

## НЕКОТОРЫЕ АСПЕКТЫ НАНОГЕОХИМИИ ЗОЛОТА И СОПУТСТВУЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ В ЗОЛОТОРУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЯХ ЗАПАДНОГО УЗБЕКИСТАНА

**Махкамова Лола Хакимжановна**

**Умаров Акрамиддин Зайниддинович**

*Национальный университет Узбекистана им. Мирзо Улугбека, г. Ташкент,  
uakrom@mail.ru*

**Аннотация:** *Формы нахождения золота в минералах и рудах и его онтогенез в наномасштабе являются одной из важнейших проблем геохимии и минералогии. Развитие нанотехнологий тесно связано с наногеохимией и наноминералогией. В Узбекистане, как и в России, существует проблема извлечения тонкого золота из «упорных» сульфидно-мышьяковых руд.*

**Ключевые слова:** *Национальный университет Узбекистана имени Мирзо Улугбека, академик А.С. Уклонский, Лай Шэн Ван и соавторы (Министерство энергетики, Тихоокеанская северо-западная лаборатория, США) получили новый класс золотых кластеров, являющихся первым металлическим аналогом фуллеренов.*

### **Введение**

Традиционные методы обогащения этих руд (гравитация, флотация) не позволяют извлекать тонкодисперсное и «невидимое» золото из сульфидов (пирита, арсенопирита). Изучение золотосодержащих руд и продуктов обогащения позволило установить основные формы нахождения тонкого «невидимого» золота размерностью 0,2-10 мкм: 1) раннее сингенетическое и часто «невидимое» золото в пирите и арсенопирите; 2) позднее по отношению к сульфидам, свободное золото, находящееся на поверхности, в трещинах, дефектах этих минералов. Существующие в мировой практике технологии определяют необходимость дальнейшего изучения золоторудных месторождений Узбекистана на новом уровне.

**Состояние изученности проблемы наногеохимии золота.** В связи с новизной рассматриваемой проблемы по наногеохимии золота приводится обзор некоторых сведений по этому вопросу. В середине прошлого столетия обсуждался вопрос об онтогенезе минералов, их возникновении и росте. Академик А.С.Уклонский [8] предложил минимальное количество вещества определенного состава, которое может существовать в природе и иметь кристаллическую структуру, называть «протокристаллом», под которым он понимал окристаллизованную группу атомов или молекул. В настоящее время аналог «протокристалла» называется кластером – это химическое соединение, содержащее ковалентную связь между атомами или молекулами, которое является по размерам промежуточным между атомом или молекулой и твердым телом.

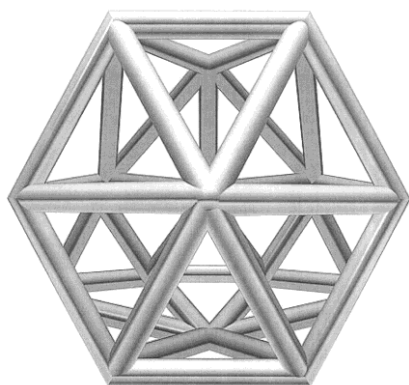


Рис.1 Фуллереноподобный мельчайший каркасный кластер золота из 16 атомов диаметром 6 Å (0,6 нм). Рисунок с сайта Pacific Northwest National Laboratory, USA.

По количеству атомов выделяются группы кластеров: 1) малые – до 12 атомов металла; 2) средние и большие – до 150 атомов; 3) гигантские – свыше 150 атомов. Их диаметр достигает соответственно – 0,55-0,8, 0,8-2 и 2-10 нм. По классификации Н.П.Юшкина [6] макроминералы имеют размер более 1 мм, микроминералы – 1-1000 мкм, наноминералы – менее 1 мкм).

Лай Шенг Ванг и соавторы (отдел энергии Тихоокеанской Северо-Западной лаборатории, США) получили новый класс кластеров золота, являющихся первым металлическим аналогом фуллеренов. Атомы золота образуют правильные треугольники, диаметр полости внутри кластера золота равен 6 ангстрем, что оказывается вполне достаточным для инкапсуляции малых атомов (сообщение PhysOrg.com) (рис. 1).

Нам представляется, что в указанный золотой каркас кроме золота могут входить атомы Ag, имеющие одинаковые с золотом радиусы атомов (1,44 Å) и образующие кластер минерала электрума и кюстелита, атомы меди с радиусом 1,28 Å, создающие кластеры типа ауруприта и купроаурита, а также других металлов, образующих с золотом интерметаллические соединения (Pt, Pd, Pb, Bi и др.). К примеру, на Навоийском горно-металлургическом комбинате из золотого концентрата извлекаются также палладий, не имеющий видимых форм нахождения. В некоторых золотинках Кокпатаса по нашим данным присутствует до 1,5% Pd, который, вероятно, образует Au-Pd кластер. Приведенные материалы свидетельствуют о динамике изучения наномира, решения вопросов о его границах, морфологии, структуры наночастиц, явлений и процессов. Значительные достижения в наноминералогии и наногеохимии золота получены российскими и др. исследователями с использованием приборов нового поколения [1-7,9].

**Изучение видимых и невидимых форм минералов в золоторудных месторождениях Узбекистана.** С 1996 г. нами проводятся исследования на крупных месторождениях золота Западного Узбекистана (Мурунтау, Кокпатас, Даугызтау, Гужумсай, Аджибугут) с использованием новейших аналитических и технологических методов (рис. 2).

