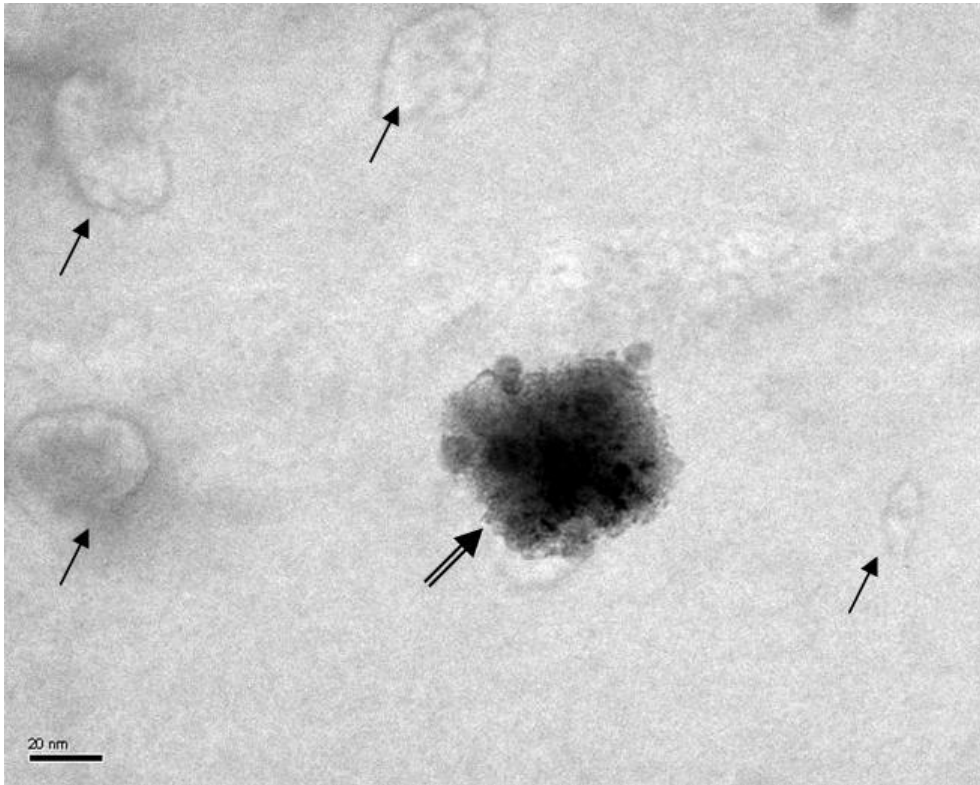
Было изучено несколько образцов руды, отобранных с глубины 76,6 м скважины 30-Н, вскрывшей рудное тело. Исследованная руда относится к халькопирит-сфалерит-арсенопирит-пиритовой парагенетической минеральной ассоциации, типичной для продуктивной подстадии рудной стадии. Вмещающими породами этого парагенезиса являются метасоматиты типа березитов.

В исследованной руде были обнаружены единичные зерна «видимого» самородного золота, размеры которых обычно составляли первые миллиметры. Более мелкие выделения (размером десятки – сотни микрометров) самородного золота, образующего тонкую неравномерную вкрапленность, преимущественно, в кварце, фиксировались с помощью растрового электронного микроскопа (РЭМ). Наряду с этими обособлениями, в зернах кварца и пирита с помощью микрозондовой приставки постоянно отмечались незначительные (на пределе чувствительности энергодисперсионного спектрометра) повышенные концентрации золота. Это («невидимое») золото, в силу малого разрешения РЭМ, визуализировать не удалось.

