

# ОСНОВЫ ОБОГАЩЕНИЯ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

---

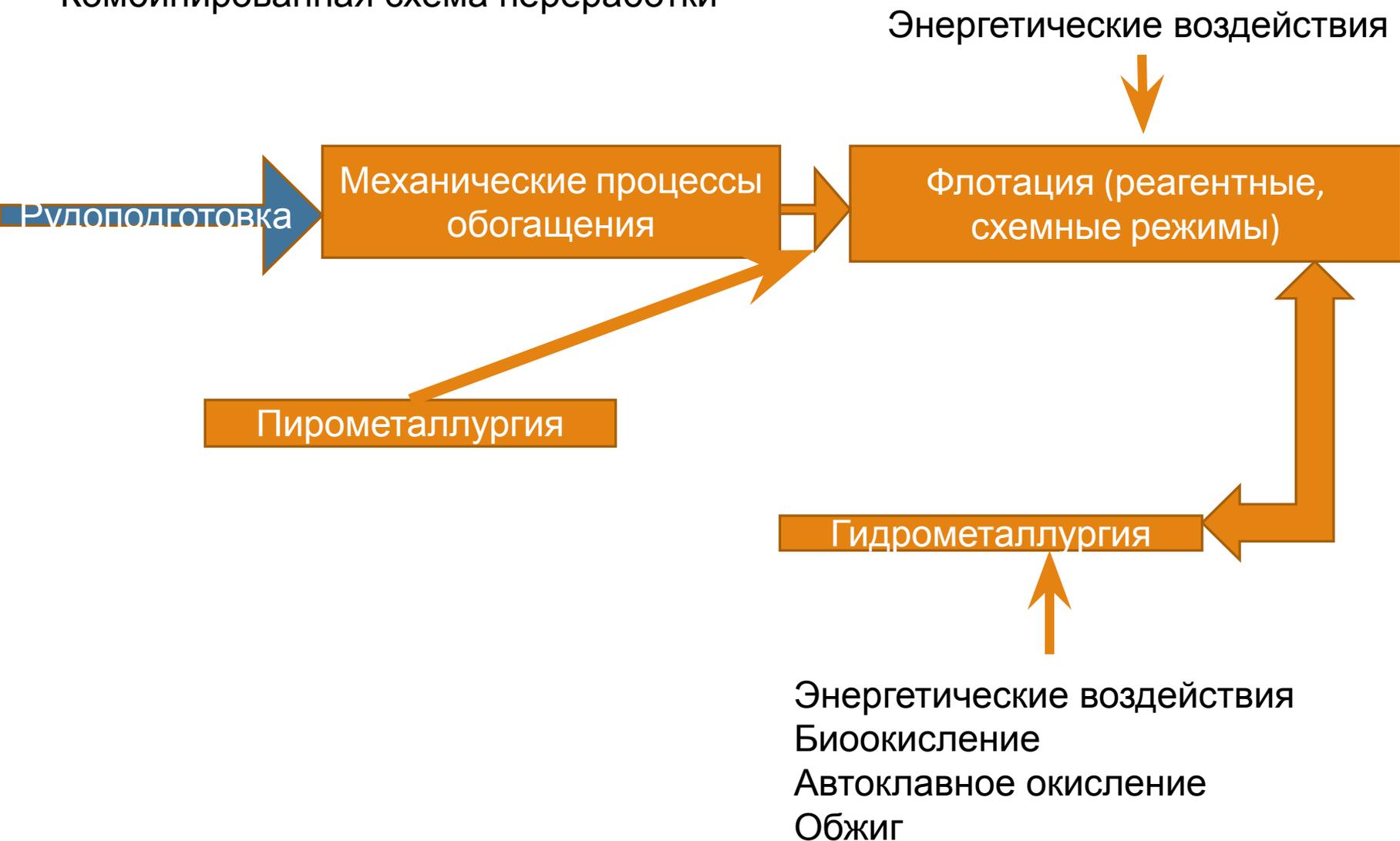
ЛЕКЦИЯ 13

ПРОЦЕССЫ И АППАРАТЫ ОБОГАЩЕНИЯ

ХИМИЧЕСКОЕ ОБОГАЩЕНИЕ

КОМБИНИРОВАННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

# Комбинированная схема переработки



# ТЕХНОЛОГИИ – ПОВЫШЕНИЕ ИЗВЛЕЧЕНИЯ ЦЕННЫХ КОМПОНЕНТОВ

Интенсификация процессов извлечения ценного компонента  
(физические, электрохимические, энергетические воздействия,  
биоокисление)