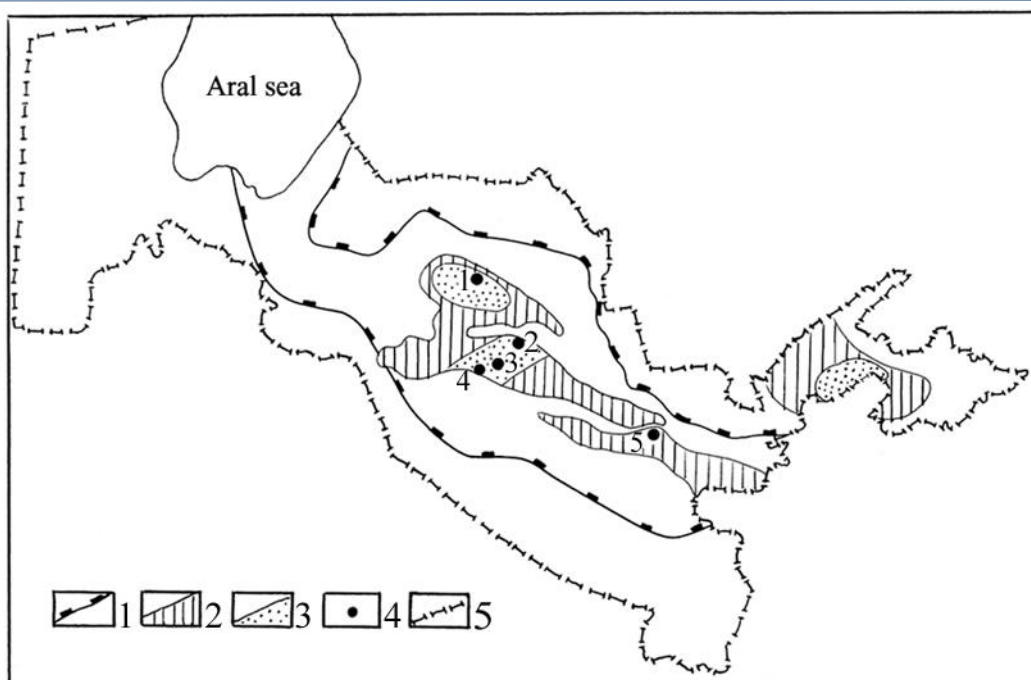


Рис. 2 Объекты исследований на схеме металлогенического районирования эндогенного золотого оруденения Узбекистана (выполнено В.А. Хорватом, И.М. Головановым, С.М. Колосковой, Х.Р. Рахматуллаевым, Г.Е. Завьяловым, Ю.И. Парамоновым, Н.И. Джантугановым и др. в 1997 г).

1-3 – металлогенические таксономы и их номера (первая цифра – металлогеническая провинция, вторая – металлогеническая зона, третья – золоторудный район): 1 – металлогенические провинции (I – Срединнотяньшаньская или Киргизско-Казахстанская, II – Южнотяньшаньская или Туркестанская, III – Югозападнотяньшаньская или Каракумо-Таджикская), 2 – металлогенические зоны интенсивного золотого оруденения (I.1 – Кураминская, II.1 – Кызылкумская, II.2 – Зарафшано-Туркестанская); 3 – золоторудные районы (I.1.1 – Ангренский, II.1.1 – Букантауский, II.1.2 – Центрально-Кызылкумский); 4 – месторождения золота (1- Кокпатас, 2- Мурунтау 3- Даугызтау, 4 – Аджибугут, 5- Гужумсай.); 5 – граница Республики Узбекистан.

Изучение проводилось с использованием электронно-микронного анализа. Часть исследований выполнена в Музее Естественной Истории при поддержке SERCAMS (Лондон), остальные анализы - на приборе Jeol JXA -8800R в ИГГ АН РУз (Игнатиков Е.Н., Козлов В.В., Ким М.А.). Измерения Au проводились по пику  $M\alpha$  при условиях съемки:  $V= 20\text{ kV}$ ,  $I = 50\text{ nA}$ , что позволило снизить предел обнаружения до 0,033%. Все то, что находится за пределами возможностей микронного анализа, мы условно называем «невидимым». Проведена статистическая обработка микронных анализов минералов методами парной и множественной корреляции для выявления взаимосвязей между химическими элементами.

**Минералого-геохимическая характеристика золоторудных месторождений Западного Узбекистана, содержащих «невидимое» золото. Месторождение Мурунтау.** Руды гигантского месторождения Мурунтау относятся к золото-

кварцевому типу с минералами редких металлов (шеелит, висмутин, молибденит и др.) в черносланцевых породах. Его минералогию и парагенетические минеральные ассоциации изучали Нестерова Н.П., Чеботарев Г.М., Бадалова Р.П., Дунин-Барковская Э.А., Василевский Б.Б., Конев Р.И. и др. Существует несколько парагенетических схем минералообразования. В общих чертах все авторы выделяют основные ассоциации: кварц-шеелит-золоторудную, основную продуктивную; кварц-золото-пирит-арсенопиритовую; кварц-золото-полиметаллическую; 4) кварц-антимонитовую с золотом. Э.А.Дунин-Барковская выделила 3 этапа рудообразования, в каждом из которых сформировались свои парагенетические ассоциации и парагенезисы минералов. В первый этап – кварц-золото-редкометалльный – образовалась золото-редкометалльно (шеелит, молибденит) - полевошпат – кварцевая ассоциация с золото-молибденит-шеелитовым парагенезисом. Во второй этап кварц-золото-мышьяковисто-сульфидного рудообразования, проявившегося после дак сиенит-диорит-гранофирового комплекса, сформировались две парагенетические ассоциации. В золото-пирит-сульфоарсенидно (Co, Ni)- кварц-анкеритовой выделены несколько парагенезисов: 1- кварц-рутил-арсенопирит-анкеритовый (метасоматиты), 2- пирит-кобальтиновый, 3- золото-герсдорфитовый и другие. Для них характерны повышенные содержания и зональное распределение Co и Ni в пирите, сингенетичная вкрапленность микрочастиц золота в герсдорфите (рис. 3).

