

УДК 622.7+622.34+550.4+550

**Л.В. Шумилова**

## **ВЛИЯНИЕ ФОРМ ДИСПЕРСНОГО ЗОЛОТА В МИНЕРАЛЬНОМ И ОРГАНИЧЕСКОМ ВЕЩЕСТВАХ НА ТЕХНОЛОГИЧЕСКУЮ УПОРНОСТЬ РУД**

*Проведен анализ форм нахождения дисперсного золота в минеральном и органическом веществах. Предложен новый разделительный признак технологической упорности по физико-химическим причинам.*

*Ключевые слова: формы дисперсного золота, физико-химическая упорность, глинистые минералы и углистое вещество.*

**L.V. Shumilova**  
**THE INFLUENCE OF DISPERSED  
GOLD FORMS IN MINERAL AND  
ORGANIC SUBSTANCES ON  
TECHNOLOGICAL REFRACTORY OF  
ORE**

*The article is devoted to the analysis of invisible gold forms in mineral and organic substances which was done. Besides, a new identification characteristic of ore refractory is introduced which refers to its physical and chemical features.*

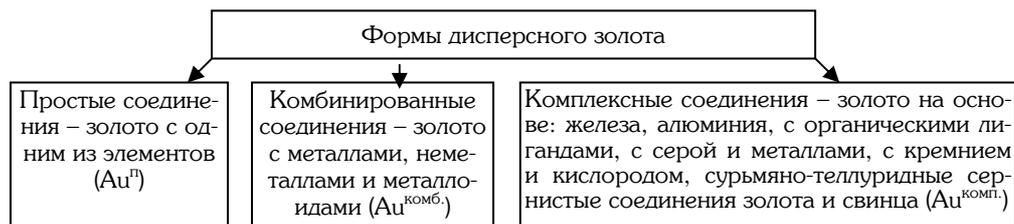
*Key words: invisible gold forms, physical and chemical refractory, clay minerals and carbon substances*

**П**онятие «дисперсное золото» является одним из самых неопределенных в геологической и технологической теории и практике. Автор данной работы придерживается мнения большинства отечественных и зарубежных геологов и под «дисперсным золотом» понимает только его рассеянную в кристаллах минералов или в углистом (органическом) веществе форму выделения, не обнаруживаемую современными электронно-микроскопическими методами исследования (в связи с этим понятие «дисперсное золото» может быть определено как выделения золота с относительно широким диапазоном дискретности распределения в минералах-

носителях - от отдельных атомов в составе микроминералов, природных сплавов, органических соединений до моносэлементных кластеров размерами порядка нанометров).

Чрезвычайное разнообразие вещественного состава сложных золотосодержащих руд, их широкая распространенность в природе, а также существующие требования максимально эффективного использования минеральных ресурсов вызывают необходимость выделения таких руд в отдельную категорию упорного золото-содержащего сырья.

Из нанообъектов следует выделить кластеры - образования, содержащие до сотен тысяч атомов. Кластеры металлов занимают промежуточное положение между атомами и массивным металлом и представляют его особое состояние с измененными физико-химическими параметрами. Поэтому при геолого-технологическом исследовании руд необходимо учитывать в комплексе общий минеральный состав руд, определяющий связь дисперсного золота с конкретным носителем и проявление сорбционных свойств, влияющих на переосаждение растворенного при цианировании золота, содержание элементов-примесей, ассоциирующих с



**Рис. 1**

золотом, содержание элементов - потенциальных фиксаторов золота в матрице (мышьяк, теллур, селен, сурьма, углерод, железо, водород).

На основе проведенного анализа форм нахождения дисперсного золота в минеральном и органическом веществах творческой группой учёных Читинского филиала ИГД СО РАН и Читинского государственного университета: Секисовым А.Г., Резником Ю.Н., Шумиловой Л.В., Конорёвой Т.Г., сделан вывод о том, что оно встречается в трех принципиально различных по характеру связей с минералообразующими элементами: в форме простых и комбинированных соединений; комплексных соединений с несколькими элементами, образующими своеобразные лиганды. Упрощенная схема классификации форм дисперсного золота представлена на рис. 1.

Классификационная схема форм дисперсного золота в минеральном и органическом веществах (рис. 2), основанная на этом признаке выделяется, следующая:

1. Дисперсное золото в форме простых соединений с одним из элементов непосредственно, в том числе металлами: металлами-аналогами и металлами, имеющими более сложную структуру ядра атома, чем у золота; неметаллами; металлоидом - стибниты.

2. Дисперсное золото в форме комбинированных соединений, в том числе: селениды; теллуриды; сурьмя-

ные соединения; сурьмяно - теллуридные соединения.