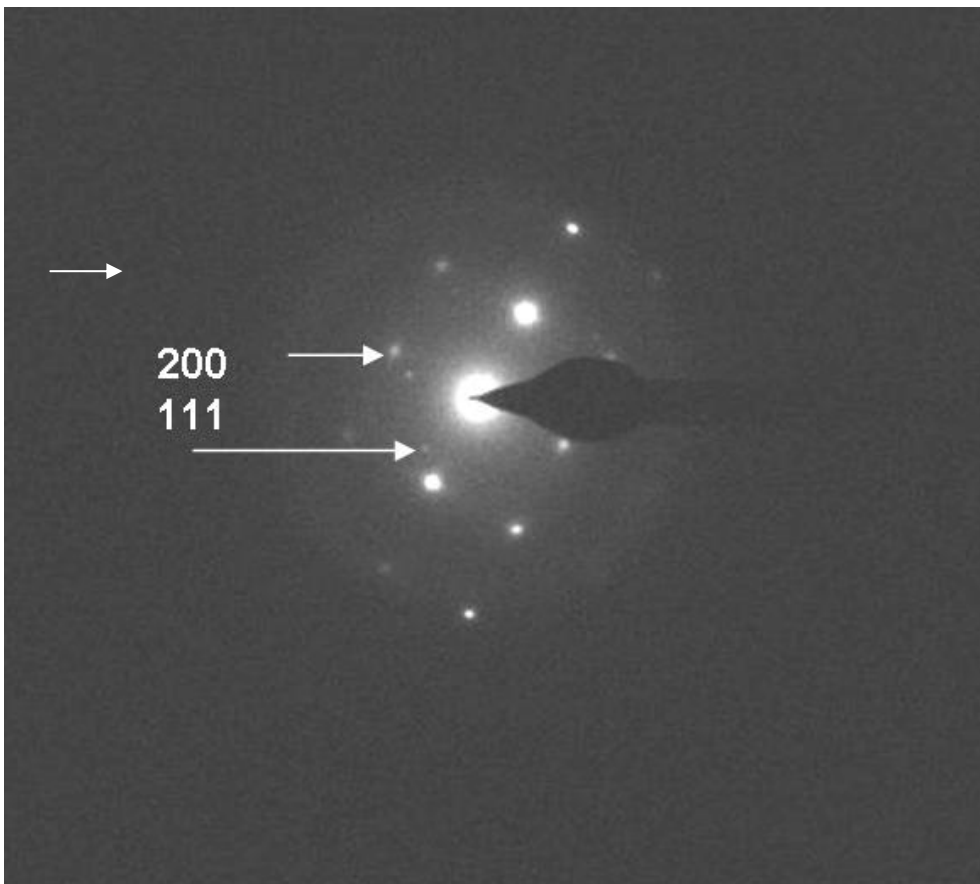
Исследование таких участков зерен пирита и кварца в просвечивающем электронном микроскопе при высоких разрешениях позволило выявить в них тонкодисперсные образования самородного золота нанометровой размерности.

На поверхности скола зерна пирита фиксируются тончайшие округлые образования, нередко приобретающие подобие огранки (рис. 1). Как правило, вещество таких обособлений не извлекается на реплику. Однако в единичных случаях экстракции вещества устанавливается его неоднородность, выражающаяся в уплотнении внутренних частей, сложенных агрегатом сросшихся тонкодисперсных округлых индивидов. Точечные микродифракционные картины, полученные с этого агрегата, позволили отнести его к самородному золоту (рис. 1а). На микродифракционной картине золота с осью зоны [001] присутствует также несколько точечных отражений (111).

Иногда на сколах пирита отмечаются структурные элементы, имеющие квадратные очертания, напоминающие фигуры роста более поздних поколений пирита (рис. 2). На рисунках 2 (показано цифрой 1) и 3 (крупный план) четко видно, что в пирите присутствуют неравномерно распределенные в матрице минерала, а также оконтуривающие его скопления, представленные агрегатом тонкодисперсных выделений кубической, реже округлой и слабо удлиненной формы, размер которых обычно варьирует в пределах 10 – 100 нм. Нередко они сростаются и образуют тончайшие сплошные уплощенные пленочные - чешуйчатые обособления. С экстрагированных на реплику выделений получены четкие кольцевые микродифракционные картины самородного золота (рис. 3а), на которых присутствуют отдельные точечные отражения (200) пирита.



**Рис. 1.** Реплика с поверхности скола зерна пирита. Тончайшие округлые образования самородного золота (показано стрелками), нередко приобретающие подобие огранки (показано двойной стрелкой). С извлеченных на реплику частиц получена микродифракционная картина рис. 1а



**Рис. 1а.** Монокристалльная микродифракционная картина самородного золота с извлеченной на реплику частицы (показано на рис. 1 двойной стрелкой). На микродифракционной картине (МДК) самородного золота с осью зоны  $[001]$  присутствуют отдельные точечные отражения  $(111)$