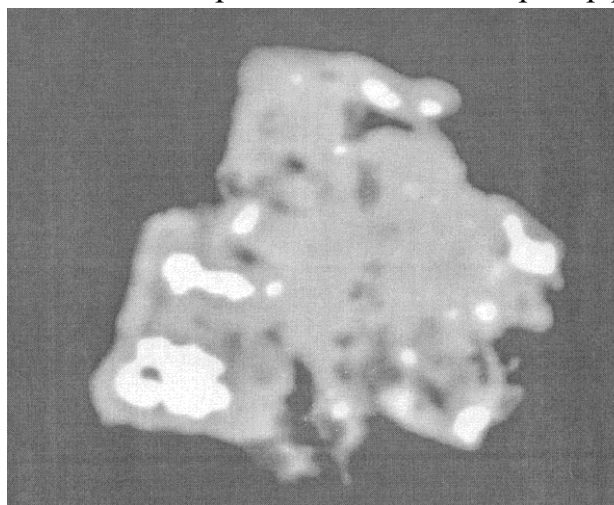


Рис.3. Микровключения самородного золота в кристалле герсдорфита. Размер золотинок 0,05-0,3 мкм. Золото-пирит-сульфоарсенидно (Ni-Co)-кварц-анкеритовая парагенетическая ассоциация. Месторождение Мурунтау. Снимок электронным микронзондом в ИГиГ АН РУз.

Во второй – золото-пирит-арсенопирит-кварцевой ассоциации выделены: 1 – хлорит-полевошпат (КПШ)- кварцевый с пиритом, монацитом, рутилом, апатитом (аксессуарный с редкими землями), 2- золото-пирит-арсенопиритовый, 3- золото-висмутин-жозеит-арсенопиритовый и другие парагенезисы. В 3-ий этап – кварц-золото-полиметаллический – образовались 3 ассоциации: золото-полиметалльно (Pb, Zn, Cu, Ag, Te)-селенидно-сульфидно-кварцевая, серебро-сурьянно-сульфосольно-карбонатно-кварцевая и сульфидно (Pb, Zn, Cu, Cd)- карбонатно-кварцевая. Во всех ассоциациях присутствует золото в «видимой» и «невидимой» форме. Пробность золота варьирует в широких пределах – 960-549‰ и уменьшается в поздних

парагенетических ассоциациях

за счет присутствия серебра. «Невидимое», возможно кластерное, золото присутствует до 0,15 % в жозеите, висмутине. Минералогической особенностью руд является образование минералов с изоморфным замещением Co, Ni и Fe в сульфоарсенидах, S и Se в ряду галенит-клаусталит, примесь Ag и, иногда, Pd в золоте. Установлены гидротермальная редкоземельная минерализация (монацит, ксенотим) в акцессорных количествах, гидротермальный гринокит CdS и новая минеральная фаза сульфотелурид Ag и Sn (Ag- 62-63%, Sn – 8,5-8,8, Se -3-3,8, Te - 16,5-17, S -7,8-8,45) в виде включений (7мкм x 5 мкм) в пирите и на границе зерен пирита и халькопирита. Эта фаза нами предварительно названа мурунитом. Геохимической характеристика руды Мурунтау (%): W – 0,32-0,07, Mo – до 0,007, Bi – до 0,04 %, Sb – 0,0015-0,0071, Ag – 0,0003-0,0007, Cu – 0,052-0,056, As – 0,87-1,59, Fe – 9,17-15,11, S – 1,78-2,35, SiO<sub>2</sub> – 49,57-60,95.

*Месторождения Кокпатас и Даугызтау.* На золото-сульфидно-мышьяковистых месторождениях Даугызтау и Кокпатас золото-арсенопирит-пиритовая ассоциация с «невидимым» золотом является ведущей. Она развивается в виде вкрапленности золотоносных пирита и арсенопирита в измененных породах (березиты, листовениты, кварцевые фельдшпатиты) вдоль рудовмещающих разломов. На месторождении Кокпатас Клемпертом С.Я. и др. (1985) выделена вторая продуктивная кварц-доломит-золото-пирит-арсенопиритовая ассоциация, которая по масштабам уступает первой. Она проявляется в виде метасоматически-прожилковых скоплений калишпата, кварца, доломита с пиритом и игольчатым арсенопиритом в катаклазированных породах. Особенностью данной ассоциации являются наличие самородного золота, преобладание арсенопирита над пиритом и его обособленность. Золото-полисульфидная ассоциация (не ведущая) с самородным золотом образует прожилки анкерита (Кокпатас) или доломит-кварцевые (Даугызтау) с вкрапленностью сфалерита, блеклой руды, пирита и др. Поздняя кварц-антимонитовая ассоциация с самородным золотом развита незначительно. На этих месторождениях мы выделяем 4 разновидности золота: 1) «невидимое» (возможно кластерное) в пирите, арсенопирите (рис.4).

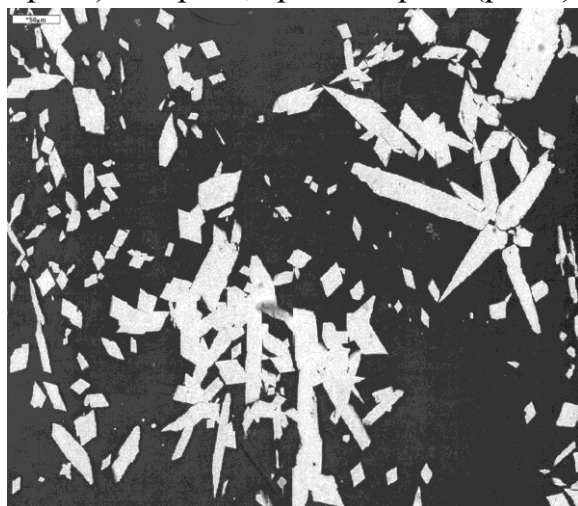


Рис. 4. Кристаллы золотоносного арсено-пирита Месторождение Кокпатас. Снимок электронным микроскопом в ИГиГ АН РУз.

