

# МИНЕРАЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ МАТЕРИАЛОВ ПОСЛЕ БИОЛОГИЧЕСКОГО ОКИСЛЕНИЯ ФЛОТОКОНЦЕНТРАТА

**К. С. САНАКУЛОВ**<sup>1</sup>, директор, д-р техн. наук

**А. В. ЗИМИН**<sup>2</sup>, генеральный директор, канд. техн. наук

**М. А. АРУСТАМЯН**<sup>2</sup>, исполнительный директор, канд. техн. наук

**С. П. НАГАЕВА**<sup>2</sup>, руководитель научно-исследовательской минералогической лаборатории, SPNag@yandex.ru

<sup>1</sup> ГП Навоийский горно-металлургический комбинат, Навои, Узбекистан

<sup>2</sup> СП ЗАО «ИВС», Санкт-Петербург, Россия

## Введение

Месторождения Кокпатас и Даугызтау, расположенные в Центральных Кызылкумах, являются крупными золоторудными объектами Навоийского горно-металлургического комбината (НГМК).

Оруденелые породы месторождения Кокпатас представлены углисто-кварц-хлоритовыми сланцами и песчаниками с интенсивной пирит-арсенопиритовой минерализацией. Для руд месторождения характерны в основном мелко- и тонковкрапленные, реже — прожилково-вкрапленные текстуры, подчиненное значение имеют брекчиевые руды с кварцевым и кварцево-карбонатным цементом.

В геологическом строении месторождения Даугызтау принимают участие сильнодислоцированные осадочно-метаморфические породы бесапанской свиты. Породы представляют собой слабометаморфизованные, в различной степени сульфидизированные и углефицированные алевролиты, песчаники, алевропесчаники и глинистые сланцы.

Руды месторождений Кокпатас и Даугызтау — золотоносные. Распределение золота в них неравномерное. Среднее содержание золота в руде месторождения Кокпатас 3 г/т, в руде месторождения Даугызтау — 3,2 г/т. Золото тонкодисперсное, кластерное и невидимое, ассоциировано с сульфидами (пиритом) и арсенопиритом, видимое золото крупностью 0,5–30 мкм наблюдается в сульфидах и породообразующих минералах. Руды обоих месторождений содержат сорбционно-активное углистое вещество (от 0,3 до 0,7 %).

Из мирового опыта обогащения аналогичных руд известно, что упорность золота чаще всего связана с рассеянием его в изоморфной или дисперсной форме в сульфидах и сульфоарсенидах, где размер частиц золота составляет от десятков до тысячных долей микрона [1–15]. Поэтому оно не растворяется цианированием при стандартной технологии даже при сверхтонком помоле без применения подготовительных операций перед цианированием. Вторая по распространенности причина упорности — наличие в руде значимых количеств углеродистого вещества или иных природных сорбентов (гидроксиды железа, некоторые алю-

Приведены результаты изучения вещественного состава золотосодержащих продуктов обогащения руд месторождений Кокпатас и Даугызтау. Дано описание основных рудных минералов и охарактеризовано поведение этих минералов в процессе биоокисления. Сделано предположение о причинах недостаточного окисления сульфидов и вскрытия упорного тонковкрапленного золота.

**Ключевые слова:** месторождения Кокпатас и Даугызтау, золото, углеродное вещество, флотационный концентрат, кек биоокисления.

**DOI:** dx.doi.org/10.17580/gzh.2016.11.04

мосиликаты и др.), которые могут сорбировать благородные металлы из цианистых растворов [15]. При высокой концентрации этих минералов возможны потери растворенного, но сорбированного на них золота. Данное обстоятельство может приводить к потерям золота с хвостами технологического процесса [1–15]. Также факторами, указывающими на упорность руд, являются наличие в них золота, покрытого пленками, присутствие в рудах компонентов, которые при цианировании являются поглотителями кислорода (например, антимонит или пирротин), и поглотителей цианида (например, металлическая медь) [3]. Особенно усложняется технология переработки руд, когда эти факторы проявляются одновременно.

К типу технологически упорного минерального сырья также следует причислить руды и концентраты, содержащие металлоорганические, кластерные, коллоидные и иные химические и композиционные соединения, затрудняющие технологическое извлечение полезных компонентов.

В настоящее время технология обогащения руд месторождений Кокпатас и Даугызтау включает флотационные, биологические и гидрометаллургические методы. Наличие в рудах тонкого золота, ассоциированного с сульфидами, присутствие углеродистого вещества позволяют отнести эти руды к рудам двойной упорности.

Опыт эксплуатации данной технологии в Навоийском ГМК выявил ряд ее недостатков. Определены основные причины неудовлетворительных технологических показателей переработки золотомышьяковистых сульфидных руд. Глубокий анализ результатов практической работы показал, что микробиологической активности в процессе бактериального окисления флотоконцентратов недостаточно, что приводит к недоокислению флотоконцентратов [7, 8].