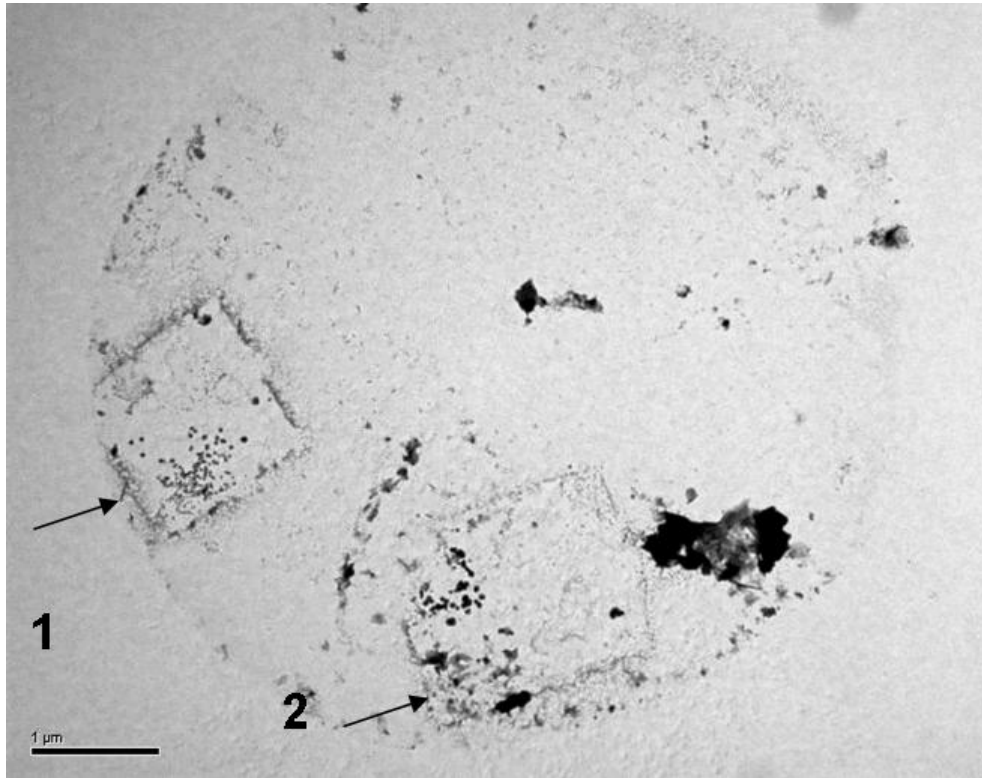


Рис. 2. Скопления самородного золота в порфиробластовых выделениях пирита, имеющих квадратные очертания