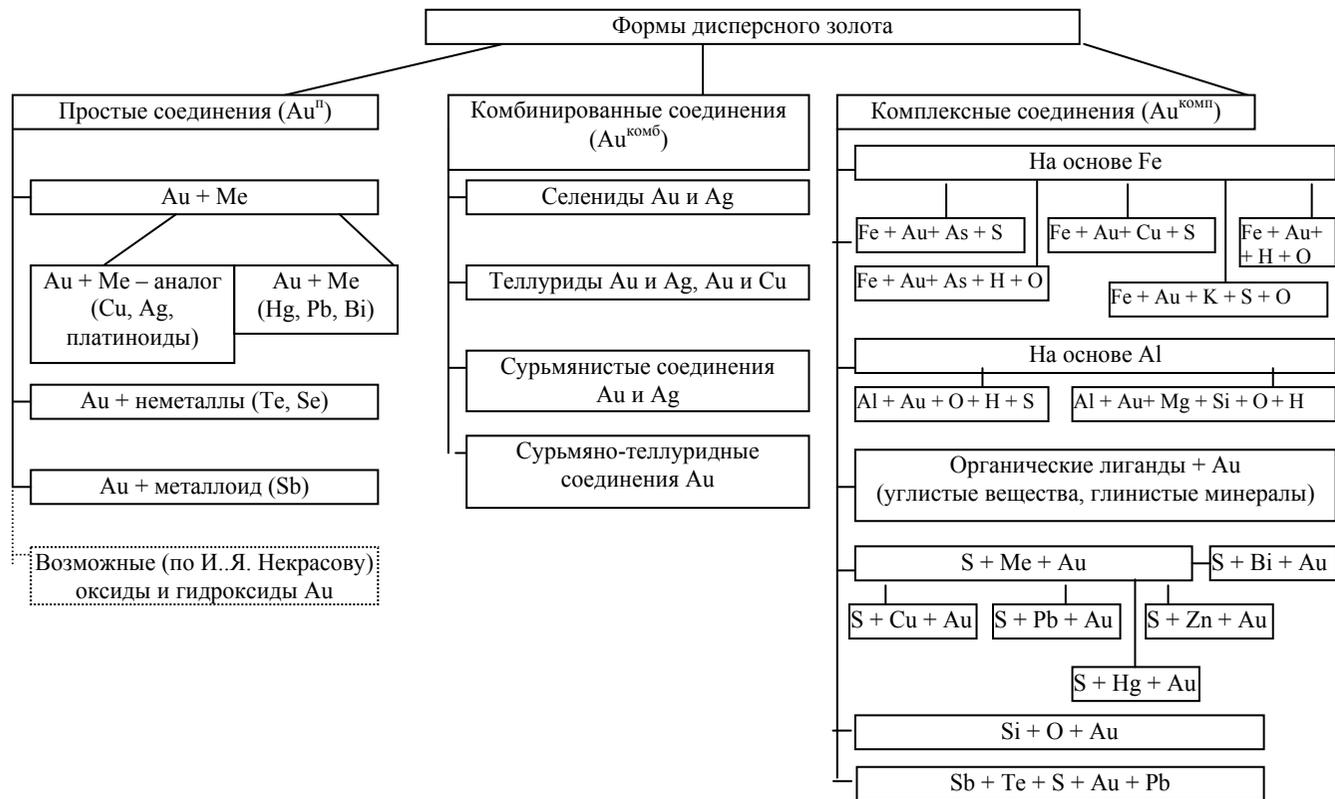
3. Дисперсное золото в форме комплексных соединений: на основе железа; на основе алюминия; с органическими лигандами; с серой и металлами - металлосернистые; с кремнием и кислородом – кремнекислородные соединения; сурьмяно-теллуридно-сернистые соединения.

На протяжении более семидесяти лет учёные стремятся создать единую классификацию золотосодержащих руд, которая бы увязывала вещественный состав руд с их технологическими свойствами.

Учитывая авторитетное мнение отечественных ученых - докторов технических наук В.В. Подейшикова (Иргиредмет), Г.В. Седельниковой (ЦНИГРИ) и В.И. Зеленова, по вопросу классификации золотосодержащих руд по упорности, следует отметить, что эти работы имеют большое практическое значение при определенных условиях.

Так В.В. Подейшиковым, в качестве главного разделительного критерия при технологической классификации золотых и серебряных руд по упорности, принимается коэффициент извлечения Au и Ag на стадии цианистого выщелачивания  $K_c^и$ , выражаемый через коэффициенты физической (ФД), химической депрессии (ХД) и сорбционной активности руды (СА).

Указанные коэффициенты в совокупности характеризуют степень



**Рис. 2. Классификационная схема форм дисперсного золота в минеральном и органическом веществе (разработана авторами с участием профессора А.И. Трубачева)**

технологической упорности руды в цианистом процессе, а каждый из них в отдельности – причину упорности руды, связанную с особенностями вещественного состава исходного сырья и определяющую в конечном итоге выбор рациональной схемы извлечения золота.

Основываясь на данном принципе и опираясь в известной мере на имеющиеся результаты исследований других авторов, а также на существующую практику переработки рудного сырья, все золотые и серебряные руды В.В. Лодейшиковым рекомендуется подразделить на простые, т. е. легкоцианируемые руды (технологический тип «А») и упорные (трудноцианируемые) руды, которые в свою очередь включают три технологических типа:

Б – руды с тонковкрапленным золотом и серебром (физическая депрессия золота в цианистом процессе);

В – руды, цианирование которых сопровождается химической депрессией золота минеральными компонентами – примесями, проявляющими восстановительные или «цианидные» свойства;

Г – руды, характеризующиеся повышенной сорбционной активностью по отношению к растворенным в цианиде благородным металлам.

Легкоцианируемые руды (технологический тип «А») рекомендуется разделить на три основные технологические разновидности: кварцевые ( $A_{Si}$ ), сульфидные  $A_{Si(Fe)}$  и окисленные ( $A_{ok(Fe)}$ ) в зависимости от преобладания в них соответствующих минералов – носителей рудного золота: кварца (силикатных пород), сульфидов (пирит, арсенопирит) и оксидов железа (лимонит и др.).

Выделение технологических разновидностей из упорных руд («Б-Г») произведено исходя из того, какие

компоненты являются конкретной причиной упорности этих руд в цианистом процессе.

Однако, в обработку часто вовлекаются руды, сочетающие в себе два или несколько признаков технологической упорности руд: ФД+ХД, ФД+СА, ФД+ХД+СА и т.д. В этом случае отнесение руды к определённой категории (тип, разновидность) производится, исходя из преобладающей формы технологической упорности в цианистом процессе. В свою очередь технологическая упорность определяется абсолютными значениями коэффициентов физической и химической депрессии, а также сорбционной активности.

В.И. Зеленовым предложена дифференцированная технологическая типизация золотосодержащих руд. Выделение основных типов руд в данном случае рекомендуется производить, исходя из наличия в них, кроме золота, других ценных компонентов. По мнению автора этой системы, необходимость извлечения попутных ценных компонентов является главным фактором, определяющим выбор технологической схемы обработки руды.

В соответствии с указанным принципом, все золотосодержащие руды подразделены на восемь основных типов: I - золотые; II - золото-пиритные; III - золото-медные; IV - золото-мышьяковые; V - золото-сурьмяные; VI - золото-урановые; VII - золото-ураново-пиритные; VIII - золото-полиметаллические. Каждый тип руды включает подтипы, различающиеся по степени окисленности минералов; в каждом подтипе, в свою очередь, выделены технологические разновидности руд, характеризующиеся различной крупностью золота и наличием компонентов-примесей, осложняющих технологию извлечения золота.