В целях изучения состояния упорности сульфидного флотоконцентрата и флотоконцентрата после биоокисления Навоийским ГМК совместно с СП ЗАО «ИВС» проведены исследования вещественного состава этих продуктов обогащения.

Таблица 1. Химический состав флотоконцентрата

Элемент	Содержания, %	Элемент	Содержание, %
Cu	0,053±0,011	SiO <sub>2</sub>	31,7±0,6
Zn	0,066±0,015	Al	5,81±0,2
Pb	0,02±0,008	K	2,31±0,17
As	2,53±0,2	Na	0,67±0,06
Sb	0,88	Mg	1,11±0,1
S <sub>общ</sub>	18,95±0,3	Mn	0,033±0,01
S <sub>сульфатная</sub>	0,401	Ca	1,23±0,1
S <sub>элементарная</sub>	0,75	C <sub>общ</sub>	2,56±0,05
Fe <sub>общ</sub>	19,3±0,4	C <sub>орг</sub>	2,09±0,05
Au*	19,1±1,2	Хлор-ион	0,025
Ag*	24±3		

\* Содержание указано в г/т.

### Проведенные исследования и их результаты

Минераграфические исследования проб проведены с использованием поляризационного микроскопа Leica DM4500P, оснащенного видеокамерой Leica DFC490. Результаты оптических исследований обрабатывали с помощью специализированных программ «Минерал С7».

Полуколичественный минеральный состав проб определяли с помощью рентгенофазового анализа на портативном рентгеновском дифрактометре D2 PHASER (CuKα) с линейным детектором LYNXEYE. Съёмку истертых порошковых проб проводили в диапазоне углов от 5 до 80°. Обработку дифрактограмм осуществляли в программе DIFFRAC.EVA. Идентификацию минералов выполняли путем сравнения с дифрактограммами стандартов (ICDD PDF 2).

Микроскопический анализ минералов в аншлифах-брикетах проводили с использованием аналитического комплекса на базе сканирующего электронного микроскопа VEGA 3LMU, оснащенного системой энергодисперсионного и волнодисперсионного микроанализа.

Химический и фазовый анализ проб выполняли в испытательном аналитическом центре ООО Институт Гипроникель» (Санкт-Петербург). Содержание золота и серебра определяли в региональном аналитическом центре «Механобр Инжиниринг Аналит» (РАЦ «МИА», Санкт-Петербург).

Химический состав флотоконцентрата до биоокисления приведен в **табл. 1**.

Гранулометрический состав с распределением золота во флотоконцентрате до биоокисления, приведенный в **табл. 2**, показывает, что золото концентрируется в классе  $-0,045+0,02$  мм, что скорее всего связано с тонкими частицами свободного золота и тонкого золота в сульфидных минералах. В остальных классах крупности содержание золота примерно одинаковое, с небольшим увеличением в классе крупности  $>0,1$  мм.

Химический состав флотоконцентрата после биоокисления приведен в **табл. 3**.

Таблица 2. Гранулометрический состав и распределение золота

Класс крупности, мм	Выход, %	Содержание Au, г/т	Распределение Au, %
+0,1	2,72	23,9	3,17
-0,1+0,071	2,53	12,7	1,57
-0,071+0,045	5,92	16,4	4,73
-0,045+0,02	21,41	33,3	34,72
-0,02	67,42	17	55,82
<b>Итого</b>	<b>100</b>	<b>20,53</b>	<b>100</b>

Таблица 3. Химический состав флотоконцентрата после биоокисления

Элемент	Содержание, %	Элемент	Содержание, %
Cu	0,026±0,005	SiO <sub>2</sub>	42,1±0,6
Zn	0,052±0,015	Al	5,5±0,2
Pb	0,0084±0,002	K	2,32±0,17
As	0,86±0,07	Na	0,78±0,06
Sb	0,57	Mg	1,12±0,1
S <sub>общ</sub>	8,77±0,2	Mn	<0,02
S <sub>сульфатная</sub>	5,99	Ca	2,55±0,15
S <sub>элементарная</sub>	1,28	C <sub>общ</sub>	1,48±0,04
Fe <sub>общ</sub>	8,39±0,3	C <sub>орг</sub>	1,64±0,04
Au*	19,1±1,2	Хлор-ион	0,01
Ag*	24±3		

\* Содержание указано в г/т.