Изменение фазового состава  
минеральных форм

Изменение состава поверхности  
минералов

Изменение механических свойств  
минералов

# Термические воздействия в комбинированных схемах

---

Обжиг для разрушения  
кальцита,

Изменение фазового состава

Восстановительная  
сульфидизация,

Изменение фазового состава

Декрипитация –  
растрескивание минералов  
при их нагревании и быстром  
охлаждении.

Изменение механических  
свойств за счет модификации  
кристаллохимической  
структуры

# Комбинированный флотационно-гидрометаллургический метод (метод В.Я. Мостовича или LPF)

Измельчение

Выщелачивание (0,5-3 %  $H_2SO_4$ )  
Цементация (1,5-3,0 кг Fe на 1 кг Cu)  
Флотация

Выщелачивание  
 $pH=3,5-4,0$  и  $t = (45-70) \sim 60^\circ C$

Цементация на  
измельченном губчатом  
железе или чугуновой стружке

Флотация  
 $pH=4,5-4,7$   
дитиофосфаты, диксантогенид (80-200 г/т)

Медные к-ты (30-40 % меди + благородные Me)

# БИОХИМИЧЕСКОЕ ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ

Хорошо окисляется

Арсенопирит:  $2\text{FeAsS} + 7\text{O}_2 + \text{H}_2\text{SO}_4 + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{H}_3\text{AsO}_4 + 2\text{Fe}(\text{SO}_4)_2$

Окисляется  
бактериями

~~Пирит:  $4\text{FeS}_2 + 15\text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3 + 2\text{H}_2\text{SO}_4$  (18)~~

От 150  
ч

Трудноокисляемый  
бактериями

Образование трехвалентного железа:  $4\text{FeSO}_4 + 2\text{H}_2\text{SO}_4 + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3 + 2\text{H}_2\text{O}$

Химическое выщелачивание ионами  $\text{Fe}^{3+}$ :  $\text{FeS}_2 + \text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3 \rightarrow 3\text{FeSO}_4 + 2\text{S}^0$

Кислотное растворение карбоната:  $2\text{CaCO}_3 + 2\text{H}_2\text{SO}_4 \rightarrow 2\text{CaSO}_4 + 0.5\text{H}_2\text{O} + 2\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$

Выщелачивание осуществляют аэробные бактерии *Thiobacillus* (*Acidithiobacillus*) *thiooxidans* и *Thiobacillus ferrooxidans*, а также археи рода *Sulfolobus*.

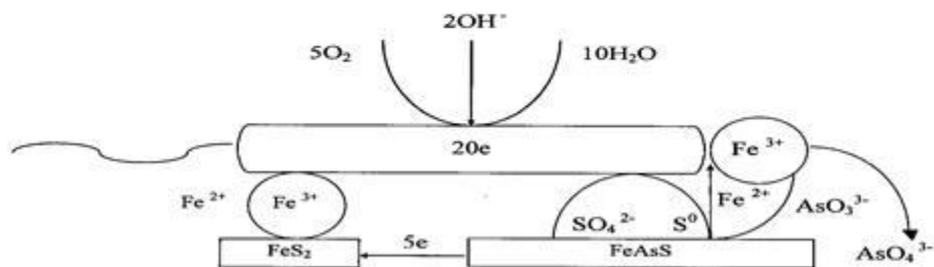
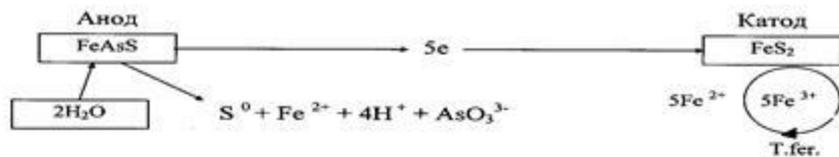


Схема бактериального окисления с учетом микрогальванопар

# Штаммы бактерий применительно к сульфидным минералам

---

*Thiobacillus ferrooxidans* (Th. ferrooxidans), способные окислять сульфидные минералы и железо (II) до железа (III) (так называемые железобактерии),

*Thiobacillus thiooxidans* (так называемые серобактерии).