Разработанная В.И. Зеленовым классификация, является своего рода обобщением ранее выполненных в этом направлении исследований других авторов. Ученый попытался объединить в единую систему все характерные признаки золотосодержащих руд, определяющие возможности их обогащения, независимо от того, какие процессы и схемы должны лечь при этом в основу технологии переработки указанных руд. В результате такого подхода предлагаемая система технологической типизации золотосодержащих руд была громоздкой. В рекомендуемой классификации не нашли отражения такие руды как: золото-серебряные, золото-висмутовые, золото-вольфрамовые и др., а также выделения внутри каждого типа дополнительных подтипов и технологических разновидностей руд в зависимости от степени их окисления и крупности золота.

В.И. Зеленовым выделено 25 технологических разновидностей руд, и эта цифра может возрасти, по крайней мере, вдвое за счет других типов золотосодержащих руд

В научных публикациях Г.В. Седельниковой, технология переработки руд рассматривается применительно к их технологическим типам. Приводятся шесть основных технологических типов золотосодержащих руд, которые выделены с учетом промышленной значимости полезных компонентов, форм нахождения и крупности золота, степени окисленности минералов, наличия осложняющих примесей и отличаются различными технологиями переработки руд.

К этим технологическим типам руд относятся: золотой (золото-кварцевый, золото-сульфидный) со свободным и цианируемым золотом; золотой (золото-мышьяковый) с тонковкрапленным золотом в сульфиды и другие

минералы; золотосеребряный; золотополиметаллический (золото-медный, золото-свинцовоцинковый и др.); золото-сурьмяный; золотосодержащие коры химического выветривания, окисленные руды.

По отношению к основному способу извлечения золота из руд - цианированию золотосодержащие руды подразделяются на легкообогатимые (со свободным золотом и в сростках - цианируются хорошо), среднеобогатимые (со сложными минеральными формами металлов - цианируются не полностью) и труднообогатимые или упорные (с тонковкрапленными металлами и вредными примесями - цианируются плохо).

Что касается зарубежной практики обогащения руд, то детальные исследования «упорности» карлинских руд (США), проведенные Hausen, Robinson, Bucknam, Casparini и др., позволили установить, что существует две группы причин низкого извлечения дисперсного золота при цианировании – условно «физическая» и «химическая».

Проблемы низкого извлечения золота из упорных руд обусловлены следующими природными факторами:

Первая группа «причин физической упорности» включает следующие случаи:

а) золото покрыто оболочкой, состоящей из непроницаемых для циановых растворов минералов;

б) золото находится в виде сплавов;

в) золото покрыто (изначально или в процессе обработки) пленками, блокирующими доступ к нему цианидов;

г) руда содержит сорбционноактивный для золота компонент - глинистые минералы или углистое вещество, поглощающие его из раствора, быстрее, чем технологические сор-

бенты (активированный уголь или ионообменные смолы).

Вторая «химическая» группа причин упорности:

а) руда содержит нерастворимые в циановых растворах теллуриды;

б) руда включает минералы и органические соединения, активно взаимодействующие с компонентами технологического раствора и золото-циановым комплексом - сульфидные минералы, продуцирующие роданиды и поглощающие растворенный кислород, гуминовые кислоты, функциональные группы которых взаимодействуют с золотосодержащими соединениями.

Рассмотренная классификация причин упорности руд с дисперсным золотом, предложенная американскими геологами, безусловно, является научно обоснованной и практически применимой. Вместе с тем учитывая все многообразие генетических типов месторождений руд, содержащих дисперсное золото в различных формах, использование многоступенчатых технологических схем их переработки, необходимо ориентируясь на выделенные причины упорности, проводить геолого-технологическую оценку руд исходя из конкретных условий.

Приведенные выше примеры наглядно показывают, что разработка единой (универсальной) классификации золотосодержащих руд, в одинаковой степени удовлетворяющей специалистов различного профиля, является весьма сложной задачей, к решению которой можно подходить с самых различных позиций.

Следует отметить, что при разработке систем классификации золотосодержащих руд, есть причины упорности, которые часто не учитываются:

1) в процессе цианирования при кучном выщелачивании идут конкурирующие процессы сорбции кислорода каплями реагента при эмитерном (капель-

ном) орошении и его дегазации при фильтрации раствора в материале кучи;

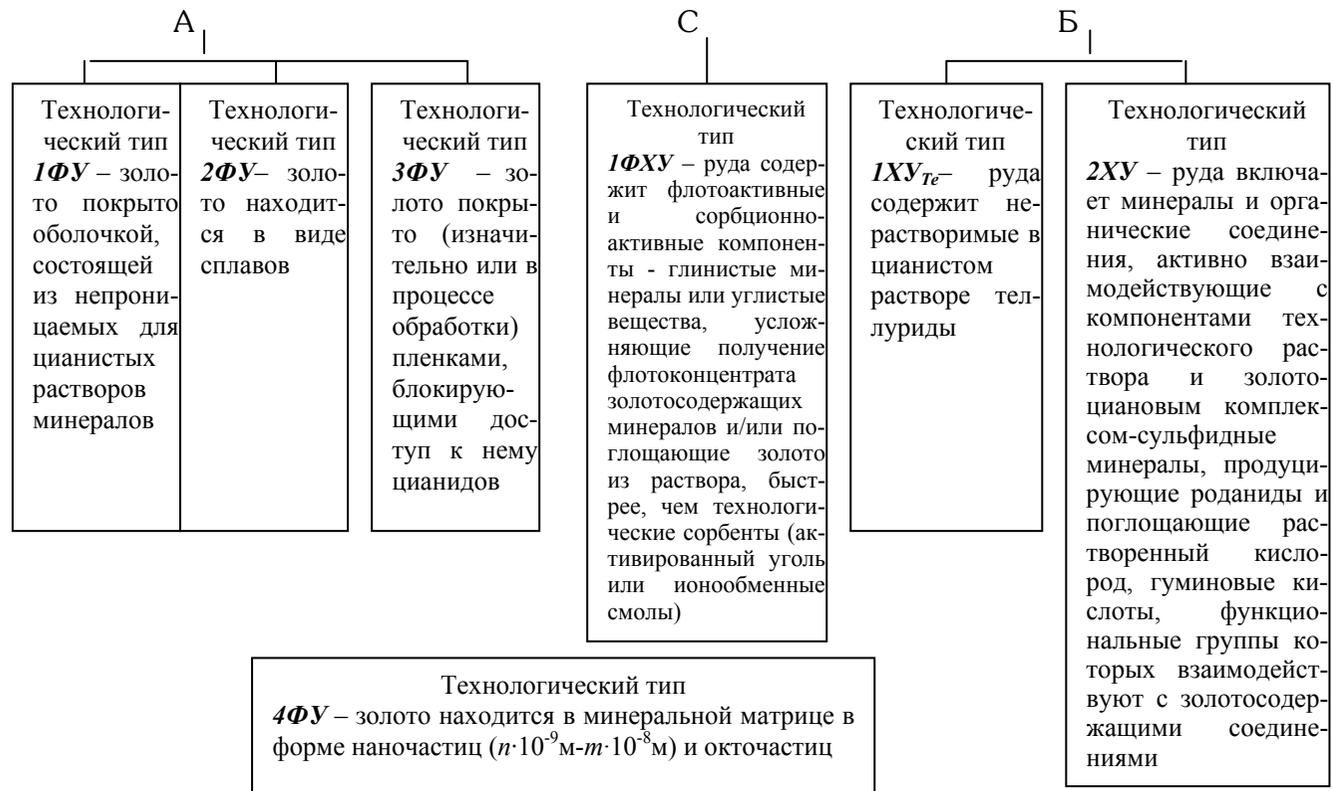
2) наличие покровных плёнок («рубашек», «наклёпок» и т.п., которые сорбируют реагент и останавливают процесс диффузии его в минеральной матрице).