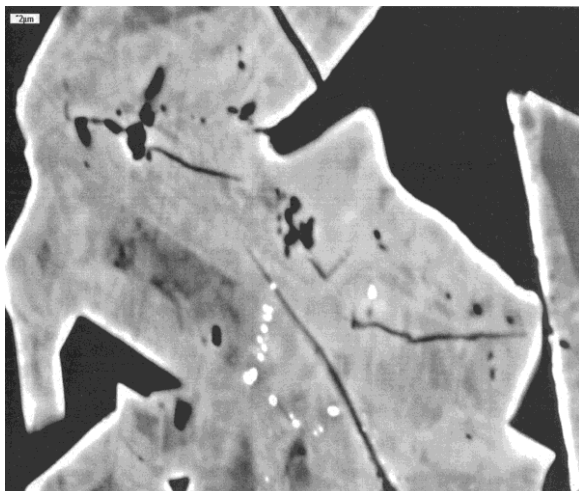


Рис. 5 Микровключения самородного золота в сростке кристаллов арсенопирита. Размер золотин 0,1-0,8 мкм. Золото–пирит–арсенопиритовая парагенетическая ассоциация. Месторождение Кокпатас. Снимок электронным микронзондом в ИГиГ АН РУз.

2) видимое микронное в сульфидах, а также развитое по тонким трещинкам и границам зерен минералов (рис. 5-6), в кварце, карбонатах, слюдах, углистом веществе; 3) самородное микронное в полисульфидной ассоциации; 4) самородное золото в кварц-антимонитовой ассоциации (Кокпатас). Пробность золота на месторождении Кокпатас – 710-813 ‰, на Даугызтау – выше – 885-1000 ‰. По форме нахождения золота руды месторождений Кокпатас и Даугызтау относятся в труднообогатимому («упорному») технологическому типу.

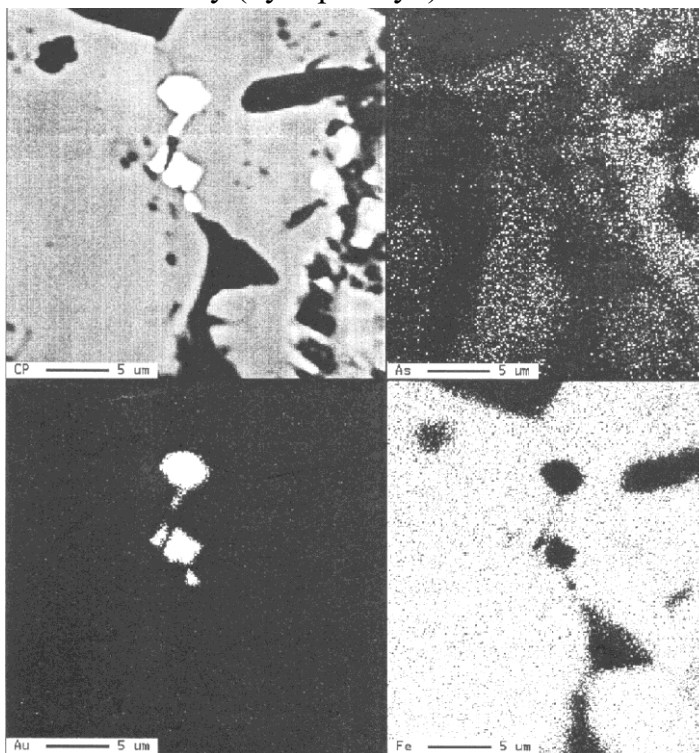


Рис.6 Самородное золото на границе между кристаллами мышьяковистого пирита. Мышьяк концентрируется по зонам роста пирита в рассеянном состоянии (возможно кластерный арсенопирит) и в виде микрозерен размером 1-3мкм. Место-рождение Кокпатас. Снимок электронным микронзондом в ИГиГ АН РУз.

*Месторождение Гужумсай.* В рудовмещающих породах кошрабадского габбро-сиенит-граносиенитового интрузивного комплекса  $C_{2m}$  (P?) к разрывным нарушениям приурочены крутопадающие золотоносные кварцевые жилы и жильно-прожилковые зоны. Процесс рудоотложения был полистадийным, сходным с месторождением Чармитан [Бортников, 1996]. Главная продуктивная золото-пирит-арсенопирит-кварцевая жильная парагенетическая минеральная ассоциация (сульфидность 3-10 %) определяет промышленную ценность руд. Основными минералами-концентраторами золота являются арсенопирит и кварц. При кристаллизации арсенопирита происходило отложение пленочного золота по зонам роста и в виде зернистых обособлений (рис.7).

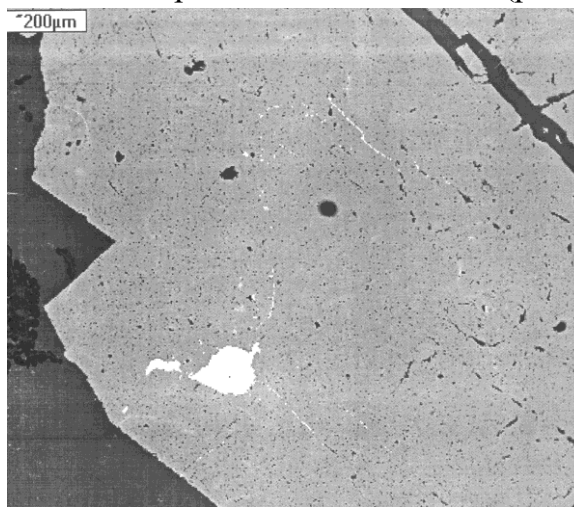


Рис.7. Кристаллы арсенопирита с микрзернистым (1-100 мкм) и нанопленочным (1 мкм) золотом по зонам роста. Месторождение Гужумсай. Снимок электронным микронзондом в ИГиГ АН РУз.