Автотрофы, мезофилы,  
термофилы

Тионовые бактерии являются хемоавтотрофами, единственный источник энергии для их жизнедеятельности — процессы окисления железа, сульфидов различных металлов и элементарной серы. являющегося сильным окислителем и растворителем сульфидов). Эта энергия расходуется на усвоение углекислоты, выделяемой из атмосферы или из руды. Получаемый углерод идёт на построение клеточной массы бактерий.

*Thiobacillus thiooxidans* окисляют сульфидные минералы до сульфатов прямым и косвенным путём (когда микроорганизмы окисляют сернокислое железо (II) до железа (III), а Fe<sup>3+</sup> окислитель сульфидной серы.

Показатели	Окислительный обжиг– цианирование	Бактериальное выщелачивание– цианирование
Извлечение золота, %	92,0	97,0
Капитальные затраты, %	100	50–80
Эксплуатационные расходы, %	100	80
Срок окупаемости, лет	8,7	6,2
Рентабельность, %	100	170

# Технологии выщелачивания

---

Перколяционное (кучное, подземное и чановое)

Агитационное или чановое

# Тренд при переработке медно-порфирировых руд



Figure 5 – In place mining methodology (*Mining3, 2018*).

## THE FUTURE OF MINING: WILL IN PLACE RECOVERY EVER COME OF AGE?

R. Batterham<sup>1</sup> and D.J. Robinson<sup>2</sup>

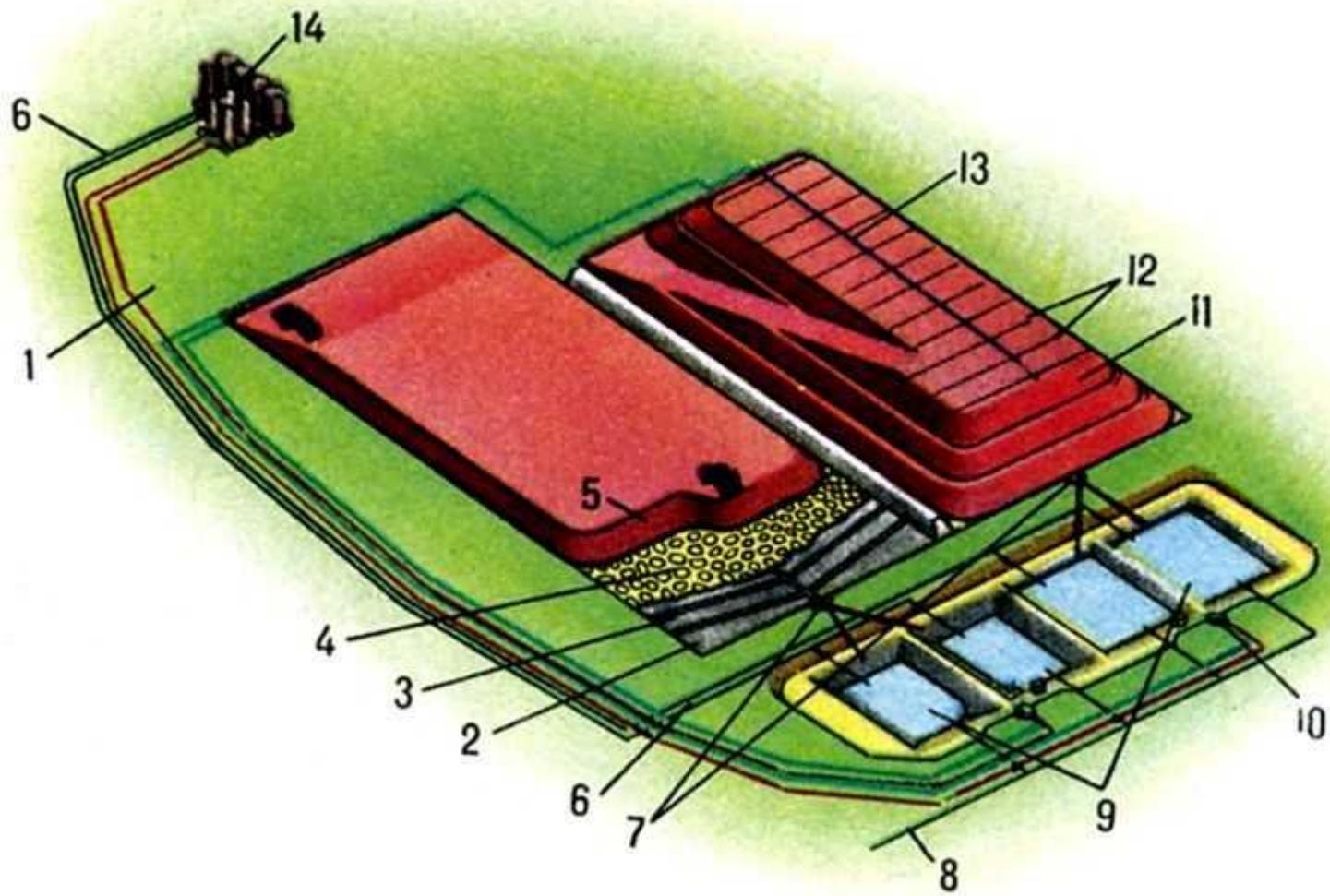
<sup>1</sup> *Department of Chemical & Biomolecular Engineering, The University of Melbourne, Australia, r.batterham@unimelb.edu.au*