Анализ результатов, проведенных исследований, сопоставление их с промышленным опытом извлечения золота из руд сложного вещественного состава, практически всех известных в мире разновидностей золоторудного сырья, привели автора к выводу о целесообразности выделения упорных золотосодержащих руд с дисперсным золотом в отдельную категорию минерального сырья и выработке научно-обоснованных критериев для выбора рациональной технологии их переработки.

В соответствии с целевой направленностью научной работы автора, основными объектами рассмотрения в разработанной классификации, являются сульфидные золотосодержащие руды или продукты их переработки. Технология обработки указанных минеральных объектов характеризуется рядом общих признаков. Главным из них является использование цианистого способа извлечения золота. Исходя из этого, разработан вариант технологической классификации золотосодержащих руд с дисперсным золотом по технологической упорности руд, основанный на отношении этих руд к процессу цианирования.

В классификации технологические типы выделяются по уровню извлечения при использовании стандартных схем сорбционного цианирования, а подтипы – по химической активности и концентрации, используемых при технологическом тестировании окислителей перед цианированием (от гипохлорита натрия до перекисно-щелочной сети) – рис. 3.





**Рис. 3. Классификация золотосодержащих руд с дисперсным золотом по технологической упорности**

Все золотосодержащие и комплексные руды с дисперсным золотом в зависимости от показателя извлечения в них металла при стандартном цианировании более или менее 80% делятся соответственно на простые (П) – легкоцианируемые (не упорные или легко- и среднеобогатимые) и упорные (У) – трудноцианируемые (труднообогатимые).

В соответствии с разработанной классификацией руды, у которых извлечение золота в жидкую фазу при использовании атомно-абсорбционного метода анализа составило менее 80%, отнесены к упорным рудам. В свою очередь упорные руды в зависимости от химической активности и концентрации, используемых при технологическом тестировании окислителей перед цианированием, делятся на три группы: руды с физическими причинами упорности, руды с физико-химическими причинами упорности и руды с химическими причинами упорности. Каждая из выше указанных групп подразделяется на ряд типов.

Руды с физическими причинами упорности (ФУ) классифицируются на четыре технологических типа:

- технологический тип *1ФУ* – золото покрыто оболочкой, состоящей из непроницаемых для цианистых растворов минералов;
- технологический тип *2ФУ* – золото находится в виде сплавов;
- технологический тип *3ФУ* – золото покрыто (изначально или в процессе обработки) пленками, блокирующими доступ к нему цианидов;
- технологический тип *4ФУ* – золото находится в минеральной матрице в форме наночастиц ( $1 \cdot 10^{-9}$  м -  $1 \cdot 10^{-8}$  м) и окточастиц

К рудам с физико-химическими причинами упорности (ФХУ) относится технологический тип *1ФХУ*, т.е. руды, которые содержат флотоактив-

ные и сорбционно-активные компоненты - глинистые минералы или углистые вещества, усложняющие получение флотоконцентрата золотосодержащих минералов и/или поглощающие золото из раствора, быстрее, чем технологические сорбенты (активированный уголь или ионообменные смолы).

Руды с химическими причинами упорности (ХУ) подразделяются на два технологических типа:

– технологический тип *1ХУ<sub>Te</sub>* – руды содержат нерастворимые в цианистом растворе теллуриды;

технологический тип *2ХУ* – руды включают минералы и органические соединения, активно взаимодействующие с компонентами технологического раствора и золото-циановым комплексом-сульфидные минералы, продуцирующие роданиды и поглощающие растворенный кислород, гуминовые кислоты, функциональные группы которых взаимодействуют с золотосодержащими соединениями.

Для выбора оптимального варианта переработки золотосодержащего минерального сырья внутри каждого технологического типа выделяются промышленные сорта руды по упорности в зависимости от содержания золота – богатые, рядовые, бедные и по уровню дисперсности ценного компонента.

К легкообогатимым рудам не упорным - легкоцианируемым относятся руды зоны окисления и золото-кварцевой формации. На их долю приходится более половины запасов золота. Месторождения с богатыми рудами эффективно обогащаются по простой технологии (гравитация или гравитация + сорбционное цианирование, либо сорбционное цианирование) с извлечением золота 92-98 %

К среднеобогатимым рудам, в соответствии с разработанной классифи-

кацией, относятся смешанные (окислено-сульфидные) и сульфидные. Наличие в золотосодержащих рудах дисперсного золота, а также окисленных или сульфидных примесей, усложняют технологию их переработки. Для обогащения золототеллуридных руд применяют комбинированные схемы, основанные на сочетании процессов гравитации и сорбционного цианирования, либо только сорбционное цианирование.