Крупные золотины из кристалла арсенопирита имеют пробность 820-860, отношения Au/Ag варьируют в пределах 2,64-3,57. Нанопленочное золото по зонам роста кристаллов по отношению Au/Ag характеризуется повышенной сереброносности с изменением значений показателя в диапазоне 1,24-2,15. Минеральные образования золото-полисульфидно-сульфосольно-кварцевой прожилковой ассоциации (сульфидность 5-15 % и более), не получившей масштабного развития, обычно являются совмещенными с жилами главной золотопродуктивной ассоциации. А.И.Даутовым (1987) отмечена высокая доля ультратонкодисперсного золота в минеральном балансе этой ассоциации. Видимое золото низкой пробности (менее 700), соотношение Au/Ag изменяется в пределах 1-2. Золото по составу отвечает преимущественно электруму.

*Месторождение Аджибугут.* Локализовано в зоне складчато-разрывных дислокаций на участке ее пересечения поперечными разломами. Рудовмещающая метатерригенная толща V- $\epsilon_1$  сложена песчаниками, алевролитами и сланцами. Промышленное оруденение представлено совмещенными в пространстве золото-сульфидным и золото-сульфидно-кварцевым типами руд [7]. Золото-арсенопирит-пирит-(карбонат-хлорит)-кварц-серицитовая метасоматическая минеральная ассоциация (1-ая продуктивная) формирует бедные и рядовые золото-сульфидные руды, содержащие «невидимое» золото в количестве до 60-70 % от общего баланса металла объекта. Золото-пирит-арсенопирит-(полевошпат)-кварцевая минеральная

ассоциация (2-ая продуктивная) проявлена преимущественно в виде субсогласных мелких линзовидных жил, гнезд и прожилков, обеспечивает до 30-40 % баланса золота. Пробность золота, по данным В.Ф.Проценко, варьирует в пределах 590-850. Золото-пирит-арсенопирит-альбит-кварцевая минеральная ассоциация (3-я продуктивная) выделяется в косесекущих прожилках, на её долю приходится до 10 % балансового золота. По сочетанию золотопродуктивных минеральных ассоциаций, с учетом характера и морфологических особенностей рудонесущих тел выделено четыре типа первичных руд: А – 1-ая, Б – 1+2, В – 1+3, Г – 1+2+3 ассоциации. Пространственное распределение выделенных типов руд на горизонте шахты (глубина 80 м от поверхности) показывает (рис. 8), что тип руд А занимает в контуре минерализованной зоны (по борту 0,2 г/т золота) около 30 % площади, тип Б составляет 40-45 %, тип В – до 10 %, тип Г локально проявлен в центральных частях рудных тел, составляя 15-20 %. Подобное соотношение показывает, что около 70 % площади минерализованной зоны и до 90 % площади рудных тел приходится на типы Б, В, Г, представляющие золото-сульфидно-кварцевый геолого-промышленный тип с высокой долей легко извлекаемого золота. В то же время, «невидимое» золото 1-ой золотопродуктивной ассоциации в традиционных технологиях обогащения в значительной степени останется неизвлеченным.

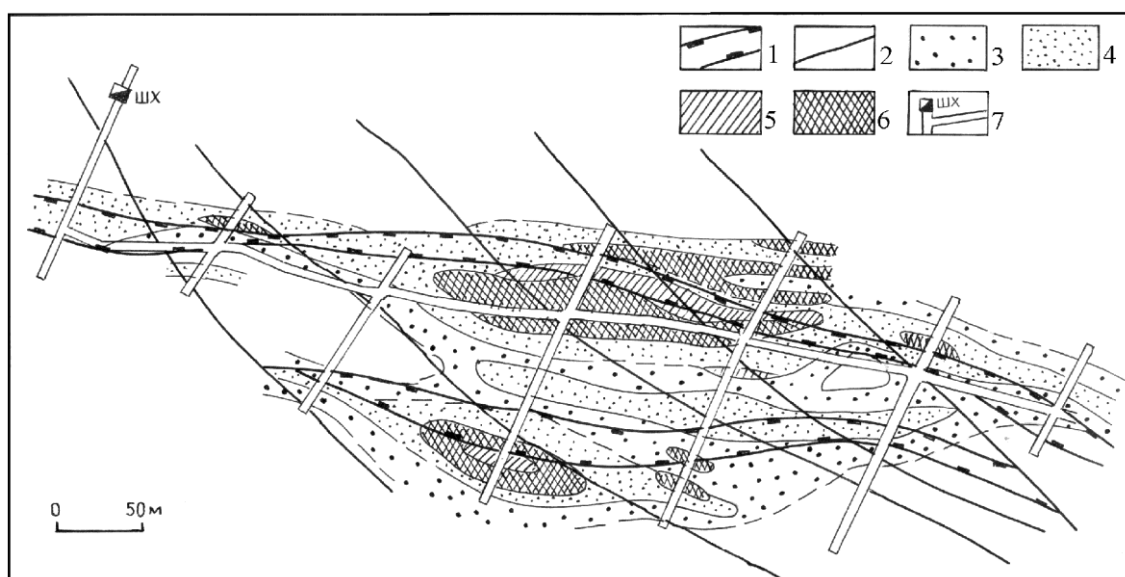


Рис.8. Минералогическое картирование типов первичных руд на шахтном горизонте месторождения золота Аджибугут (по С.М.Колосковой, 2003).

Разрывные нарушения: 1 – многоосевые зоны с интенсивным смятием пород, 2 – одно- и двухосевые простые; типы первичных руд: 3 - субпластовые прожилково-вкрапленные золото-арсенопирит-пиритовые (тип А), 4 - послойные вкрапленно-прожилково-жилльные золото-арсенопирит-пирит-кварцевые (тип Б), 5 - вкрапленно-прожилковые золото-арсенопирит-пирит-кварцевые (тип В); 6 - прожилково-жилльные золото-сульфидно-кварцевые (тип Г); 7 – горные выработки шахтного горизонта.

**Онтогенез парагенезиса пирита, арсенопирита и золота.** По современным представлениям минерал зарождается на наноуровне и процесс его онтогенеза

проходит через следующие иерархические уровни: атомы - кластеры (молекулы) – твердое вещество. Многие исследования проводятся в пограничной области между видимым и невидимым веществом благодаря возможностям современной аппаратуры и физико-химическим методам. Зарождение, рост и преобразование минералов парагенезиса золото-пирит-арсенопирит рассмотрено на примере месторождения Кокпатас, в «упорных» рудах которого он является главным продуктивным на золото.