<sup>2</sup> *In Situ Recovery and Processing, Mining3, Australia; CSIRO Mineral Resources Business Unit, Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation (CSIRO), Australia*

# Кучное выщелачивание Cu

---

- Дробление 100-20 мм
- Предварительная грануляция тонкого материала серной кислотой (25-75 кг/т)
- Длительность выщелачивания от нескольких месяцев до 4-5 лет
- Щелочные породные минералы <15%
- Процесс рентабельный при исходном содержании меди 0,15% и извлечении 50%
  1. ПИП
  2. ПНП
  3. ПД





Министерство природных ресурсов и экологии Российской Федерации



# SX-EV (solvent extraction – electro winning)

---

Выщелачивание

Экстракция меди в органическую фазу

Реэкстракция меди из органической фазы

Катодное электроосаждение (электролиз) меди.

# Кучное выщелачивание Au

---

Крупность материала для выщелачивания золота дроблёной руды 5-20 мм, не дроблёной - до 100 мм

Окварцованные, карбонатные, окисленные, малосульфидные

Время выщелачивания от 4 сут до мес.-сезон

Расход цианида 0,3-0,5 кг/т; известь 0,15-2,8 кг/т

Извлечение 50-92% (70%)

# Площадка КВ

---

Площадку для формирования штабелей в кучу покрывают слоем бетона, асфальта или утрамбованной глины; иногда применяют плёнки из синтетических материалов. Уклон площадки для стока растворов ( $2-4^{\circ}$ ). Отсыпку кучи ведут фронтальным погрузчиком или бульдозером. Куча имеет форму четырёхугольной усечённой пирамиды.

Высота кучи изменяется от 2 до 10(15) м, а вместимость по руде - 100-200 тыс.тонн и более.

при многократном наращивании до 60-100 м.

# Площадки по технологии формирования кучи

---

ПНП – наращиваемые постоянно

ПИП – постоянно используемые площадки – цикл 48 сут = 40 выщ+2 пром+2 слив+4 укладка и разгрузка

ПД – площадки долинного типа

# Система орошения

---

оросительные устройства в штабеле,  
схемы орошения,  
режима и вида оросителей.

