

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СВОЙСТВ НАНОРЕЛЬЕФА РАЗЛИЧНЫХ ЗОЛОТОСОДЕРЖАЩИХ СУЛЬФИДОВ

А.Е. Воробьев, Тчаро Хоноре

Кафедра нефтепромысловой геологии,  
горного и нефтегазового дела  
Российский университет дружбы народов  
ул. Орджоникидзе, 3, Москва, Россия, 117923

Представлены результаты сравнительного анализа свойств нанорельефа различных золотосодержащих сульфидов. Описана морфология и микротопография золотосодержащих пиритов и арсенопиритов. Раскрыт механизм адсорбции золота на поверхности сульфидов, который основывается на окислительно-восстановительных реакциях. Показано, что золото в большей степени адсорбируется поверхностью арсенопирита, чем пирита. Объяснен механизм адсорбции золота дефектами поверхности сульфидов.

**Ключевые слова:** адсорбция золота, поверхность сульфидов, пирит, арсенопирит, микротопография

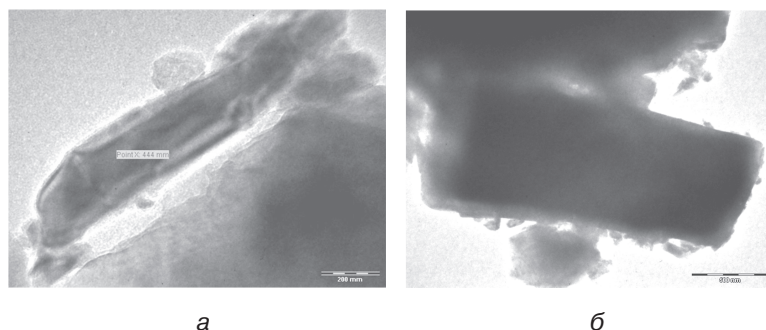
В рудах, как правило, всех известных золотосодержащих месторождений присутствует золото самого разного размера (ассоциированное как с сульфидными, так и пороодообразующими минералами), причем крупное (видимое) золото зачастую приурочено к межзерновому пространству, микротрещинам и микродислокационным нарушениям в рудообразующих минералах и при этом имеет округлую изометричную и неправильную форму [1; 5]. Однако распространение такого видимого золота в рудах (в частности, в месторождении Бакырчик, Казахстан) довольно ограничено.

Более широко на таких объектах распространено тонкодисперсное золото, максимальное содержание которого отмечается в продуктивной минеральной ассоциации, где главными рудными минералами являются арсенопирит и пирит [5], причем большая часть этого золота присутствует как «невидимое» или нанозолото (частицы менее 0,1 мкм) [2; 8].

Золотоносные пириты имеют пентагондодекаэдрический габитус, который в слабозолотоносных разностях сменяется пентагондодекаэдрами с развитием граней куба. Необходимо отметить, что в бакырчикских рудах золота меньше всего оказалось в кубической форме [5]. Для золотоносного арсенопирита бакырчикских руд наиболее характерен тонкоигольчатый и удлиненно-призматический облик кристаллов (рис. 1) и отклонение от стехиометрии кристаллической решетки минеральной матрицы.

Известно, что золоторудные месторождения могут формироваться при довольно низкой температуре в водных средах путем восстановительной адсорбции золота на  $\text{FeS}_2$  и  $\text{FeAsS}$  [1; 5].

Реакционная способность минералов к адсорбции золота из низкотемпературных растворов в конечном счете зависит от трех свойств их поверхности: химического состава, атомной структуры (которая определяет, какие атомы находятся на поверхности) и микро- и нанотопографии [3].



**Рис. 1.** Изображение игольчатого (а) и удлиненно-призматического (б) арсенопирита, просвечивающий электронный микроскоп (ПЭМ) [5]

Для того чтобы понять, как поверхностные характеристики (такие как химия поверхности и нанотопография) золотосодержащих сульфидов влияют на перетложение золота из низкотемпературных растворов, был осуществлен сравнительный анализ поверхностных реактивных способностей  $\text{FeS}_2$  и  $\text{FeAsS}$  в лабораторных условиях.