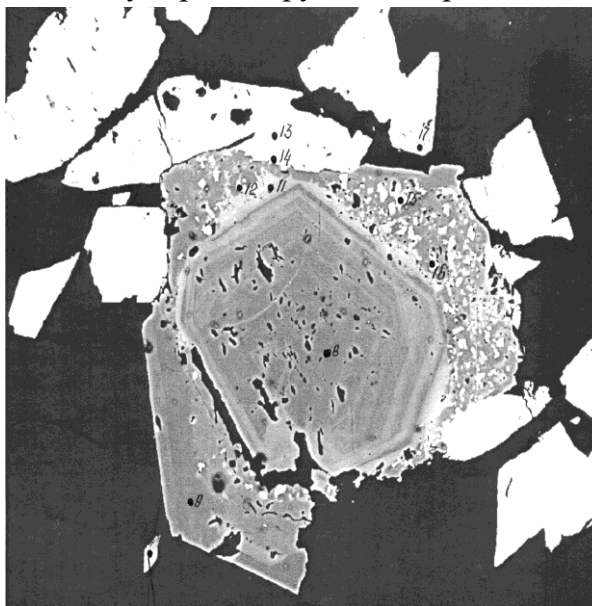


Рис.9. Кристалл пирита с распределением мышьяк-содержащих частиц (кластеров) по зонам роста пирита, структурой распада твердого раствора во внешней зоне и дипирамидальными кристаллами арсенопирита П. Золото-пирит-арсенопиритовая парагенетическая ассоциация. Месторождение Кокпатас. Снимок электронным микронзондом в ИГиГ АН РУз.

Кристалл мышьяковистого пирита (рис. 9) имеет зональное строение. Мышьяк-содержащее вещество располагается тончайшей сыпью по зонам роста пирита. Размерность этих частиц увеличивается от центра кристалла пирита к его краевой зоне. Наиболее мелкие частицы в центральной части кристалла пирита имеют размеры сотые-тысячные доли микрона и по размерам могут быть отнесены к кластерам. В краевой зоне пирита наблюдаются более крупные As-содержащие частицы размером 0,2-6 мкм. Они имеют слабо изометричную форму и располагаются в виде густой вкрапленности, составляя в большей части участков пирита 50-80%.

Онтогенез этих минералов нам представляется следующим образом. Из гидротермальных растворов, просачивающихся по трещинам и порам породы и содержащих Fe, As и S, в силу высокой кристаллизационной способности первым начинает расти кристалл пирита. На его гранях оседают частицы арсенопиритоподобного вещества типа мелких кластеров.

К участкам скопления кластеров арсенопирита тяготеют атомы золота и серебра, образуя ещё более тонкие частицы «невидимого» золота кластерного типа. По составу они отвечают самородному золоту или электруму (судя по соотношениям Au/Ag в точках анализа микронзондом). Завершается рост пирита образованием зоны пересыщения мышьяком, которая становится неустойчива при нарушении равновесия с изменением физико-химического состояния среды и распадается на 2 фазы: пирита и «арсенопирита», образуя пятнистую структуру распада твердого раствора.

Микрозондовый анализ более крупных (4-6 мкм) новообразованных арсенопиритоподобных частиц показал, что в их составе основными элементами являются Fe, As и S, но с иным соотношением, чем в типичном арсенопирите. Пока не ясно, являются ли эти частицы новой минеральной фазой или луч микрозонда захватил вмещающий пирит. После завершения роста кристалла пирита I с включениями «арсенопирита I», начинает активно кристаллизоваться и нарастать на пирит игольчатый арсенопирит II, содержащий также невидимое кластерное золото. Золото в описываемой ассоциации проявляется в 3-х видах: 1) невидимое кластерное в сульфидах; 2) мелкозернистое видимое (0,2-4 мкм) в участках обогащения пирита мышьяком; 3) мелкокристаллическое 2-6 мкм по трещинам в пирите, арсенопирите или на границе участков кристаллов этих минералов.

**«Невидимое» золото в пирите и арсенопирите.** В месторождениях Узбекистана в черносланцевых толщах часть золота присутствует в сульфидах. В Мурунтау эта часть невелика, так как в основном золото свободное в самородном виде, а роль сульфидов незначительна. По данным электронно-зондового анализа в арсенопирите Мурунтау золото установлено - до 1126 г/т, в пирите рудных жил золото достигает -600 г/т. Пириты содержат примесь мышьяка в количестве 0,03-1,2%, но зависимости между содержаниями мышьяка и золота не наблюдается.

На месторождениях Кокпатас и Даугызтау большая часть золота находится в сульфидах (пирит, арсенопирит). По данным разных авторов, содержание пирита в рудах на разных участках месторождения Кокпатас составляет от 1,5% до 14%, арсенопирита – 1-8%, на месторождении Даугызтау – 4-6 % и 0,4-0,6 %, соответственно. Подавляющая масса этих сульфидов мелко- и тонковкрапленная (до 1 мм) и связана с ранними продуктивными ассоциациями. В пирите постоянно устанавливаются высокие содержания As (до 7%) и неравномерное его распределение по зонам роста. Нами выделено 3 типа пирита: 1) наиболее крупнозернистый (от 0,25 до 0,5 мм) пентагондодекаэдрического габитуса, сложно-зонального строения, с содержанием As 0,3-4 %, развитый в малосульфидных участках рудных зон; 2) тонкозональный кубического габитуса, размером 0,03-0,25 мм, с содержанием As 1,5- 4,5%, развитый в центральных зонах рудных тел; 3) наиболее мелкозернистый размером – 10-30 мкм тонкозональный, в форме куба с подчиненным развитием граней октаэдра, с содержанием As 3-7 %, развитый в центральных зонах рудных тел. На Кокпатасе также выделено несколько типов пирита, отличающихся по содержанию As: слабмышьяковистый (As – до 1%); мышьяковистый (As 1-5%) и богатомышьяковистый (>5%). Арсенопирит образует призматические и игольчатые метакристаллы. По S/As- отношению он относится к сернистому типу.