# Дренажная система

---

коллекторная часть,  
фильтрующий материал  
сборные трубки

# Переработка продуктивных растворов

---

цементация (осаждение) на ряде активных металлов (цинк, алюминий, свинец, железо);

сорбционные методы, включая адсорбцию на активированном угле и ионообменных смолах;

электролитическое извлечение;

осаждение в виде нерастворимых сульфидов.

# Подземное выщелачивание

---

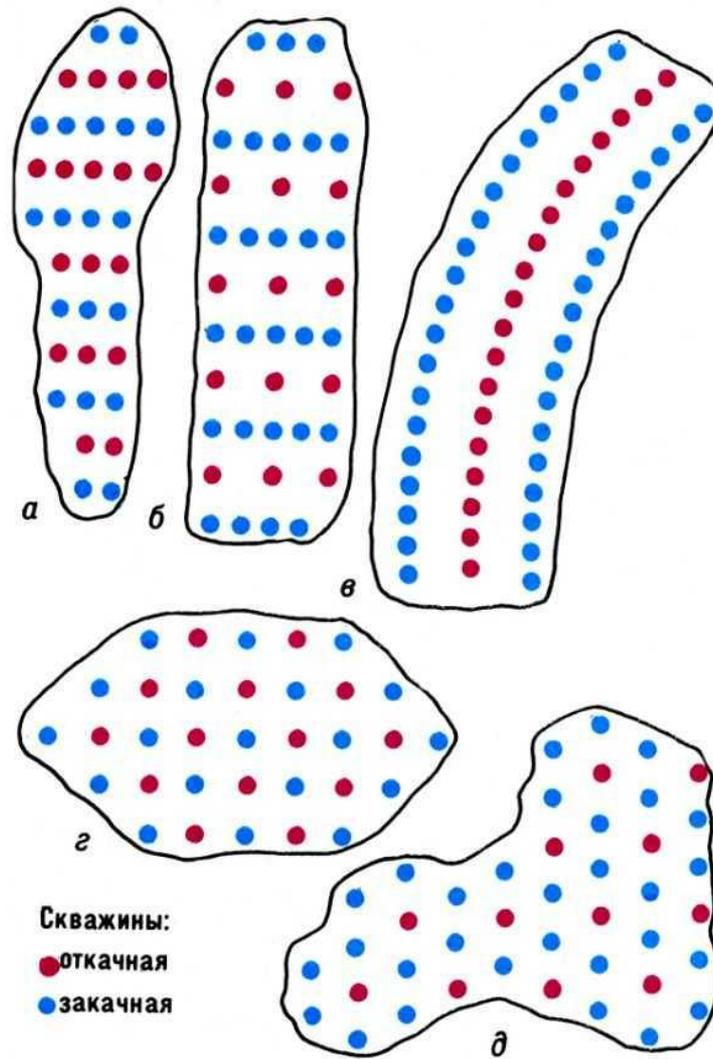
МЕДЬСОДЕРЖАЩИЕ

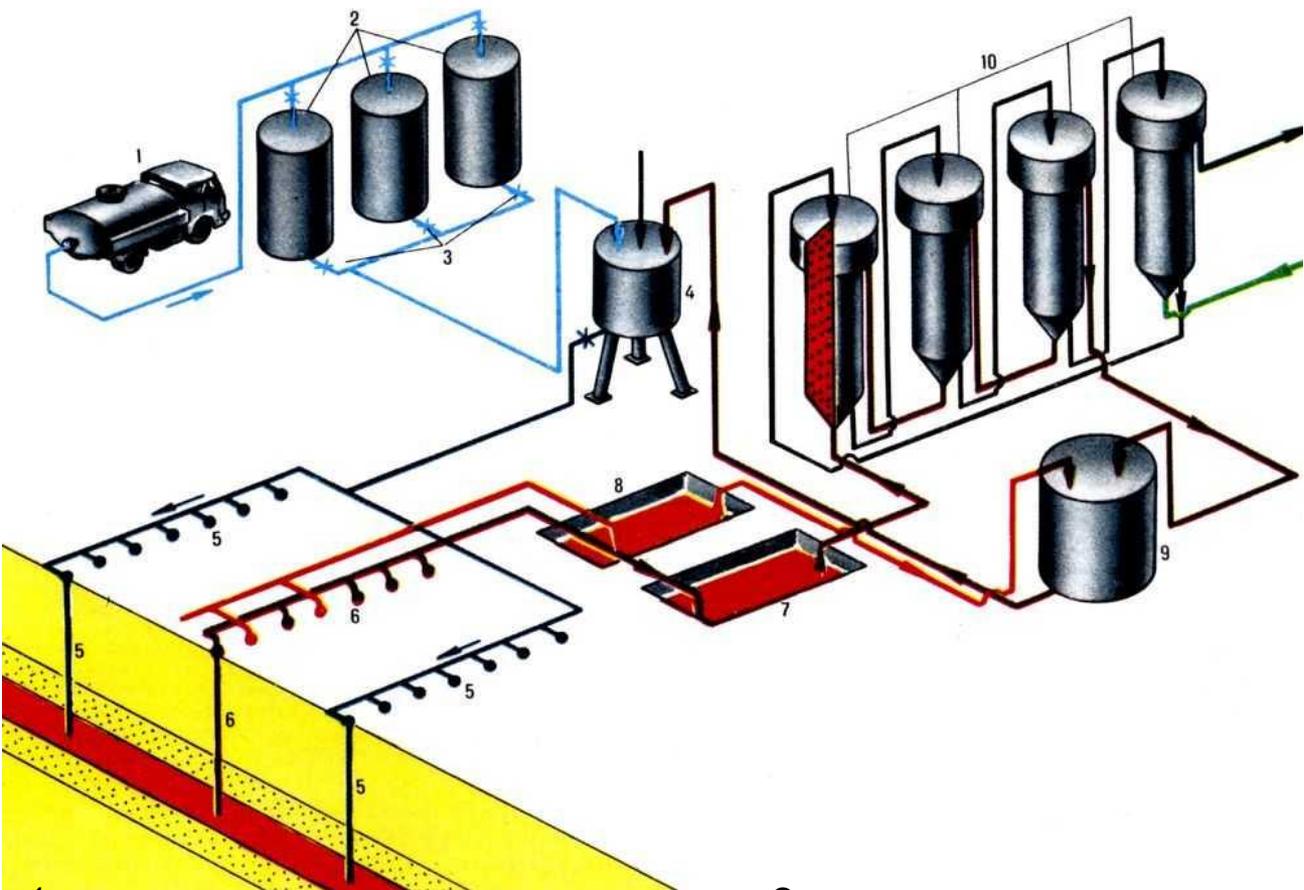