Необходимо также отметить, что сульфиды  $\text{FeAsS}$ , как правило, содержат несколько больше золота, чем  $\text{FeS}_2$ , а содержание золота в арсенопирите существенно увеличивается с ростом в нем содержания мышьяка.

В частности, важной особенностью бақырчикских руд является присутствие нанозолота в мышьяковистом пирите [5; 7]. Здесь содержание As в золотоносном пирите составляет от 1,2 до 4% (таблица).

Таблица

**Химический состав золотоносного пирита месторождения Бақырчик [5]**

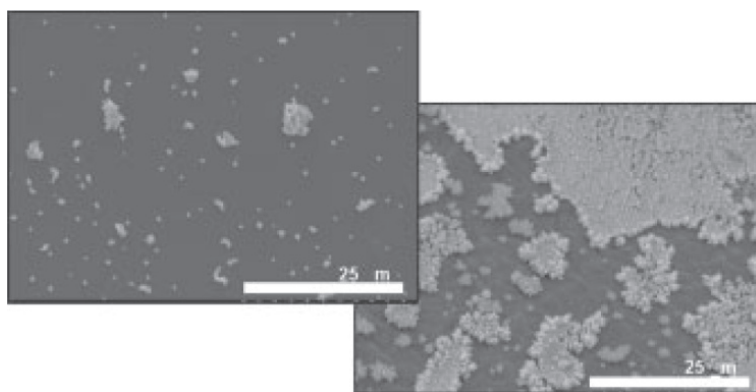
№ пробы	Содержание, масс. %			
	Fe	S	As	Ag
Л-71 (сульфидная руда)	26.15	32.77	2.02	1.12
	22.57	29.76	1.26	1.89
Л-67(Концентрат основной флотации)	19.84	17.01	1.79	—
	40.95	46.36	3.12	—
	33.23	64.54	1.86	0.02
	45.72	50.04	4.05	0.05
	45.09	50.65	2.89	0.05
	45.40	50.96	2.68	0.04
	44.59	49.94	3.35	0.06
44.75	50.64	2.44	0.06	
Тва 96 (мономинеральная фракция)	41.15	54.31	2.32	—
Тва 98 (мономинеральная фракция)	56.93	36.48	3.72	—

Механизм адсорбции золота на поверхности сульфидов основывается прежде всего на окислительно-восстановительных реакциях, где восстановление золота

в участках минералов богатых мышьяком (As) сочетается с его окислением в соседних участках, богатых серой (S) [9]. Значение роли Fe, As и S в этих процессах имеет довольно важную роль для последующей разработки эффективных технологий извлечения золота из руд, а также контроля дренажа кислых шахтных вод и понимания последствий сброса As в окружающую среду.

В проведенных экспериментах по адсорбции золота поверхностью сульфидов измельченные образцы  $\text{FeS}_2$  и  $\text{FeAsS}$  помещали в раствор  $\text{KAuCl}_4 / 1\text{M NaCl}$  в течение 24 час. В результате поверхность  $\text{FeAsS}$  стала несколько темнее, а его раствор — менее желтым, в то время как с образцом  $\text{FeS}_2$  никаких подобных изменений не наблюдалось.

Обработанные образцы сульфидов были проанализированы посредством СЭМ/ЭДС-анализов. Полученные на основе СЭМ-анализа изображения (рис. 2) показывают, что сульфиды  $\text{FeAsS}$  имели гораздо более большую площадь покрытия золотом по сравнению с  $\text{FeS}_2$ .



**Рис. 2.** СЭМ-изображения золотосодержащих образцов  $\text{FeS}_2$  (слева) и  $\text{FeAsS}$  (справа) после 24 часов [6]

ЭДС-анализ показал какой химический элемент способен к большей сорбции золота, а отсутствие пика хлора в спектрах означает, что золото было переотложено в восстановленной форме.