В работах разных авторов приводятся содержания золота в сульфидах месторождений по данным атомно-адсорбционного, пробирного и других видов анализа, которые составляют первые десятки грамм на тонну в пирите и обычно на порядок выше в арсенопирите. Видимые золотины микронного размера в сульфидах

редки и имеют, как правило, наложенный характер. На месторождении Даугызтау они ассоциируют с минералами более поздней полисульфидной ассоциации (сфалерит, фрейбергит и др.). На месторождении Кокпатас отмечены также каплевидные и округлые включения золота. При микрозондовом анализе «невидимое» золото улавливается по локальным повышенным концентрациям. В пирите месторождения Даугызтау установлены содержания Au до 0,8% (рис.10а). Повышенно золотоносными (Au до 0,08 %) оказались высокомышьяковистые тонкозональные мелкокристаллические (10-30 мкм) разности: в них частота обнаружения Au приближается к 40 %. В крупнозернистом пентагондодекаэдрическом пирите наиболее высокие содержания Au (0,09%) установлены по самому краю зерна, где содержания As < 1 %. Статистическая обработка данных по высокозолотоносному мелкозернистому пириту показывает слабые незначимые связи между Au и As, Au и Fe, и значимую отрицательную связь между Au и S (-0,37), что, по-видимому, указывает на изоморфное замещение Au между S и присутствии части золота в изоморфной форме. В пирите месторождения Кокпатас установлены содержания Au до 0,5% (рис. 10б). При этом в нем также отмечают два типа распределения Au: 1- приуроченное к зонам пирита с содержаниями As < 1% и 2- в высокомышьяковистом пирите.

В арсенопирите содержания золота выше и достигают 0,23% на месторождении Даугызтау (рис.11а) и 0,39% - на Кокпатасе (рис.11б). Изучение связи Au с As и характера его распределения показало, что наиболее золотоносными являются удлиненно-призматические и игольчатые кристаллы, в которых содержания As выше, чем в призматическом арсенопирите. На Кокпатасе С.Я.Клемперт и др. (1985) связывают образование игольчатого арсенопирита с более поздней кварц-доломит-золото-пирит-арсенопиритовой ассоциацией. Кристаллы часто имеют зональное строение, обусловленное стехиометрическими отношениями между S и As: в центральной части зерен содержания S выше, а As ниже, чем в краевой зоне. Геохимическая интерпретация статистических связей в арсенопирите Кокпатаса и Даугызтау показывает высокий отрицательный коэффициент парной корреляции между As и S, As и Fe для 185 проб, что показывает обратную зависимость между этими элементами и подтверждает их изоморфизм.