Сернокислотное

Аммиачное

ЗОЛОТОСОДЕРЖАЩИЕ

Хлоридное

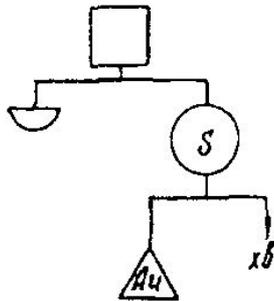




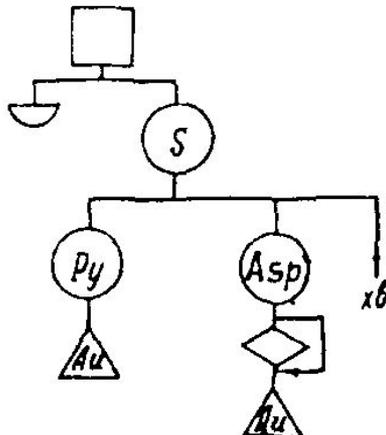
*1 - автоцистерна с реагентом; 2 - хранилище концентрированного реагента; 3 - запорные задвижки; 4 - смесительный узел для приготовления выщелачивающего раствора; 5 - закачные скважины; 6 - откачные скважины; 7 - отстойник для продуктивных растворов; 8 - отстойник для об растворов; 9 - буферная ёмкость, 10 - узел по переработке продуктивных растворов.*