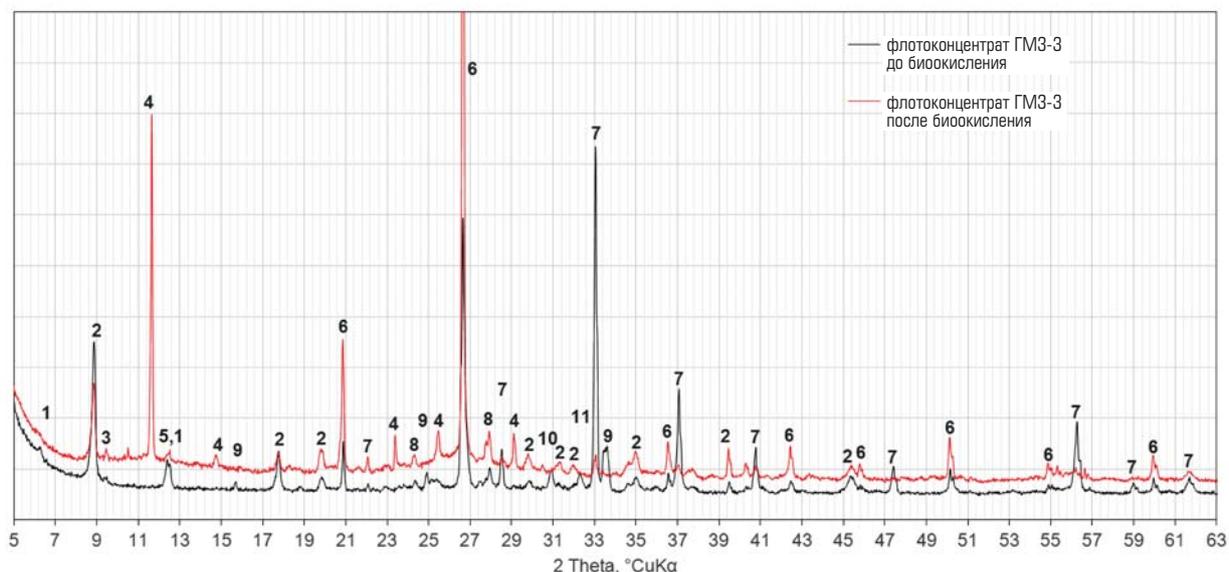
Таблица 4. Гранулометрический состав и распределение золота во флотоконцентрате после биоокисления

Класс крупности, мм	Выход, %	Содержание Au, г/т	Распределение Au, %
+0,1	10,93	9,35	4,63
-0,1+0,071	8,83	7,88	3,15
-0,071+0,045	18,95	12	10,31
-0,045+0,02	25,69	18,5	21,54
-0,02	35,6	37,4	60,36
<b>Итого</b>	<b>100</b>	<b>22,06</b>	<b>100</b>

Результаты анализа показывают, что основными породообразующими элементами являются SiO<sub>2</sub>, Al, K. Сера находится в основном в сульфатной форме, что свидетельствует об образовании сульфатных минералов.

Данные гранулометрического состава пробы флотоконцентрата после биоокисления, приведенные в **табл. 4**, показывают, что основным классом накопления золота является класс крупности  $<0,02$  мм (37,4 г/т), что может свидетельствовать о накоплении тонких частиц золота как в свободном виде, так и в ассоциации с сульфидами.

Для анализа основных минеральных фаз был проведен рентгенофазовый анализ порошковых проб флотоконцентрата до био-



**Рис. 1. Дифрактограммы с обозначением основных минеральных фаз в пробах флотоконцентрата до и после биоокисления:**

- 1 — хлорит; 2 — слюда; 3 — тальк; 4 — сульфаты (гипс);
- 5 — каолинит; 6 — кварц; 7 — пирит; 8 — альбит;
- 9 — арсенопирит; 10 — эпидот; 11 — антимонит (стибнит)

**Таблица 5. Минеральный состав флотоконцентрата до и после биоокисления**

Минералы	Флото-концентрат до биоокисления	Флотокон-центрат после биоокисления
	Содержания, % (вес.)	
Пирит, пирротин	35	2,5
Арсенопирит	5	0,2
Антимонит	1	0,7
Другие (халькопирит, блеклая руда, сфалерит, галенит)	0,3	0,3
Оксиды, гидроксиды железа	4,5	11
<b>Сумма рудных минералов</b>	<b>45,8</b>	<b>14,7</b>
Кварц	15	24
Слюдисто-глинистые минералы	18	19,5
Полевые шпаты	8	11,5
Карбонаты	2	—
Клинохлор	5	5
Сульфаты	2	20,5
Арсенолит	—	0,1
Скородит	—	2
Другие (рутил, монацит и др.)	0,2	1,2
Угlistое вещество	~2	~1,5
<b>Сумма нерудных минералов</b>	<b>54,2</b>	<b>85,3</b>
<b>Итого</b>	<b>100</b>	<b>100</b>