Многокомпонентность сульфидных золотосодержащих руд с микронным и субмикронным (дисперсным) золотом обуславливает необходимость применения довольно сложных технологических схем обогащения гравитацией и флотацией, иногда и цианирование хвостов флотации, плавки полученных концентратов. Все это ведет к удорожанию стоимости переработки руд и поэтому ставится задача создания новых эффективных технологий на основе использования фотометрической и радиометрической сортировки, биоокисления, автоклавного сорбционного цианирования.

Второе место по запасам и третье по прогнозным ресурсам после легкообогащаемых занимают упорные руды (трудноцианируемые - труднообогащаемые): сульфидно-сульфосолевые,

сульфидно-углистые, сульфидно-сульфосолевые с углистыми и органическими веществами. Эти руды являются потенциальным резервом увеличения добычи золота в России.

Большая часть этих месторождений расположена в районах с суровыми климатическими условиями. В Забайкальском крае это: Итакинское, Дельмачик, Быстринско-Ширинское, Культуминское, Дыбыксинское, Талатуйское, Ниже-Ключевское и др.

С целью ускорения вовлечения в эксплуатацию крупных месторождений упорных золотомышьяковых руд с дисперсным золотом, расположенных в регионах России, необходимо более ускоренными темпами внедрять в промышленность наиболее экономически рентабельные и экологически безопасные способы переработки. Один из таких способов разработан в Читинском филиале ИГД СО РАН совместно с РГГРУ - это кюветно-кучное выщелачивание золотосодержащего минерального сырья. Технология кюветно-кучного выщелачивания золота имеет сменные активационные блоки и адаптирована к типу руды и её технологической упорности, что позволяет значительно увеличивать извлечение дисперсного золота, а также повысить эффективность и интенсивность процесса выщелачивания.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Подейщиков В.В.* Основы технологии извлечения золота и серебра из упорных руд: Дис. д-ра техн. наук Иркутск. 1987. - 457 с.

2. *Седельникова Г.В.* Опыт применения кучного выщелачивания золота // Ми-

неральные ресурсы России. Экономика и управление. 1996, № 5. - С. 21-25.

3. *Секисов А.Г.* Дисперсное золото. Геологические и технологические аспекты. /А.Г.Секисов. Н.В.Зыков. В.С.Королёв. - Чита: ЧитГУ, 2007. - С 104. **МИАБ**

#### Коротко об авторе

*Шумилова Л.В.* – кандидат технических наук, докторант ЧитГУ, зам. директора ЗабГК. [zabgc@megalink.ru](mailto:zabgc@megalink.ru)

УДК 622.34+550.4

**Л.В. Шумилова**

## **АНАЛИЗ ПРИЧИН УПОРНОСТИ РУД С ДИСПЕРСНЫМ ЗОЛОТОМ ПРИ ЦИАНИРОВАНИИ**

*Проведены лабораторные исследования на технологических пробах золотосодержащей руды методом цианирования. Установлено отрицательное влияние минералов - примесей на выщелачивание золота. Предложены методы интенсификации извлечения металла.*

*Ключевые слова: дисперсное золото, физико-химические причины упорности руды, физические и физико-химические методы активации.*

**L.V. Shumilova**  
**ANALYSIS OF DISPERSED GOLD  
ORE REFRACTORY DURING  
CYANIDATION**

*A number of laboratory examinations of gold ore samples by cyanidation method have been done. In result it was defined that minerals-impurities have negative effect on gold leaching. New effective methods of metal extraction are introduced.*

*Key words: invisible gold, physical and chemical refractory of ore, physical and chemical acceleration.*

**А**ктуальность проблемы рационального использования упорных руд с тонковкрапленным золотом и серебром связана не только с ухудшением качества рудного сырья, перерабатываемого или планируемого к переработке на предприятиях отрасли, но также и с резко возросшими в последние годы требованиями к комплексности использования сырья и охране окружающей среды от воздействия токсичных отходов промышленного производства. Эти требования приобретают особую остроту в случае переработки именно упорных руд, характеризующихся, как правило, сложным вещественным составом.

Развитие минерально-сырьевой базы золотодобывающей промышленности на современном этапе связано, главным образом, с масштабным во-

влечением в разработку руд с рассеянными (дисперсными) формами нахождения золота в кристаллической решетке минералов-носителей.

Наличие в рудах дисперсного золота является одной из главных причин технологической упорности золоторудного сырья. При этом, естественно, имеется в виду, что минералы, являющиеся носителями дисперсного золота, должны обладать плотной механической структурой, абсолютно не проницаемой для цианистых растворов. Именно совокупность двух факторов: плотность структуры минеральных зерен плюс дисперсность заключенного в них золота и обуславливают технологическую упорность золотых руд и концентратов в гидрометаллургическом процессе.

Частицы тонкодисперсного золота распространены значительно более широко, чем видимые золотины. Они присутствуют во всех рудных месторождениях не только золота, но и многих других металлов, где видимое золото не встречается, а также рассеяны в больших массах гидротермально измененных пород. Вероятно, не будет преувеличением утверждать, что эта форма нахождения самородного золота в эндогенных месторождениях является универсально рас-

пространенной. Соответственно велики общие количества «распыленного» золота.

В месторождениях некоторых рудных формаций преобладающая часть золота представлена ультрамелкими его вкраплениями в сульфидах. Таковы колчеданные, свинцово-цинковые и медно-никелевые формации руд. Тонкое золото в существенных количествах присутствует в рудах, многих сульфидно-кварцевых месторождений. Очевидно, что его роль в общем балансе добываемого металла значительна.

Общая степень обогащения сырья при переработке золотосодержащих руд является чрезвычайно высокой (в пределах 100–200 тыс.).

Важно подчеркнуть, что все авторы, изучавшие «невидимое» золото в сульфидах, единодушны во мнении: любая форма такого золота чрезвычайно упорна в технологическом отношении и не может быть извлечена цианированием без специальной химической подготовки, связанной с деструкцией и окислением ассоциирующих золото сульфидов. А любой процесс окисления (обжиг, автоклавное вскрытие, бактериально-химическая обработка и др.) в свою очередь неизбежно предполагает в получаемых продуктах дисперсного золота в наиболее устойчивой его модификации – металлической форме.