# Основные технологии переработки золотосодержащего сырья

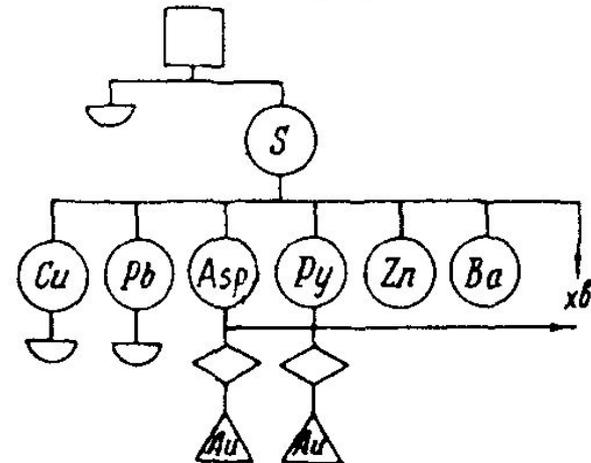
Золото - пиритный



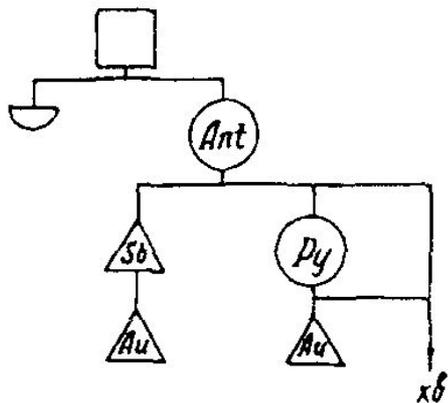
Золото-арсенопиритный



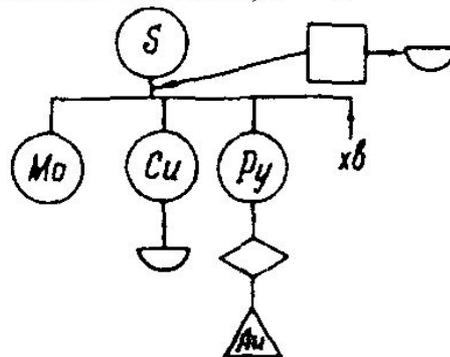
Золото - полисульфидный



Золото - антимонитовые

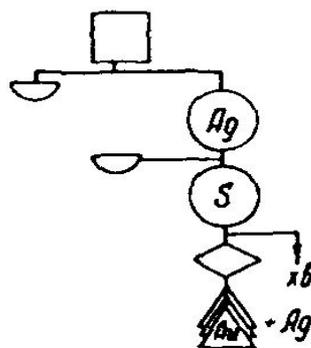


Молибденит-халькопиритовый

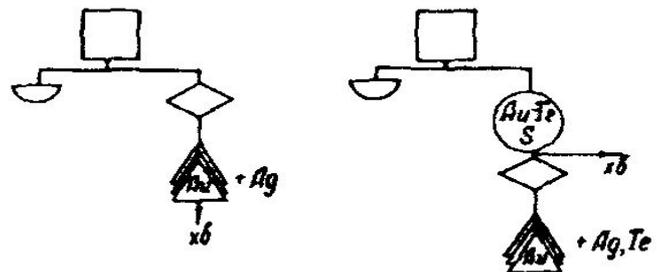


- Условные обозначения
- — гравитационный цикл,
  - — флотационный цикл
  - ◇ — обжиг
  - △ — гидрометаллургия,
  - ◐ — металлургия (плавка)