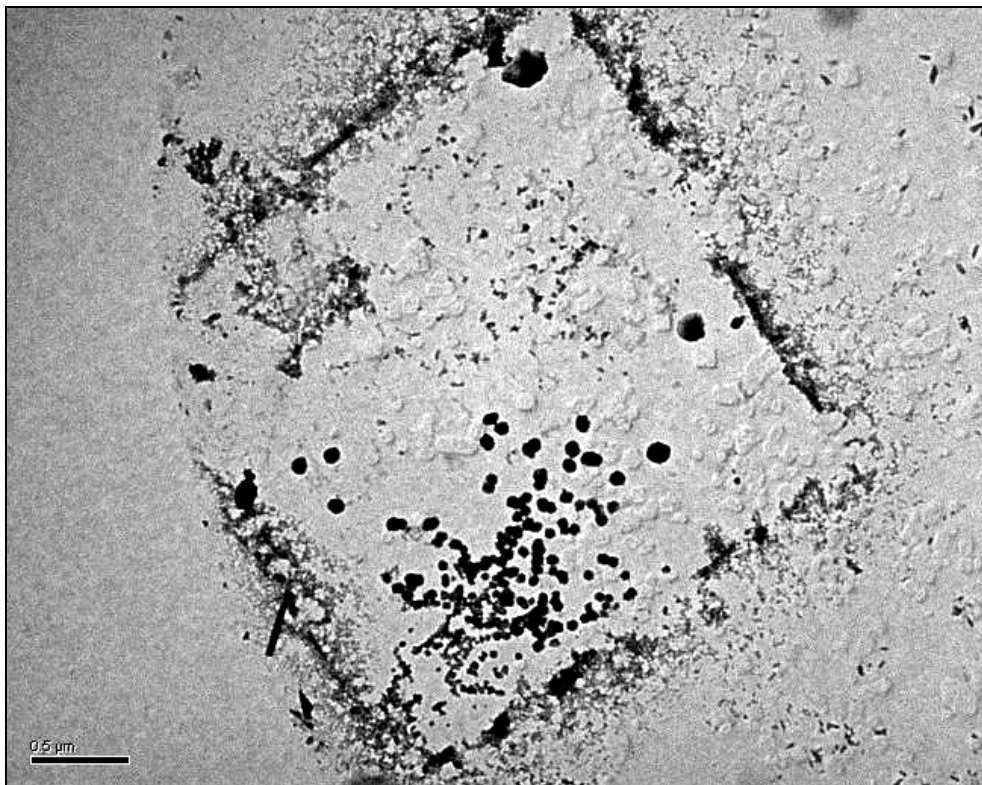
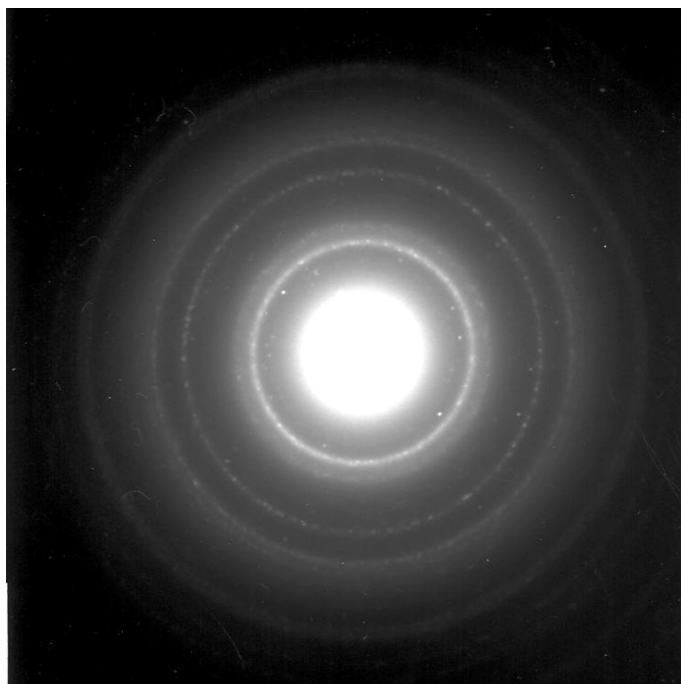


Рис. 3. Скопления тонкодисперсного самородного золота кубической, округлой и слабоудлиненной формы в порфиробластическом выделении пирита (I)



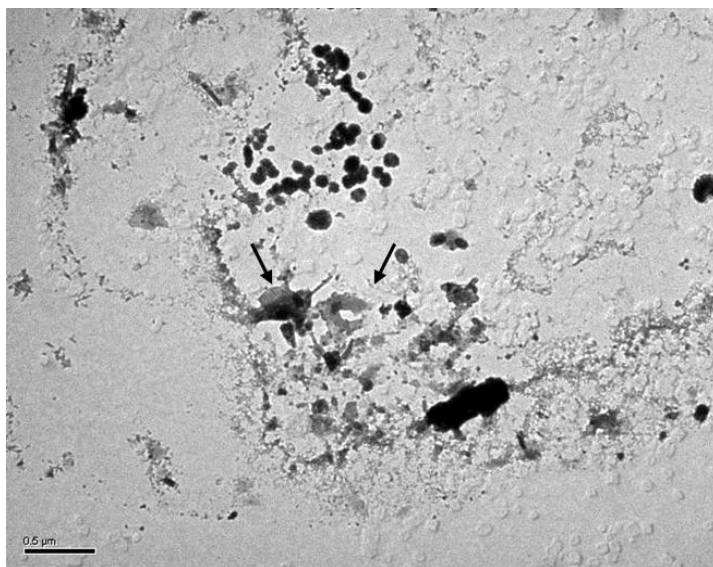
**Рис. 3а. Кольцевая микродифракционная картина самородного золота с отдельными отражениями 200 пирита**

Также в аналогичном порфиробластическом выделении пирита (рис. 2 показано цифрой 2, его крупный план приведен на рис. 4) отмечаются высокодисперсные индивиды самородного золота уплощенной кубической формы, в ассоциации с которым фиксируются тончайшие полупрозрачные пленочные (пластинчатые) образования более позднего по времени образования пирита. На точечно-кольцевых микродифракционных картинах пирита (рис. 4а) фиксируются отдельные точечные диффузные отражения самородного золота, что свидетельствует о разной степени раскristаллизации вещества в рассматриваемых пленочных образованиях.