Проблемы низкого извлечения дисперсного золота из руд обусловлены физическими и химическими причинами упорности. Растворению золота препятствуют покровные образования на его поверхности. Если золото покрыто сплошной и нерастворимой в цианистом растворе оболочкой, то оно при цианировании остается в хвостах. Чаще естественные покровные образования проницаемы для цианистых растворов и их роль сводится лишь к замедлению растворения золота. Замедляющее действие пленки ксантогенатов

на растворение золота и его сплавов серебром при цианировании продуктов флотации сказывается лишь в первые часы перемешивания. Затем эта пленка исчезает, и золото растворяется с обычной скоростью.

На скорость растворения золота значительное влияние оказывает состав металла. Скорость растворения сплавов Au-Ag и Au-Cu увеличивается с увеличением содержания в них золота, причем сплавы с медью растворяются хуже, чем сплавы с серебром. Медленно растворяется золото, связанное с дисперсным железом.

Присутствие в рудах золота, покрытого поверхностными пленками, – довольно распространенное явление. Наиболее часто такое золото встречается в ожелезненных окисленных рудах, носящих название «железной шляпы». Основными составляющими пленок на зернах золота в данном случае являются обводненные (гидратированные) окислы железа, придающие золотинам характерную буровато-коричневую окраску, похожую на ржавчину («ржавое» золото). Иногда в состав пленок входят безводные окислы железа и марганца, а также некоторые другие химические соединения, типичные для зоны окисления первичных золотосодержащих руд.

Практика гидрометаллургической переработки золотосодержащих руд и концентратов показывает, что наиболее активными поглотителями кислорода в цианистых растворах являются минералы и химические соединения железа (FeS, FeSO<sub>4</sub> и др.). Весьма активными поглотителями кислорода являются также растворимые щелочные сульфиды (Na<sub>2</sub>S, K<sub>2</sub>S), которые часто образуются в цианистых растворах в результате взаимодействия щелочей с сульфидными железами или серебром. Иногда они содержатся в исходных пре-

паратах, применяемых в гидрометаллургическом процессе (циансплав).

Поглощение кислорода восстановителями является не единственной причиной химической депрессии золота при цианировании. Аналогичное действие на золото могут оказывать и цианиды, т.е. поглотители  $\text{NaCN}$ , присутствующие в исходных рудах в виде соответствующих минералов или химических соединений. К числу таких компонентов могут быть отнесены все окисленные и большинство сульфидных минералов меди, а также закисные соединения железа ( $\text{FeSO}_4$ ,  $\text{Fe}(\text{OH})_2$ ), пирротины, растворимые сульфиды натрия и калия, сернистые минералы сурьмы, мышьяка и т.д.

Железо и сера, входящие в состав природного пирротина или марказита, выступают в роли весьма активных поглотителей цианида и кислорода, поэтому наличие указанных минералов в исходном сырье может явиться серьезным препятствием для осуществления цианистого процесса.

С целью изучения основных закономерностей и определения параметров процесса выщелачивания благородных металлов и влияния примесей на выщелачивание золота проводились лабораторные исследования на рудном материале технологических пробы окисленной руды.

Результаты химического анализа показали повышенное содержание железа в руде: в пробе сумма  $\text{FeO} + \text{Fe}_2\text{O}_3$  составляла 64,17%. Железо в руде находилось преимущественно в окисной форме ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ). Сера в руде присутствовала преимущественно в сульфатной форме, содержание серы невысокое – до 0,5 %. Содержание органического углерода в руде также невысокое до 0,2 %. Ртуть в руде присутствовала в количестве до 80 г/т.

Выщелачивание осуществлялось в полиэтиленовых перколяторах внут-

ренним диаметром 130 мм, высотой 1 и 1,5 м. Длина пути фильтрации растворов составляла 0,6–1,1 и 1,4–1,5 м. Подача выщелачивающих растворов осуществлялась сверху, сбор продуктивных растворов производился снизу перколятора. Режим выщелачивания – круглосуточный, орошение – капельное. В качестве выщелачивающих растворов использовались растворы цианистого натрия, в качестве защитной щелочи применялись  $\text{NaOH}$  и  $\text{CaO}$ . Извлечение золота из продуктивных растворов осуществлялось на угле.

В процессе моделирования выщелачивания Au установлено, что в технологические растворы попутно с золотом переходит часть находящихся в руде металлов-примесей. Перевод в жидкую фазу металлов-примесей в первую очередь это: As, Cu, Zn, Ni, Co, Hg, Fe, Ca и Mg связан с наличием в растворах цианидов и щелочностью водной фазы.

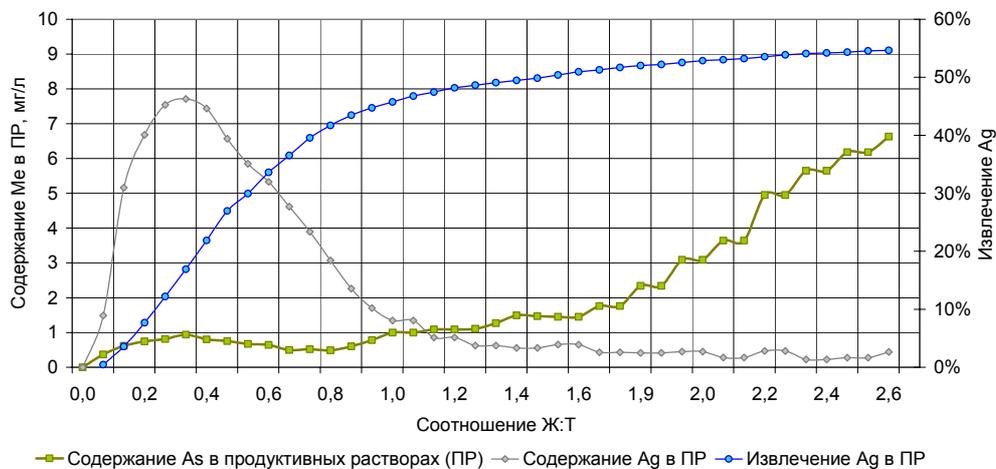
Динамика фильтрационного выщелачивания некоторых металлов-примесей показана на рис. 1-3.