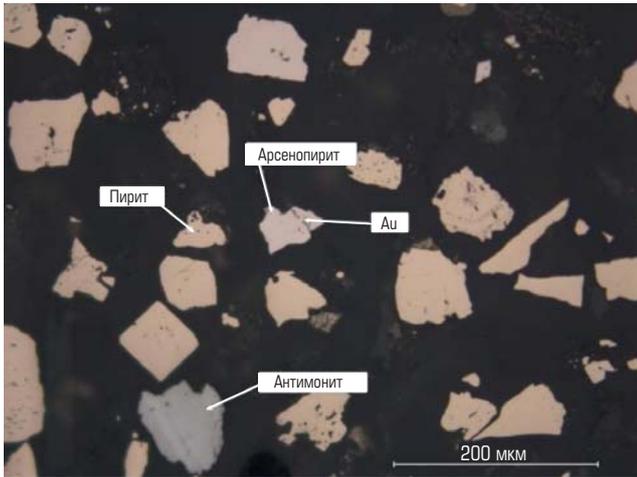
окисления и флотоконцентрата после биоокисления, результаты которого представлены на **рис. 1**. Как видно, во флотоконцентрате до биоокисления основными минеральными фазами являются пирит, арсенопирит, породообразующие минералы — кварц, слюды, альбит. В концентрате после биоокисления существенно уменьшилось содержание сульфидных компонентов, увеличилась доля породообразующих минералов (кварц, слюдистые и глинистые минералы и др.), сульфатов (гипс, бассанит и др.) и оксидов (гидроксидов) железа.

Минеральный состав сульфидного флотоконцентрата и концентрата после биоокисления приведен в **табл. 5**.

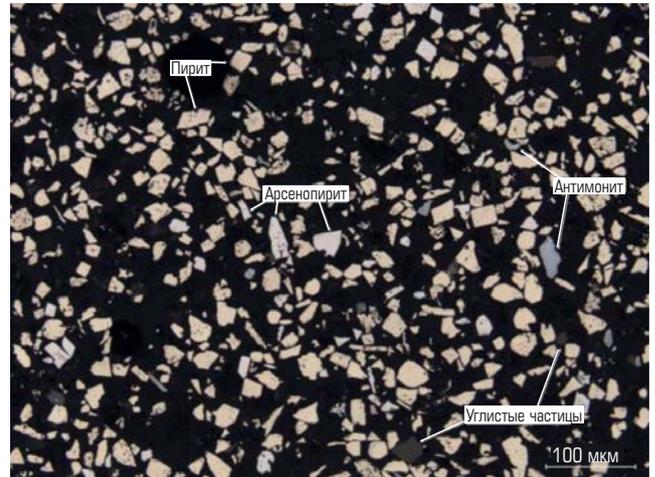
Таким образом, в пробе сульфидного концентрата содержится рудных минералов составляет 45,8 % при преобладании пирита, в меньшей степени — арсенопирита и гидроксидов железа; значительно реже встречаются антимонит, сульфиды меди, свинца, цинка и минералы блеклых руд. Основными породообразующими минералами являются кварц, глинистые и слюдистые минералы, полевые шпаты.

Проба концентрата после биоокисления характеризуется высоким содержанием породообразующих минералов (85,3 %), из которых преобладают кварц, глинисто-слюдистые минералы, сульфаты, полевые шпаты. Из полезных рудных минералов в основном наблюдается пирит.

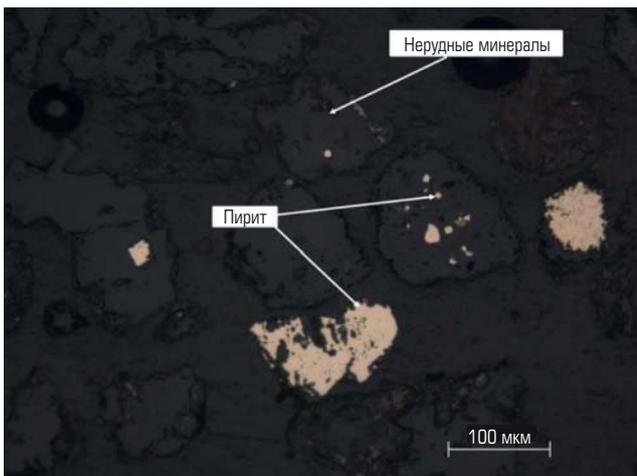
Анализ раскрытия минералов во флотационном концентрате показал (**рис. 2, 3**), что рудные минералы раскрыты более чем на 83 % (отн.). Наибольшим раскрытием характеризуются пирит и антимонит — более 95 % (отн.). Основные сростки сульфиды образуют с нерудными минералами. Для пирита также характерны сростки с арсенопиритом, которые наблюдаются во всех классах крупности, но преобладают сростки тонкого пирита с арсенопиритом. Также незначительная (<1 %) доля зерен пирита находится в виде тонких (крупностью <10 мкм) включений в угlistом веществе. Арсенопирит с пиритом образует 3,8 % (отн.) сростков, при этом такой арсенопирит наблюдается в классе крупности менее 71 мкм. При анализе продукта были