Плоские полированные образцы сульфидных минералов, с шероховатостью поверхности  $<0,1$  мкм, были подготовлены для дальнейшего РФС-анализа, который представляет собой эффективный метод определения состава минеральной поверхности и степени окисления химических элементов. Здесь РФС-анализ был использован для того, чтобы определить каким образом Au (III) было поглощено на  $\text{FeS}_2$  и  $\text{FeAsS}$ .

Пики  $\text{FeS}_2$  и  $\text{FeAsS}$  Au4f находятся вблизи той же энергической связи, что и Au (0), таким образом, Au (III) сократилось на поверхности во время поглощения (рис. 3).

Кроме того, пики  $\text{FeS}_2$  показывают выступы, которые выходят в области образцового Au (III). Это означает, что Au (III) возможно был восстановлен или частично восстановлен как Au (I) на поверхности  $\text{FeS}_2$ . Отсутствие выступов на пиках  $\text{FeAsS}$  указывает, что  $\text{FeAsS}$  существенно облегчает восстановительную адсорбцию по сравнению с  $\text{FeS}_2$ .

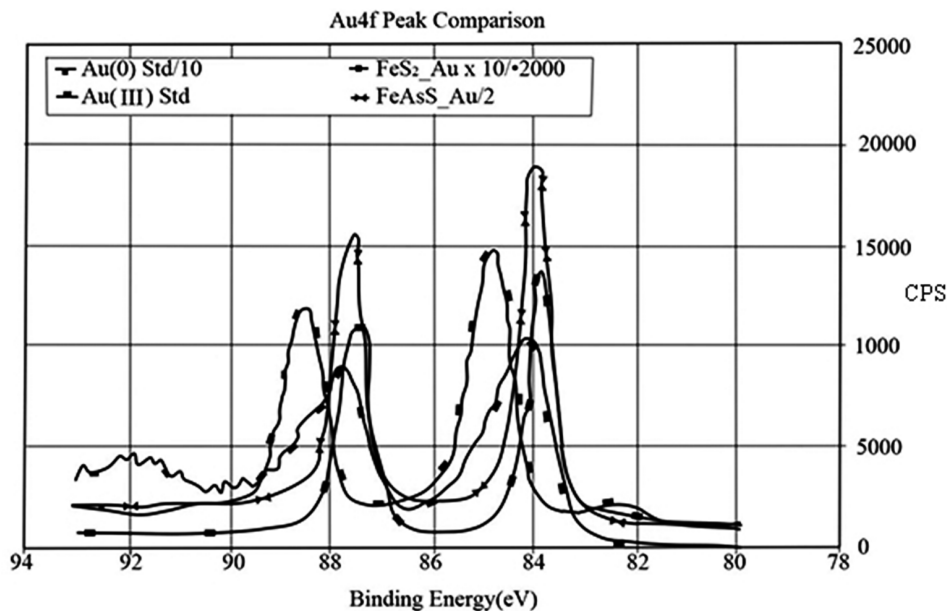


Рис. 3. Сравнительный РФС-анализ пиков между стандартами Au (0) и Au (III) и облученными образцами FeS<sub>2</sub> и FeAsS [6]

На рисунке 4 сравниваются пики As3d образцового FeAsS с полученными пиками FeAsS после обработки, чтобы определить, был ли окислен As и, таким образом, было ли облегчено осаждение золота. Разница в интенсивности пиков указывает на большую долю более высокой степени окисления, наблюдаемую уже после осуществленного воздействия.