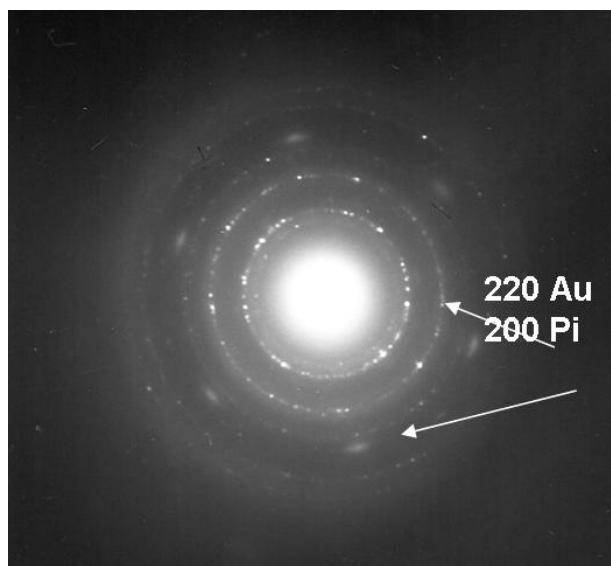
Самородное золото, наблюдаемое на поверхности свежего скола зерен пирита, характеризуется относительно хорошей степенью раскristаллизации. Значительно реже фиксируются тончайшие островковые пленочные образования, размеры которых, как правило, составляют первые десятки нанометра (рис. 5). При большом увеличении обнаружено неоднородное обособление каплевидной формы, состоящее из мелких контрастных фрагментов размером порядка первых нанометров, нередко закономерно срастающихся и приобретающих подобие огранки. Полученная с этого обособления микродифракционная картина (рис. 5а) позволила диагностировать его как слабо раскristаллизованное самородное золото. Кольцевые отражения золота нечеткие, диффузные. Относительно отчетливо проявлено лишь единственное отражение (111).

Изучение поверхностей свежих сколов зерен кварца также позволило выявить в нем тонкодисперсную фазу самородного золота, представленного дискообразными выделениями размером от 1 до 10 нм, образующими цепочки и хаотические скопления (рис. 6). Дискообразные выделения характеризуются неоднородным строением, что выражается в концентрации плотных – контрастных участков преимущественно в центральных частях и присутствии системы наноразмерных округлых выделений, тяготеющих также к центру. Полученные с дисковидных обособлений, характеризующихся неоднородным строением, текстурированные кольцевые микродифракционные картины (рис. 6а) дают основание диагностировать их как сращения относительно хорошо раскristаллизованного самородного золота с очень слабо раскristаллизованным кварцем. На присутствие последнего указывают отдельные слабо проявленные на микродифракционной картине диффузные отражения кварца.

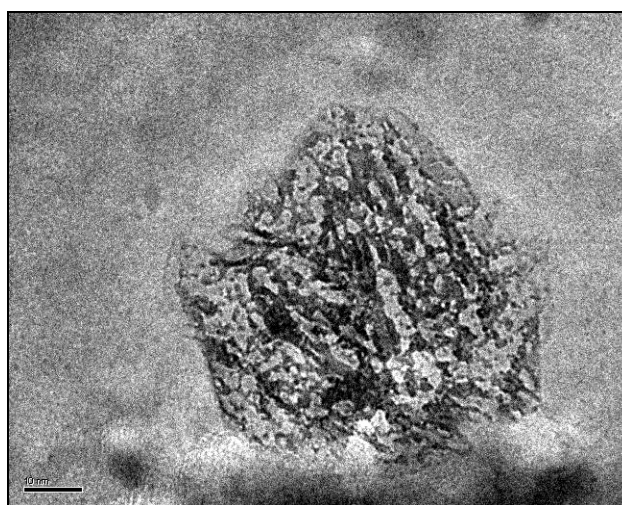
В кварце, отобранном из участка руды, обогащенного углеродистым веществом, также выявлена высокодисперсная фаза самородного золота. В кварце отмечаются микротрещины, частично выполненные углеродистым веществом (рис. 7), представленным удлинёнными веретеновидными выделениями и полупрозрачными пленочными образованиями (возможно, битум). В ассоциации с углеродистым веществом отмечаются контрастные высокодисперсные выделения округлой и слабо удлинённой формы, образующие скопления. Кольцевые микродифракционные картины (рис. 7а), полученные с этих скоплений, позволили диагностировать их как самородное золото. На микродифракционной картине, помимо четких кольцевых рефлексов самородного золота, характеризующегося хорошей раскristаллизацией, фиксируются слабые диффузные отражения графитизированного углеродистого вещества.