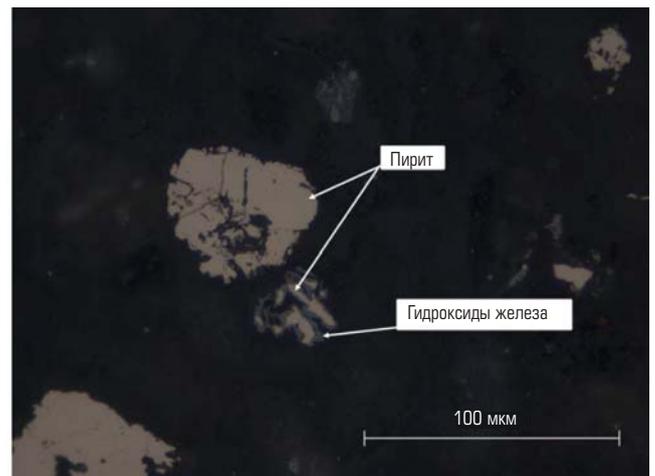
**Рис. 2.** Свободные зерна сульфидных минералов. В тонком прожилке в арсенопирите — зотитина (4 мкм). Фракция -45+20 мкм сульфидного концентрата. Отраженный свет, николи параллельны



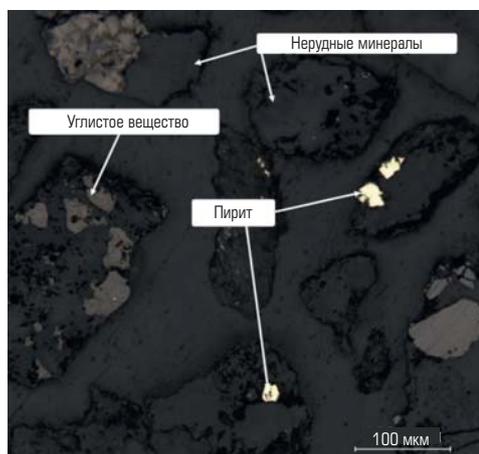
**Рис. 3.** Свободные зерна сульфидных минералов, фракция -45+20 мкм сульфидного концентрата. Отраженный свет, николи параллельны



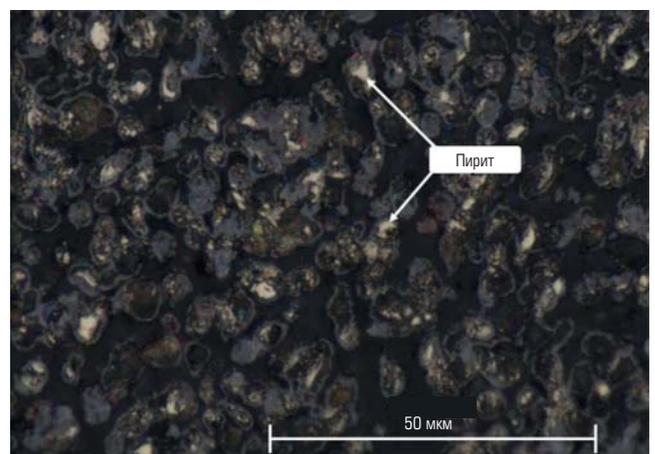
**Рис. 4.** Различные формы изменения пирита при окислении. Отраженный свет, николи параллельны



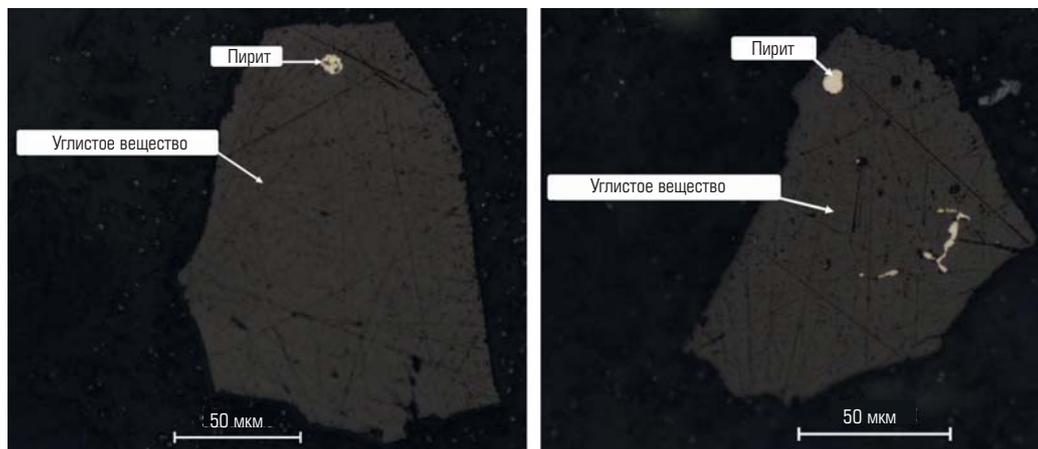
**Рис. 4.** Различные формы изменения пирита при окислении. Отраженный свет, николи параллельны