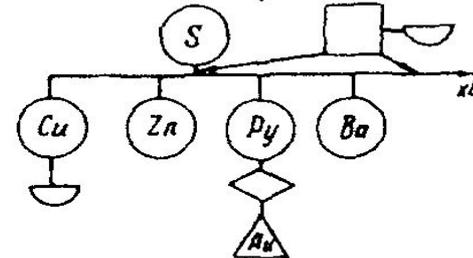
Золото-серебро-сульфидные



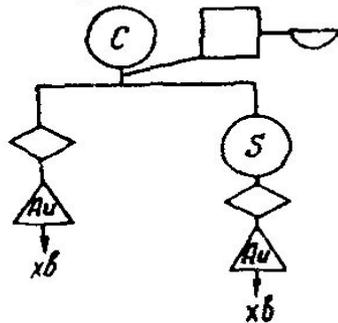
Золото-теллуридные



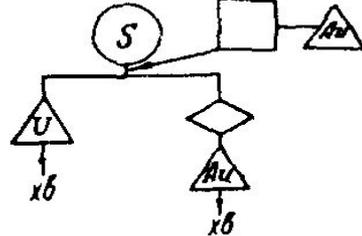
Колчеданные



Черносланцевые



Конгломератовые





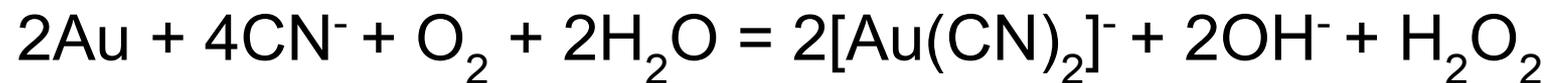
# Цианирование

---

Цианированию подвергают руды, концентраты, промпродукты, хвосты обогащения при содержании золота в них более 0,50 г/т, свободное золото в основном мелкое, тонкое и тонкодисперсное (-70 мкм +20 мкм и -20 мкм соответственно), либо золото в сростках.

При содержании золота более 200 г/т на плавку

## Основное уравнение цианирование



# Концентрация цианида и щелочи

---

Оптимальная концентрация свободного цианида составляет ~ 0,01 % NaCN; на практике применяют более крепкие растворы 0,02 – 0,05 % NaCN до 0,1%, что объясняется присутствием в минеральном сырье значительного количества примесей.

Для защитного действия от гидролиза цианида содержание CaO должно быть не менее 0,025 %. Если в качестве щелочи используют гидроксид натрия, то присутствие в растворе 0,01 % NaOH

# Выщелачивание золота

## ЦИАНИРОВАНИЕ

## БЕСЦИАНИДНЫЕ

0,2-0,5 кг/т CN+1-2 кг/т CaO

Т:Ж=1:1,5(2)

от 3 до 18 ч

□ Царская водка

□  $3\text{HCl} + \text{HNO}_3 = \text{NOCl} + \text{Cl}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$

Cl<sup>0</sup>

$\text{Au} + \text{HNO}_3 + 4\text{HCl} = \text{HAuCl}_4 + \text{NO} + 2\text{H}_2\text{O}$

□ Хлоридное

NaCl:HCl NaOCl:HCl

$2\text{Au} + 3\text{MnO}_2 + 7\text{H}_2\text{SO}_4 + 8\text{NaCl} = 2\text{HAuCl}_4 + 3\text{MnSO}_4 + 4\text{Na}_2\text{SO}_4 + 6\text{H}_2\text{O}$

□ Йодное I<sub>2</sub>:I<sup>-</sup> = 1:(5-9) 2,86 кг/т

□ Бромидное Br<sub>2</sub>:Br<sup>-</sup>

□ Тиомочевидное CS(NH<sub>2</sub>)<sub>2</sub>:Fe<sup>3+</sup> [Au(ThiO)<sub>2</sub>]<sup>+</sup> 1:5 кг/т

□ Тиосульфатное Na<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:O<sub>2</sub> (5:1)+Cu<sup>2+</sup> (катализатор)

□ Аммиачное в автоклаве (NH<sub>3</sub> 17%, t=170-175 °C, P=1,5-1,6 МПа, τ=24-30 ч)



# Восстановление золота

## ОСАЖДЕНИЕ

- Отделение твердого от жидкого (сгущение+фильтрование)
- Деаэрация
- Смешение с Zn пылью 15-50 г/м<sup>3</sup> р-ра
- Отделение от жидкого
- Кислотная очистка осадка
- Плавка на сплав Доре

## СОРБЦИЯ

Сорбция из пульп  
Отделение сорбента, промывка от пульпы, десорбция комплексов золота  
Регенерация сорбента  
Электролиз из р-ра

# Интенсификация извлечения золота

---

Обжиг

Энергетические воздействия

Автоклавное выщелачивание

Биохимическое вскрытие