**Рис. 4.** Скопления тонкодисперсного самородного золота уплощенной кубической формы в ассоциации с пленочными (пластинчатыми) агрегатами пирита в порфиробластическом выделении пирита (II)



**Рис. 4а.** Точечно-кольцевая микродифракционная картина пирита, на которой присутствуют диффузные отражения (220) самородного золота



**Рис. 5.** Островковое пленочное образование слабо раскристаллизованного самородного золота (МДК – рис. 5а) в пирите

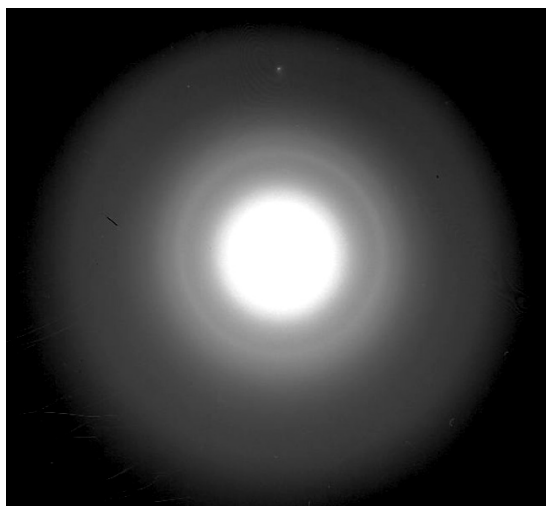


Рис. 5а. Кольцевая диффузная микродифракционная картина слабо раскристаллизованного самородного золота

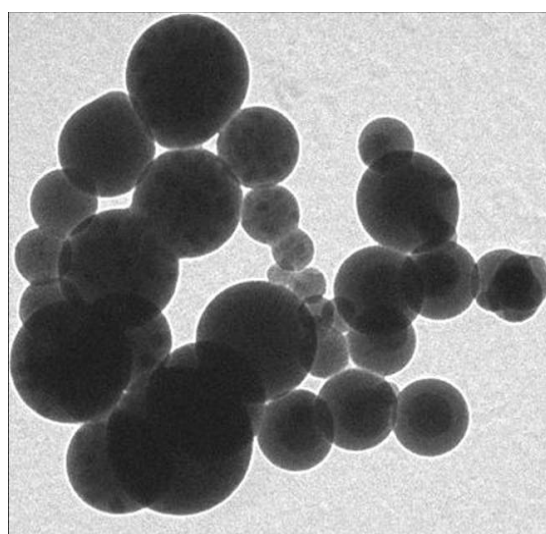


Рис. 6. Скопление дискообразных неоднородных выделений скола кварца, представляющих собой срастания относительно хорошо раскристаллизованного самородного золота с очень слабо раскристаллизованным кварцем (МДК – 6а)