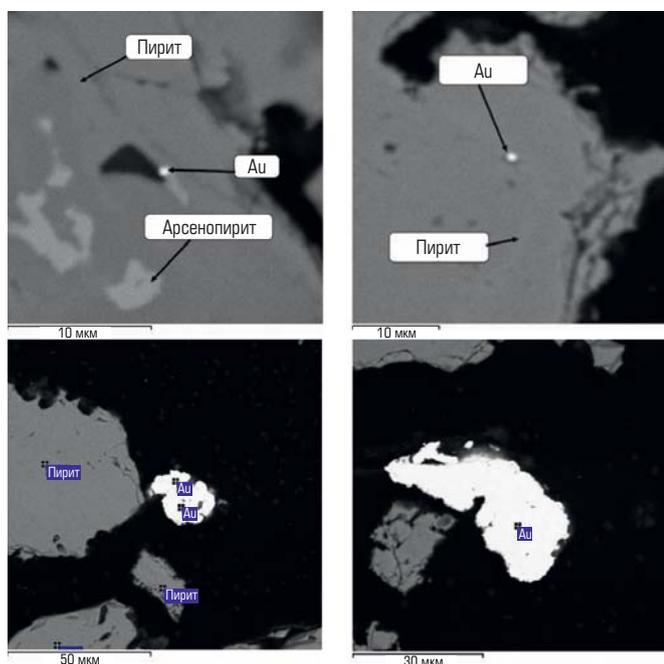
**Рис. 5.** Включения пирита в нерудных минералах в кеке биокса. Отраженный свет, николи параллельны



**Рис. 6.** Зерна пирита среди оксидов железа и биочастиц. Отраженный свет, николи параллельны



**Рис. 7.** Включения сульфидов в угlistом веществе. Отраженный свет, николи параллельны



**Рис. 8.** Формы нахождения золота в пробе биокека. Изображение в BSE

**Таблица 6.** Сравнительная характеристика распределения золота в сульфидном концентрате и биокеке, % (отн.)

Форма нахождения минерала	Сульфидный концентрат	Биокек
Свободные частицы золота, золото в сростках	17,43	69,6
Золото, заключенное в разлагающихся щелочью минералах	3,47	5,08
Золото, покрытое пленками и заключенное в минералах, растворимых в соляной кислоте	2,71	0,85
Золото в сульфидах	61,82	23,49
Золото на угле	4,28	0,46
Золото в силикатах	10,29	0,52
<b>Итого</b>	<b>100</b>	<b>100</b>

встречены единичные зерна золота в классе крупности <4 мкм в сростании с пиритом.

Анализ флотоконцентрата после биоокисления показал, что в пробе из рудных минералов преобладает пирит, также в небольших количествах наблюдают антимонит и арсенопирит, редко встречаются сфалерит, тетраэдрит с Ag, фрейбергит, антимониды Cu, Zn, Pb и сульфосоли Pb. Рудные минералы находятся в продукте как в виде свободных зерен, так и в виде мелких включений в нерудных минералах и угlistом веществе (рис. 4–7). Следует отметить, что наибольшим изменениям подверглись арсенопирит и пирит. Краевые зоны пирита, как правило, «изъедены», замещены гидроксидами железа. Наименьшему окислению подверглись антимонит, халькопирит, сфалерит, блеклая руда. В закрытых сростках с нерудными минералами, угlistым веществом сульфидные минералы (в первую очередь пирит) практически не подверглись изменениям.

Золото в пробе кека биокса наблюдается как в виде свободных частиц, так и в сростаниях с пиритом (рис. 8). Размер выделений свободного золота 15×35 мкм — 20×20 мкм, в сростаниях (чаще всего встречаются в пирите либо в ассоциации с арсенопиритом и пиритом) — менее 1 мкм. Тонкое золото в пиритах находится в закрытых сростках.

Результаты фазового анализа золота в сульфидном концентрате и в биокеке (табл. 6) показали, что в сульфидном концентрате преобладающая доля золота находится в сульфидах (61,82 %), при этом доля свободного золота составляет 17,43 %. Значительная часть (10,29 %) золота находится в сростании с силикатами.