Помимо золота и железа комплексные соединения с цианидами образуют также некоторые примесные элементы (никель, кобальт, медь, цинк, серебро), что создает определенные проблемы при последующем извлечении благородных металлов из раствора.

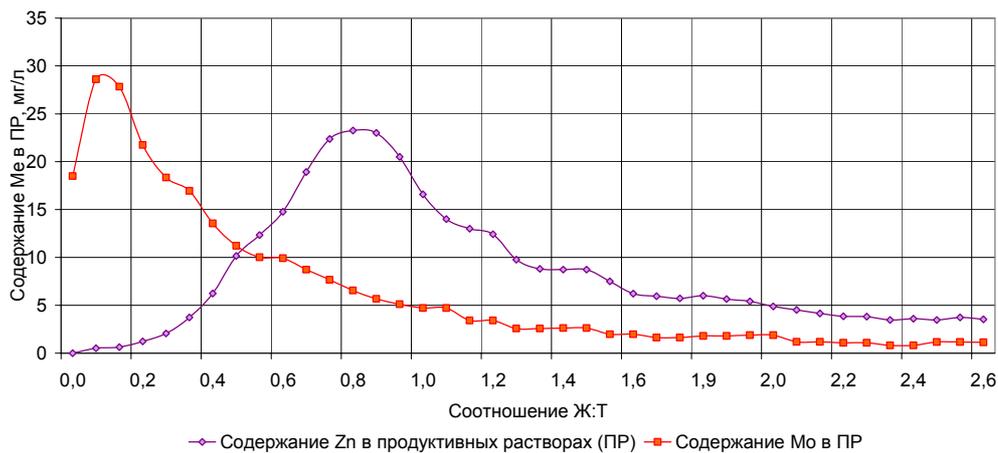
Мышьяк из скородита переходит в раствор в относительно небольшом количестве преимущественно в форме не циановых соединений, а арсенатов.

Дисперсное золото из гетита, гидротетита и скородита также благодаря быстрому растворению железа сравнительно легко образует новые связи с циановым комплексом (цианопероксидным) комплексом.

В алюмосодержащих минералах (алуните и монтмориллоните) отсутствуют цианорастворимые компоненты.



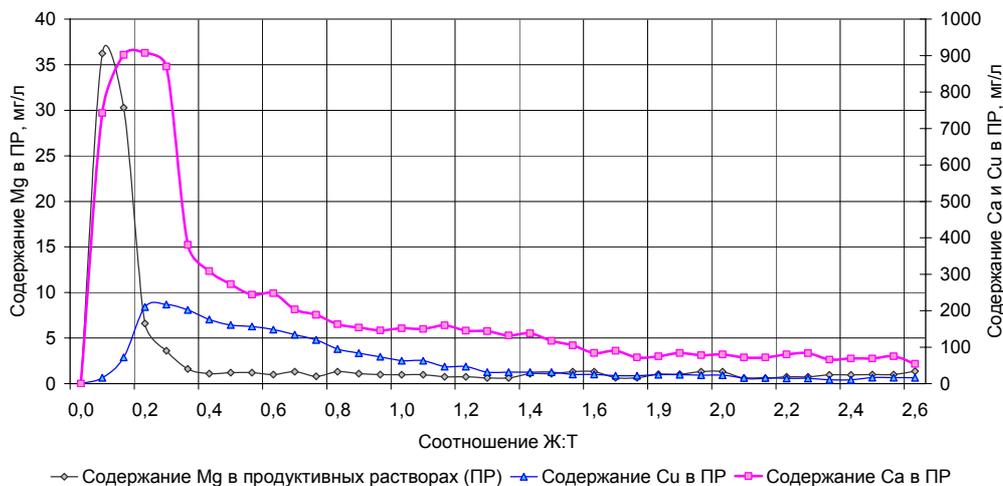
**Рис. 1. Перколяционное выщелачивание Ag и As в ПР**



**Рис. 2. Перколяционное выщелачивание Zn и Mo в ПР**

Поэтому из них дисперсное золото в процессе цианирования извлекается лишь частично, в том случае, если имеют место развитые микронарушения в структуре их кристаллических решеток. Причем, поскольку монтмориллонит, благодаря своему составу и микроструктуре обладает сорбционными свойствами, то извлечь из него золото

особенно сложно. Наиболее сильное депрессирующее действие на процесс растворения металлического золота в водных растворах щелочных цианидов оказывают металлы и химические соединения сурьмы, присутствие которой в золотых и серебряных рудах является одним из наиболее характерных признаков их технологической упорности.



**Рис. 3. Перколяционное выщелачивание Cu, Ca и Mg в ПР**

В процессе цианирования золото-сурьмянистых руд золотины могут покрываться плотным налетом, состоящим из химических соединений сурьмы, присутствующих обычно в щелочных цианистых растворах. По своей химической активности в цианистом процессе природные минералы сурьмы могут быть расположены в следующей последовательности: антимонит, валентинит  $Sb_2O_3$ , минералы группы сульфосолей (пираргирит  $3AgS \cdot Sb_2S_3$ , тетраэдрит  $3Cu_2S \cdot Sb_2S_3$  и др.), сервантит  $Sb_2O_4$ .

Заметное депрессирующее действие на золото и серебро при цианировании оказывают минералы и химические соединения меди, на растворение которых расходуется от 2,3 до 3,4 кг NaCN на 1 кг меди, присутствующей в исходной руде.

Наряду с первичными пленками в процессе обогащения и металлургической переработки золотосодержащих руд, возможно образование на поверхности золотин пленок вторичного характера, которые также могут являться причиной недоизвлечения металла при цианировании.

Образование химических пленок на золоте может также происходить за счет повышенных концентраций в растворах цианистых соединений меди, цинка и некоторых других металлов.

Теллур в рудах может выступать при цианировании в качестве и «внутреннего» (калаверит, гессит), и «внешнего» (самородный теллур, тетрадимит и др. теллуриды) химического депрессора золота, что часто бывает причиной повышенного расхода цианида и вызывает осложнение в цикле последующего выделения золота из растворов. Так как теллур представляет определенный интерес в качестве попутного ценного компонента, это определяет подход к проблеме металлургической переработки теллурсодержащих руд золота, в том числе с применением гидрометаллургических процессов.