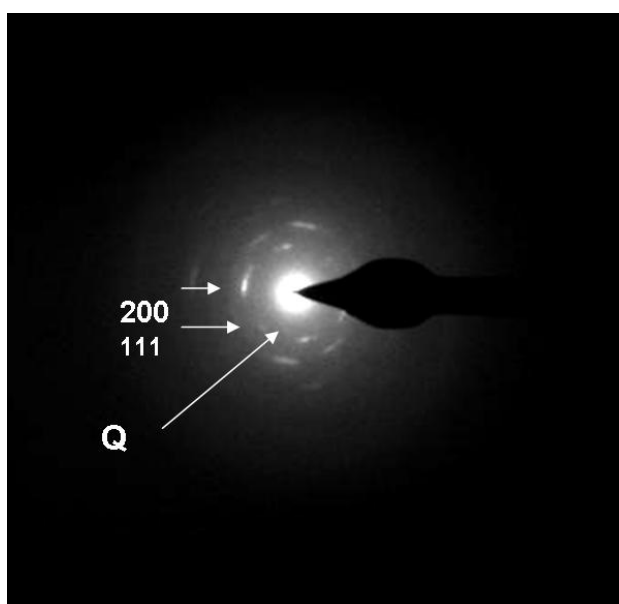
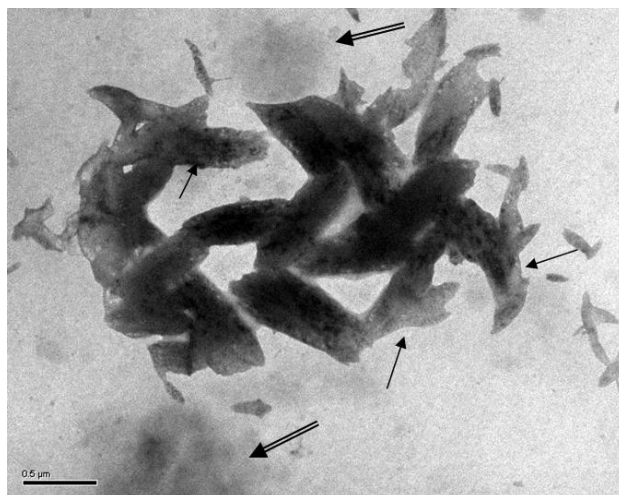
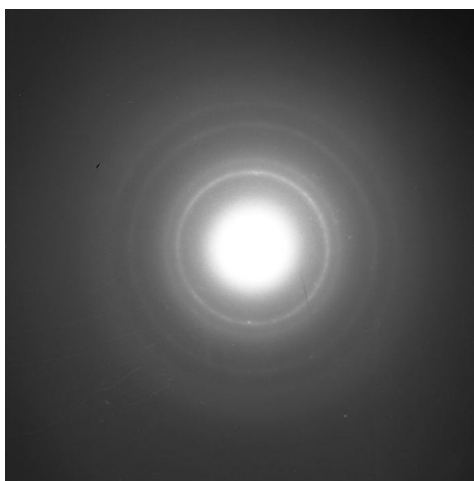


Рис. 6а. Текстурированная микродифракционная картина самородного золота, на которой помимо отражений самородного золота отмечаются слабые диффузные отражения кварца



**Рис. 7. Углеродистое вещество: удлиненные веретеновидные выделения (показано стрелками) и полупрозрачные пленочные образования (показано двойными стрелками) в кварце, в котором фиксируются тонкодисперсные округлые и слабо удлиненные выделения самородного золота, образующие скопления**



**Рис. 7а. Кольцевая микродифракционная картина хорошо раскристаллизованного самородного золота, на которой присутствуют слабые диффузные отражения графитизированного углеродистого вещества**

Проведенные исследования показали, что в золото-сульфидных рудах Маломырского месторождения золото присутствует в самородной форме. Оно обнаружено в главных минералах парагенетических ассоциаций рудной стадии – пирите и кварце в виде выделений нанометрической размерности.

1. Тонкодисперсное самородное золото в пирите присутствует в виде кристаллов кубического габитуса, округлых и слабо удлиненных зерен, нередко приобретающих подобие огранки и иногда ассоциирующих с более поздним по времени образования пиритом, имеющим уплощенную форму, пленочных островковых образований. Самородное золото имеет различную степень раскристаллизации (от хорошо раскристаллизованного, характеризующегося точечными – монокристалльными МДК, до слабо раскристаллизованного, на кольцевых МДК которого присутствуют слабые диффузные отражения).

Тонкодисперсные минеральные фазы самородного золота, обнаруженные в пирите, приурочены в основном к микротрещинам, микродислокационным нарушениям, интерстициям, интратрудным разрывам, границам зерен и микроблоков, трещинам спайности, ослабленным зонам, обусловленным дефектами структуры минерала и микропримесями.

Представляется, что концентрация самородного золота может быть обусловлена двумя факторами: а – самоочищением структуры пирита от механических примесей, преимущественно Au, и аккумуляцией их в отмеченных структурных элементах кристаллов пирита; б – наложением на уже сформированный пирит более поздних порций гидротермальных растворов, обогащенных золотом и проникновением их, главным образом, по ослабленным зонам, в том числе порам нанометрового размера, что привело к образованию тонкодисперсного самородного золота.

2. Тонкодисперсное самородное золото на поверхностях сколов кварца зафиксировано в виде скоплений округлых дискообразных выделений и нанометровой вкрапленности, приуроченной к углеродистому веществу. Изученные обособления самородного золота могут рассматриваться как результат дифференциации вещества из



остаточных насыщенных рудных растворов, когда уже произошло обособление основных сульфидоформирующих (S, Fe, Ni, Co, Cu) элементов и золота, из которых впоследствии происходило образование более крупных выделений сульфидов железа и самородного золота. Эти тонкодисперсные образования, иногда с углеродистым веществом, аккумулировались в микротрещинах, по границам зерен и микроблоков и в других ослабленных зонах.