В результате окисления флотоконцентрата в биокеке увеличивается доля свободного золота и золота в открытых сростках (69,6 %), при этом значительная часть золота остается в сульфидах (23,49 %), что может приводить к его потерям при дальнейших процессах гидрометаллургического передела.

### Заключение

Таким образом, изученные пробы сульфидного концентрата и биокека характеризуются двойной технологической упорностью.

Сульфидный концентрат, поступающий на биоокисление, имеет хорошее раскрытие сульфидных минералов. Золото во

флотоконцентрате в основном ассоциировано с сульфидами, доля свободного золота незначительна. В результате биоокисления значительная доля золота остается связанной с сульфидами, что может привести его к потерям золота при дальнейших технологических процессах.

Одной из причин недостаточного окисления сульфидов и вскрытия упорного тонковкрапленного золота является присутствие золотосодержащих сульфидов и, возможно, золота в виде тонких нераскрытых сростаний в нерудных минералах и

углистом веществе, которые изолируют их от контакта с биомассой.

Кроме того, при биологическом окислении минералов (пирита, арсенопирита и др.) могут образоваться различные органические и неорганические кислоты, а также их соли, которые могут растворять золото и серебро. Более сорбционно-активные природные углеродистые и глинистые вещества могут сорбировать золото и тем самым ухудшать процесс дальнейшего технологического передела.

#### Библиографический список

1. Бочаров В. А., Абрютин Д. В. Технология золотосодержащих руд. — М.: Издательский дом «МИСиС», 2011. — 420 с.
2. Захаров Б. А., Меретуков М. А. Золото: упорные руды. — М.: ИД «Руда и Металлы», 2013. — 452 с.
3. Лодейщиков В. В., Васильева А. В. Методические рекомендации по типизации руд, опробованию и картированию коренных месторождений золота. — Иркутск: ОАО «Иргиредмет», 1997. — 164 с.
4. Мазманян Г. А., Брагин В. И. Повышение извлечения металла из особо упорных золотосульфидных руд. Инновационные процессы комплексной и глубокой переработки минерального сырья (Плаксинские чтения 2013): матер. междунар. совещ. — Томск: Изд-во ТПУ, 2013. С. 174–178.
5. Меретуков М. А., Санакулов К. С., Зимин А. В., Арустамян М. А. Золото: химия для металлургов и обогащителей. — М.: ИД «Руда и Металлы», 2014. — 412 с.
6. Неганов В. П., Коваленко В. И., Зайцев Б. М. и др. Технология разработки золоторудных месторождений. — М.: Недра, 1995. — 336 с.
7. Санакулов К. С., Мустакимов О. М., Эргашев У. А., Ахатов Н. А. О целесообразности применения комбинированных технологий для переработки особо упорных золотосульфидных руд // Цветные металлы. 2016. № 2. С. 9–14. 7. doi: 10.17580/tsm.2016.02.01
8. Санакулов К. С., Эргашев У. А. Современное состояние и направления развития технологии биоокисления для переработки сульфидных руд на ГМЗ-3 // Горный вестник Узбекистана. 2012. № 1. С. 48–53.
9. Совмен В. К., Гуськов В. Н., Белый А. В. и др. Переработка золотоносных руд с применением бактериального окисления в условиях Крайнего Севера. — Новосибирск: Наука, 2007. — 144 с.
10. Baron J. Y., Choi Y., Jeffrey M. Double-Refractory Carbonaceous Sulfidic Gold Ores // Gold Ore Processing (Second Edition). 2016. P. 909–918.
11. Chryssoulis S. L., McMullen J. Mineralogical Investigation of Gold Ores // Gold Ore Processing (Second Edition). 2016. P. 57–93.
12. Lunt D., Briggs N. Refractory Sulfide Ores — Case Studies // Gold Ore Processing (Second Edition). 2016. P. 873–883.
13. Miller P., Brown A. R. G. Bacterial Oxidation of Refractory Gold Concentrates // Gold Ore Processing (Second Edition). 2016. P. 359–372.
14. Van Aswegen P. C., van Niekerk J., Olivier W. The BIOX™ Process for the Treatment of Refractory Gold Concentrates // Biomining / ed. D. E. Rawlings, D. B. Johnson. — Berlin: Springer-Verlag, 2007. P. 1–33.
15. Tabatabaei R. H., Nagaraj D. R., Vianna S. M. S. M., Napier-Munn T. J., Gorain B. The effect of non-sulphide gangue minerals on the flotation of sulphide minerals from Carlin-type gold ores // Minerals Engineering. 2014. Vol. 60. P. 26–32. 