Кроме графита (и некоторых других углесодержащих минералов) в качестве сорбентов золота и серебра в цианистом процессе могут выступать и другие компоненты руды. К их числу могут быть отнесены: глинистые минералы, например, пирофиллит.

Некоторые силикаты, алюмосиликаты, тонкоизмельченный кварц и другие рудные компоненты также играют роль естественных сорбентов золота и серебра из цианистых растворов. Наиболее сложно извлечь дисперсное золото из сульфидных и сульфосолевых минералов, особенно при тонковкрапленной структуре руд и наличии в рудах глинистого «цемента», теллуридов и органического субстрата.

В первую очередь, это связано с относительно прочными химическими связями золота с соответствующими элементами, низкой проницаемостью минеральной матрицы для растворов, а во-вторых, вследствие того, что кислородсодержащие компоненты раствора и цианиды реагируют в данном случае не только с железом, но и с серой, образуя роданиды. Но и в этом случае, используя для окисления сульфидной матрицы активный кислород и (или) хлорсодержащие окислители, можно обеспечить достаточно высокие (свыше 90 %) показатели извлечения золота при последующем цианировании и даже безцианидное комплексообразование и, следовательно, перевод золота в жидкую фазу.

Творческая группа ученых Читинского филиала ИГД СО РАН провела анализ форм нахождения дисперсного золота в минеральных и органических веществах и сделала вывод о том, что оно встречается в трех принципиально различных по характеру связей минералообразующими элементами: простые, комбинированные и комплексные соединения. На основании этого разработана технология кюветно-кучного выщелачивания со сменными активационными блоками с использованием различных полиреагентных комплексов в зависимости от типа золотосодержащей руды.

Гидрометаллургическая группа методов условно может быть разделена

на две подгруппы: активационную (физическую), с использованием дополнительных физических воздействий на твердую, жидкую и реагентную фазы пульпы на основе цианидов и химическую.

Ко второй – предварительное (перед цианированием) биовыщелачивание железа и серы в сернокислотной среде с использованием специальных штаммов железобактерий для перевода сульфидной матрицы в сульфатную форму. И в том и в другом случае обеспечивается окисление промежуточного продукта реакций – элементарной серы, сдерживающей в обычных условиях развитие процессов окисления в глубинных слоях минеральной матрицы. С точки зрения ученых творческой группы дальнейшие перспективы биоокисления сульфидных руд будут определяться использованием их в сочетании с физическими и физико-химическими методами активации.

В частности, лабораторные эксперименты с опережающим (до бактериального) физикохимическим окислением электролитическим и фотолитическим кислородом, контрольным (последующим) окислением, позволили существенно (более чем на 20%) увеличить последующее извлечение золота при сорбционном цианировании.

Растворенный (молекулярный) хлор в сочетании с соляной кислотой, соляная кислота в сочетании с перекисью, гипохлорит натрия в сочетании с хлоридом натрия являются достаточно эффективными реагентами для выщелачивания золота.

Ограниченное использование на практике галогенов объясняется относительно низкой устойчивостью их комплексов с золотом (хлор), необходимостью использования коррозионно-стойкого оборудования или дороговизной (бром, йод).

Вместе с тем, учитывая доступность исходного сырья для получения хлоридных комплексов (галит или поваренная соль), его существенно меньшую токсичность (в некоторых формах использования), значительно более высокую скорость реакции с золотом, попытки поиска их эффективных вариантов продолжались практически все те годы, когда цианирование стало доминирующим методом выщелачивания золота.

В отношении применимости к извлечению дисперсного золота хлор имеет также и такие преимущества как инициирование гидратационных процессов, высокая проникающая способность в микропоры минеральной матрицы, способность к окислению тех ее компонентов, которые определяют упорность руд, в частности, органики.

Разработано и запатентовано множество технологических и реагентных схем с использованием активного хлора, в основном, в форме гипохлорита натрия ( $\text{NaClO}$ ) или гипохлорита натрия в сочетании с хлоридом натрия ( $\text{NaCl}$ ), в основном, в США и бывшем СССР. Причем одна из таких схем, разработанная в Невадском горном бюро (Рино) еще в конце 60-х гг. прошлого века нашла эффективное промышленное применение при переработке Карлинских руд с дисперсным золотом, содержа-

щих органическое вещество. Эта схема, основанная на электрохимическом синтезе гипохлорита натрия и хлора непосредственно в пульпе, использована как подготовительная перед основным цианированием с промежуточной нейтрализацией остаточного активного хлора сульфитом натрия.

Основное преимущество такой схемы, как и многих аналогичных (в частности, разработанной во ВНИИХТ примерно в это же время под руководством академика АН СССР Б.Н. Ласкорина), является получение гипохлорита натрия посредством электролиза соляного раствора или даже жидкой фазы рудной пульпы. Более сложная схема, но требующая значительно меньшего расхода хлора, предложена W.J. Guay. Сущность этой схемы, названной двойным окислением, заключается в предварительной обработке золотосодержащей руды с пиритом и углистым веществом горячим раствором технической соды (карбоната натрия) при продувке воздухом с последующим хлоридным окислением.

Таким образом, использование технологии кюветно-кучного выщелачивания, в том числе в сочетании с процессами, реализуемыми в природных системах (бактериальное окисление), позволит повысить эффективность и интенсивность извлечения дисперсного золота из упорных руд.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Секисов А.Г., Зыков Н.В., Королев В.С. Дисперсное золото. Геологический и технологический аспекты. – М-Чита: ЧитГУ, 2007. – с. 270.

2. Лодейщиков В.В. Технология извлечения золота и серебра из упорных

руд. Том 1. – Иркутск: Иргиредмет, 1999. – 120 с.

3. Yannopoulos J.C. The extractive metallurgy of gold. – New York: Van Nostrand Reinhold, 1991, 280. **ГЛАВ**

#### Коротко об авторе

Шумилова Л.В. – кандидат технических наук, докторант ЧитГУ, зам. директора ЗабГК, zabgc@megalink.ru