3. Полнота извлечения золота из руд месторождения Маломир в значительной степени связана с возможностью его извлечения. В связи с тем, что золото присутствует в тонкодисперсном состоянии и практически не может быть извлечено механическими методами обогащения (тонким измельчением руды, флотацией), перспективным следует считать методы химического и биохимического обогащения.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 07-05-00821)*

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Ожогин Д.О., Викулова Л.П., Власов Н.Г. и др. Минералого-технологические особенности прожилково-вкрапленных золото-сульфидных руд месторождения Маломир // Современные методы комплексной переработки руд и нетрадиционного минерального сырья. Ч.2. Апатиты, 2007. С. 513-515.

2. Ожогин Д.О., Орлова Н.И., Власов Н.Г. и др. Вертикальная минералогическая зональность золото-сульфидного оруднения месторождения Маломир. //Разведка и охрана недр. 2008. №8. С. 16-21.

## НОВЫЕ ПОДХОДЫ К ПРОВЕДЕНИЮ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА КВАРЦЕВОГО СЫРЬЯ

**Раков Л.Т., Дубинчук В.Т.**

ФГУП «ВИМС», г. Москва

Физические процессы, протекающие в минералах, лежат в основе всех технологий оценки и переработки минерального сырья. Детальное изучение этих процессов позволяет глубже понять их сущность и разработать подходы к совершенствованию известных и созданию новых высокоэффективных технологий.

В этой связи необходимо отметить важную роль физики минералов в решении данной проблемы. Как научное направление физика минералов сложилась в семидесятые годы прошлого столетия. Ее основной задачей в те годы являлось изучение тонких особенностей строения минералов физическими методами: электронного парамагнитного резонанса, электронной микроскопии, ядерного магнитного резонанса, ИК-спектроскопии, ЯГР-спектроскопии, люминесценции и т.д. [1]. За прошедшее время накоплен огромный материал о деталях реального строения минералов. Однако с течением времени выяснилось, что обобщить разрозненные экспериментальные факты в рамках единой концепции крайне сложно. Оказалось, что минералы “живут” по своим, неизвестным ранее законам. Причиной тому являются свойства минералов, не повторяющиеся в материалах искусственного происхождения. Главные из них - обилие и разнообразие структурных дефектов, большой, не имеющий аналогов, возраст минералов. Поэтому в качестве первоочередной задачи, определяющей дальнейшее развитие физики минералов на современном этапе, выступает теоретическое и экспериментальное исследование физических процессов, протекающих в них. Решение этой задачи способствует превращению физики минералов в самостоятельную область знаний, наподобие физики металлов, физики полупроводников и др.

Весьма остро указанная проблема проявилась при создании новых генетических и технологических критериев на основе использования закономерностей распределения структурных дефектов в кварце. Исследования процессов образования, трансформации и распада структурных дефектов в этом минерале выявили невозможность их описания с позиций известных теоретических представлений. Для объяснения полученных закономерностей потребовалась разработка системы новых взглядов и концептуальных моделей, а именно, применение концепции активированного комплекса для процессов структурных превращений в кварце, создание теории спарринг-дефектов, введение понятия структурно-динамического состояния минерала и т.д. [2-3].

Совершенствование теории процессов, протекающих в кристаллической структуре кварца, позволило объяснить динамику изоморфных примесей в минерале. Было показано, что изоморфные примеси алюминия, титана и германия находятся в непрерывном взаимодействии друг с другом и кремниевыми вакансиями в минерале. Вследствие такого взаимодействия система дефектов находится в состоянии постоянного преобразования, т.е. кремниевые вакансии могут захватывать ионы примесей, освобождаться от них, захватывать вновь и т.д. Это состояние, названное структурно-динамическим, продолжительное время после кристаллизации кварца остается неравновесным. В дальнейшем в результате диффузионных процессов оно постепенно достигает равновесия. Переходу системы изоморфных примесей в кварце в состояние равновесия способствуют повышенная температура окружающей среды, дефектность кристаллической структуры минерала, время.

Неравновесному и равновесному структурно-динамическим состояниям отвечают характерные законы распределения изоморфных примесей. В обоих случаях для кварцев близкого генезиса наблюдаются линейные зависимости между содержаниями любых двух изоморфных примесей (изогены). Однако если для неравновесного