«GORNYI ZHURNAL»/«MINING JOURNAL», 2016, № 11, pp. 20–25  
DOI: dx.doi.org/10.17580/gzh.2016.11.04

#### Mineralogical features of flotation concentrate after bio-oxidation

##### Information about authors

**K. S. Sanakulov**<sup>1</sup>, Director, Doctor of Engineering Sciences  
**A. V. Zimin**<sup>2</sup>, Chief Executive Officer, Candidate of Engineering Sciences  
**M. A. Arustamyan**<sup>2</sup>, Chief Operating Officer, Candidate of Engineering Sciences  
**S. P. Nagaeva**<sup>2</sup>, Head of Mineralogy Research Laboratory, SPNag@yandex.ru

<sup>1</sup> Navoi Mining and Metallurgy Plant, Navoi, Uzbekistan  
<sup>2</sup> IVS Joint Venture, Saint-Petersburg, Russia

##### Abstract

Kokpatas and Daugyztau are the large gold ore deposits in the Republic of Uzbekistan. Local gold is rebellious and finely disseminated. The current beneficiation technology involves flotation, biological and hydrometallurgy methods. In order to study dressability resistance of sulfide flotation concentrate and bio-oxidized flotation concentrate, Navoi Mining and Metallurgy Plant and IVS undertook joint analysis of material constitution of the concentrates. It is found that the sulfide concentrate meant for bio-oxidation enjoys good dissociation of minerals. After bio-oxidation considerable amount of gold remains associated with sulfide and may be lost at further process stages. Also, bio-oxidation can generate different organic and inorganic acids and their salts, which dissolve gold and silver.

**Keywords:** Kokpatas and Daugyztau deposits, gold, carbonaceous substance, flotation concentrate, bio-oxidation cake.

##### References:

1. Bocharov V. A., Abruytin D. V. Technology of gold-bearing ores. Moscow: Publishing House «MIS», 2011. 420 p.
2. Zakharov B. A., Meretukov M. A. Gold: refractory ores. Moscow: «Ore and Metals» Publishing House, 2013. 452 p.

3. Lodeyshchikov V. V., Vasileva A. V. Methodical recommendations for ore typification, sampling and mapping of gold primary deposits. Irkutsk: JSC «Irgiredmet», 1997. 164 p.
4. Mazmanyan G. A., Bragin V. I. Increasing of metal extraction from high-refractory gold-sulfide ores. *Innovation processes of complex and deep processing of mineral raw materials (Plaksin readings 2013): materials of international meeting.* Tomsk: Publishing House of Tomsk Polytechnic University, 2013. pp. 174–178.
5. Meretukov M. A., Sanakulov K. S., Zimin A. V., Arustamyan M. A. Gold: chemistry for metallurgists and dressers. Moscow: «Ore and Metals» Publishing House, 2014. 412 p.
6. Neganov V. P., Kovalenko V. I., Zaytsev B. M. et al. Gold-ore deposits mining technology. Moscow: Nedra, 1995. 336 p.
7. Sanakulov K. S., Mustakimov O. M., Ergashev U. A., Akhatov N. A. About the expediency of application of combined technologies for processing of high refractory gold-sulfide ores. *Tsvetnye Metally.* 2016. No. 2. pp. 9–14. 7. doi: 10.17580/tsm.2016.02.01
8. Sanakulov K. S., Ergashev U. A. Modern state and ways of development of biooxidation technology for sulfide ores processing at the Mining and Metallurgical Plant-3. *Gornyy vestnik Uzbekistana.* 2012. No. 1. pp. 48–53.
9. Sovmen V. K., Guskov V. N., Belyy A. V. et al. Processing of gold-bearing ores with bacterial oxidation in the Far North. Novosibirsk: Nauka, 2007. 144 p.
10. Baron J. Y., Choi Y., Jeffrey M. Double-Refractory Carbonaceous Sulfidic Gold Ores. *Gold Ore Processing (Second Edition).* 2016. pp. 909–918.
11. Chryssoulis S. L., McMullen J. Mineralogical Investigation of Gold Ores. *Gold Ore Processing (Second Edition).* 2016. pp. 57–93.
12. Lunt D., Briggs N. Refractory Sulfide Ores — Case Studies. *Gold Ore Processing (Second Edition).* 2016. pp. 873–883.
13. Miller P., Brown A. R. G. Bacterial Oxidation of Refractory Gold Concentrates. *Gold Ore Processing (Second Edition).* 2016. pp. 359–372.
14. Van Aswegen P. C., van Niekerk J., Olivier W. The BIOX™ Process for the Treatment of Refractory Gold Concentrates. *Biomining.* Ed. D. E. Rawlings, D. B. Johnson. Berlin: Springer-Verlag, 2007. pp. 1–33.
15. Tabatabaei R. H., Nagaraj D. R., Vianna S. M. S. M., Napier-Munn T. J., Gorain B. The effect of non-sulphide gangue minerals on the flotation of sulphide minerals from Carlin-type gold ores. *Minerals Engineering.* 2014. Vol. 60. pp. 26–32.