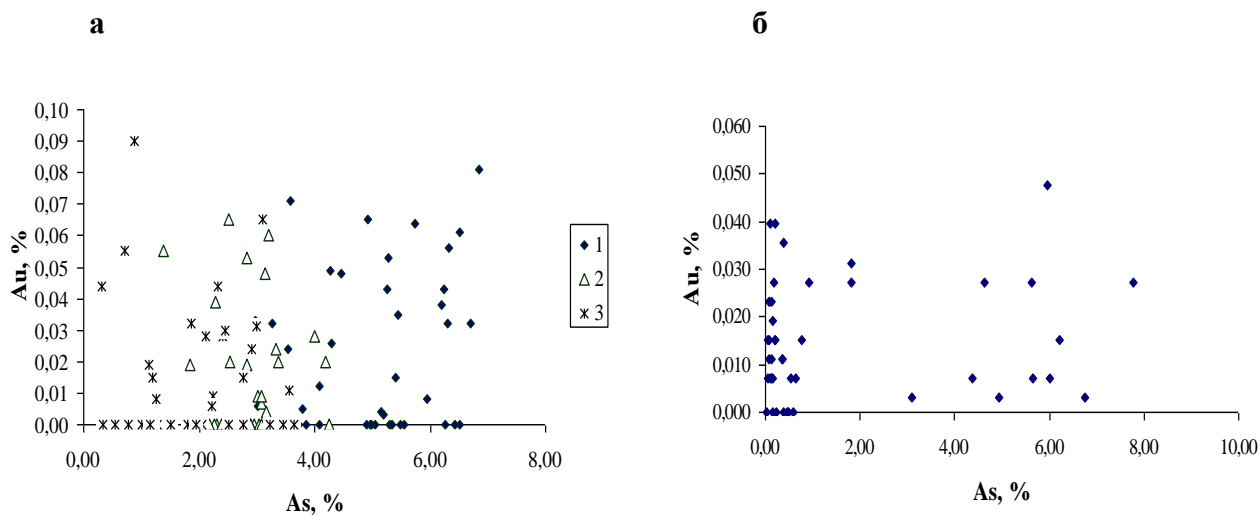


Рис.10

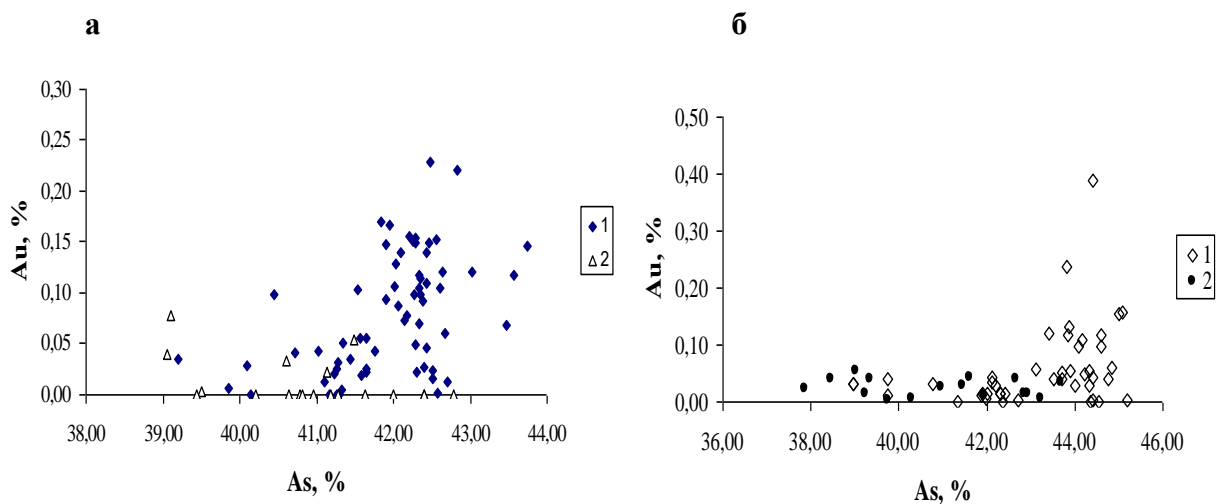


Рис. 11.

Рис.10. Содержания Au и As (%) в пирите месторождений Даугызтау (а) и Кокпатас (б) по данным электронно-микронзондового анализа. 1- высокомышьяковистый мелкозернистый пирит, 2- среднезернистый пирит, 3- крупнозернистый пирит.

Рис.11. Содержания Au и As (%) в арсенопирите месторождений Даугызтау (а) и Кокпатас (б) по данным электронно-микронзондового анализа. 1 - удлиненно-призматический и игольчатый арсенопирит; 2- призматический арсенопирит.

В наиболее золотоносных участках игольчатого арсенопирита месторождения Даугызтау (90 анализов) установлены положительный коэффициент корреляции между Au и As (0,27, при 5% уровне вероятности) и значимые отрицательные связи между Au и Fe (-0,17) и Au и S (-0,33), что указывает, по-видимому на присутствие части золота в структурно-связанном виде. Графики линейного сканирования и картины площадного распределения элементов для арсенопирита показывают, преимущественное обогащение золотом внешних зон кристаллов, обогащенных As, в которых оно имеет равномерное распределение, что подтверждает предположение о сингенетичном с сульфидами характере его отложения [Ким, 2005]. В игольчатом арсенопирите месторождения Кокпатас (24 анализа) связи между Au и As, Au и S, Au и Fe проявлены слабее, что, возможно, связано с присутствием части Au в виде мельчайших кластеров. На месторождении Кокпатас в арсенопирите также выявляется корреляция между Au и As, что указывает, по-видимому, на зональное распределение «невидимого» золота. Значимая положительная связь Au и Cu в арсенопирите (+0,607) выявилась только для игольчатого арсенопирита из Кокпатаса. Возможно существование невидимого кластера типа аурикуприта. Изложенные данные позволяют сделать вывод о том, что «невидимое» золото присутствует в пирите и арсенопирите месторождений Даугызтау и Кокпатас частично в изоморфном и частично в кластерном виде.

**Практическая значимость.** Изучение невидимых форм нахождения химических элементов в минералах, рудах и породах имеет практическое значение: 1 – как типоморфный признак при определении рудно-формационного типа месторождения и прогнозирования характера обогатимости его руды (обогатимые руды, «упорные» и т.д.); 2 – при непосредственной разработке технологической схемы переработки руды (флотация, бактериальное или химическое выщелачивание и др.); 3 – в качестве поискового признака на оруденение по элементам-примесям в сульфидах и других минералах (As в пирите и др.); 4 – при прогнозной оценке ореолов рассеяния химических элементов (Au, Ag, As, Bi, Hg и др.) в золоторудных полях.

Настоящая работа выполнялась по гранту ГКНТ РУз. и тематикам ИГИГ АН Уз и Геологического комитета Узбекистана. Авторы благодарят Р.Селтманна и сотрудников SERCAMS (Музей Естественной Истории, Лондон) за содействие в выполнении микронзондовых анализов.

### Литература:

1. Бортников Н.С., Прокофьев В.Ю., Раздолина Н.В. Генезис золото-кварцевого месторождения Чармитан // Геология рудных месторождений. 1996. Т.38. № 3. С. 238-257.
2. Дунин-Барковская Э.А., Чеботарева Г.П., Колдаев А.А., Арипов У.К., Ким М.А. Видимое и невидимое золото в рудообразующих системах фанерозоя Тянь-Шаня

- // Сб. «Проблемы геологии фанерозоя Тянь-Шаня». Ташкент: Университет, 2004. вып.2.С.200-209.
3. Жмодик С.М., Мирнов А.Г., Аношин Г.Н. и др. Наночастицы благородных и редких металлов в геологических процессах// Материалы межд. конф. «Проблемы геохимии эндогенных процессов и окружающей среды». Иркутск, 2007. Т.3. С.145-148.
4. Золоторудное месторождение Мурунтау .Ташкент: Фан,1998.539 с.
5. Ким М.А.Тонкодисперсное золото в золотоносных пирите и арсенопирите месторождений Кокпатас и Даугызтау// Геология и минеральные ресурсы.2005.№6. С.26-29.
6. Микро- и нанодисперсные структуры минерального вещества. Сыктывкар, 1999. 165 с.
7. Пирназаров М.М., Жураев Х.Х, Колоскова С.М. Минералого-геохимические особенности первичных руд месторождения золота Аджибугут, Западный Узбекистан// Руды и металлы. 2003. № 3. С.43-52.
8. Уклонский А.С. Задачи минералогии и геохимии// Зап.Узб.отд.ВМО.1951.вып.2.С.3-30.
9. Dunin-Barkovskaya E.A., Koldaev A.A., Chebotareva G.P. Visible and invisible gold mineralization in metamorphic rocks of Kyzyl-Kum (Central Asia)// 31 International Geological Congress. Abstracts. Rio de Janeiro, Brazil, 2000.