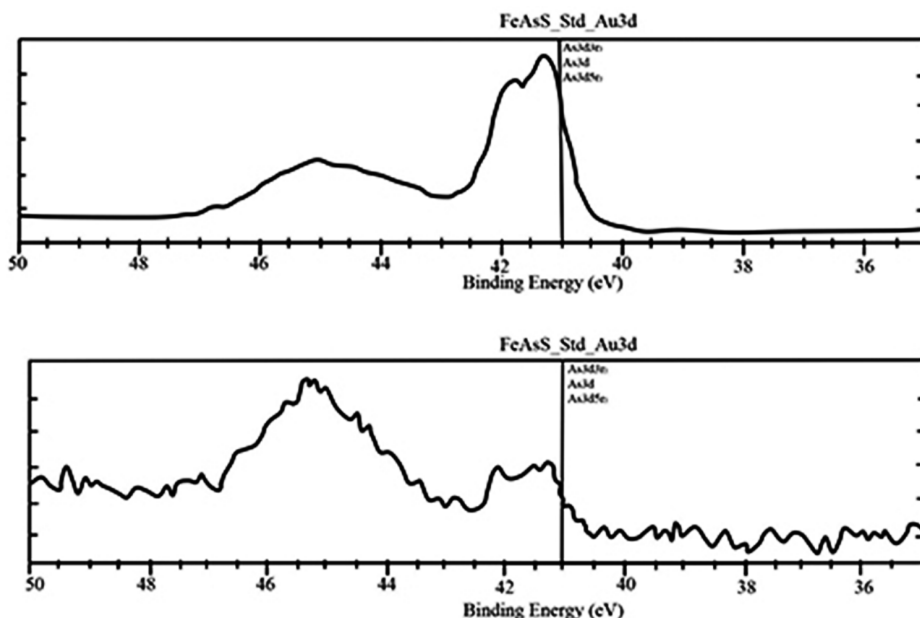


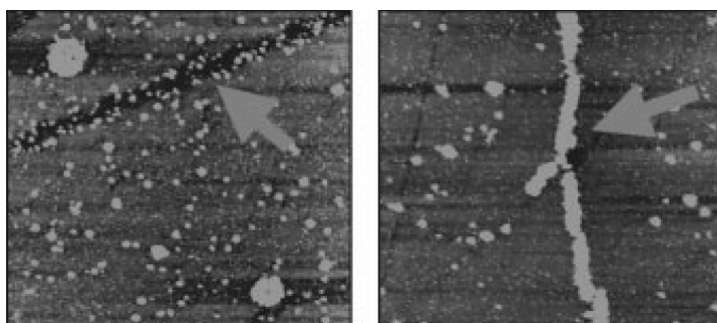
Рис. 4. XPS As3d сравнительный анализ пиков между образцовым FeAsS (сверху) и FeAsS после обработки (снизу) [6]

АСМ-анализ был использован для получения изображения роста золота на полированной поверхности сульфидов  $\text{FeS}_2$  и  $\text{FeAsS}$ , как функции времени. В начале эксперимента поверхность как  $\text{FeS}_2$ , так и  $\text{FeAsS}$  были относительно гладкими.

Через 10 мин. эксперимента адсорбированное золото было уже заметно на поверхности обоих образцов, но в большей степени — на поверхности  $\text{FeAsS}$ . Через 60 мин. вся поверхность  $\text{FeAsS}$  оказалась им практически полностью покрыта, в то время как поверхность  $\text{FeS}_2$  была более редко покрыта адсорбированным золотом.

АСМ-анализ также используется, чтобы увидеть, как влияет микро- и нанотопология минеральной поверхности на избирательную адсорбцию золота. На рисунке 5 показано изображение АСМ-анализа поверхности  $\text{FeS}_2$  и  $\text{FeAsS}$  после контакта с раствором  $\text{Au}$  (III) в течение 10 мин. Оба образца отображают избирательную адсорбцию золота на различных дефектах поверхности, но в большей степени изменения видны на образце  $\text{FeAsS}$ .

Таким образом было установлено, что  $\text{Au}$  (III) в большей степени адсорбируется на поверхности  $\text{FeAsS}$  по сравнению с  $\text{FeS}_2$ .  $\text{Au}$  (III) восстанавливается до  $\text{Au}$  (0) на поверхности  $\text{FeAsS}$ , а поверхность  $\text{FeS}_2$  выявляет признаки сорбции  $\text{Au}$  (III) и  $\text{Au}$  (0), а также частично восстановленного  $\text{Au}$  (I).



**Рис. 5.** 20 мкм × 20 мкм АСМ-изображения полированного  $\text{FeS}_2$  (слева) и  $\text{FeAsS}$  (справа) после 10-минутного воздействия [6]

