

ископаемых, благодаря чему достигается замкнутый водооборот, повышается на 3–7 % извлечение ценных металлов и алмазов и снижается расход реагентов.

Разработана теория разделения минералов в структурированных дисперсных системах и предложены новые способы интенсификации гравитационных и флотационных методов обогащения, основанные на использовании вибрационных воздействий. На базе этих исследований создана не имеющая аналога в мире пневматическая пульсационная система, обеспечивающая тонкое диспергирование воздуха при вертикальных колебаниях пульпы в камере флотационной машины.

Предложены методы интенсификации процессов сгущения и флотации техногенного сырья с применением недефицитного и нетоксичного полимера – активной кремнекислоты, а также синтетических флокулянтов и гидрофобных полимеров. Создан алго-

ритм синтеза технологических вариантов переработки техногенно-минеральных ресурсов.

### Заключение

В целом можно констатировать, что к XXI веку сформировался особый стиль деятельности ИПКОН РАН – уникальность тематики решаемых проблем и методов исследований, сочетание научно-методологических подходов с широким выходом на практику, комплексность в изучении технологических, экологических, экономических и других проблем освоения недр Земли.

С результатами исследований в различных областях современных горных наук, выполненных в последнее десятилетие учеными ИПКОН им. академика Н. В. Мельникова РАН, рекомендуем ознакомиться в материалах, изложенных ниже в научных статьях настоящего номера «Горного журнала». [ГЖ](#)

УДК 622.7

## НАУЧНОЕ ОБОСНОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА ИННОВАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ КОМПЛЕКСНОЙ ПЕРЕРАБОТКИ МИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ



*В. А. ЧАНТУРИЯ,  
главный научный сотрудник, академик РАН,  
vohan@mail.ru,  
Институт проблем комплексного освоения  
недр им. академика Н. В. Мельникова РАН,  
Москва, Россия*

### Введение

Основной тенденцией развития современного горно-металлургического комплекса России является необходимость все более широкого вовлечения в переработку труднообогатимых руд, характеризующихся низким содержанием ценных компонентов, тонкой вкрапленностью минеральных комплексов и близкими технологическими свойствами слагающих их минералов.

В этих условиях повышение полноты и комплексности обогащения минерального сырья, создание высокоэффективных, экологически безопасных технологий приобретает первостепенное значение. Оно должно основываться на интенсификации действующих и создании новых способов извлечения компонентов из труднообогатимых руд и техногенных скоплений на базе новейших достижений фундаментальных наук, комбинировании обогатительных и химико-металлургических процессов с применением современных пиро- и гидрометаллургических технологий.

*В статье изложены новые методы и методики оценки вещественного, фазового состава, структурных свойств и дефектности тонкодисперсных минеральных частиц микро- и наноразмера применительно к новым видам труднообогатимого и нетрадиционного сырья, позволяющие дать научно обоснованный и достоверный прогноз обогащения и глубокой переработки руд сложного вещественного состава.*

**Ключевые слова:** обогащение полезных ископаемых, технологическая минералогия, дезинтеграция, флотация, выщелачивание, водоподготовка, охрана окружающей среды.

**DOI:** 10.17580/gzh.2017.11.01

Вследствие вышеизложенного эффективная переработка тонковкрапленных руд со сложным минеральным составом невозможна без проведения их исследования с привлечением современного аналитического оборудования. При этом наряду с применением уже прочно вошедших в практику обогащения поликомпонентных руд методов минералогического анализа большое значение придается разработке новых методик изучения свойств поверхности геоматериалов, имеющих существенное значение при флотационном разделении минералов. Анализ возможностей современных микроскопических и спектроскопических методов исследования показывает, что в большинстве случаев при их традиционном использовании возникают серьезные проблемы, свя-

занные с разделением информации, поступающей от поверхности минерального образца и его объема. Поэтому на сегодняшний день нет единого универсального способа решения всего многообразия задач, связанных с описанием процессов, протекающих на минеральных поверхностях, и для их полного понимания следует использовать набор взаимодополняющих методов. При решении проблемы переработки труднообогатимых руд следует использовать опыт, накопленный в зарубежной практике обогащения минерального сырья [1–6]. Ниже изложены результаты изучения данной проблемы в ИПКОН РАН.

### Исследования по комплексной переработке минерального сырья

В ИПКОН РАН предложен и с успехом развивается комплексный подход к исследованию сложных минеральных объектов методами микроскопии высокого разрешения: оптической микроскопии в проходящем и отраженном свете (Olympus +DP-12), ее разновидности – сканирующей конфокальной лазерной микроскопии (Keence VK-9700), аналитической растровой электронной микроскопии (LEO 1420VP + INCA Energy и Jeol 6610LV) и сканирующей зондовой микроскопии (Integra Prima). По своим возможностям (увеличениям соответственно полям зрения локальности и достигаемым разрешениям) комплекс перекрывает практически все уровни исследования материалов (от микро- до наноуровня) и способен решать большинство из поставленных задач [7].

Каждый из перечисленных методов имеет определенный набор преимуществ и ограничений с позиции изучения полиминеральных образцов, а также низкоразмерных тонкопленочных объектов на их поверхности. Поэтому особого внимания заслуживали проблема адаптации классических методик изучения, а также выбор оптимальных параметров наблюдений и способов подготовки образцов. Для реализации комплексного подхода, включающего наблюдения на приборах с различной разрешающей способностью, использовались хорошо зарекомендовавшие себя в технологической минералогии аналитические шлифы руд и минералов. Подготовленный таким образом материал удовлетворяет одновременно требованиям, предъявляемым к образцам в оптической, электронной и атомно-силовой микроскопии, и позволяет проводить исследования без дополнительной промежуточной об-

работки. Последнее является особенно важным при изучении изменений поверхности минералов в результате модифицирующих воздействий, а также при анализе особенностей закрепления флотационных реагентов.

Отдельные детали минеральных сростаний в полиминеральных рудах изучались также на прозрачно-полированных шлифах, используемых в микроскопии проходящего света, а также для отраженно-проходящего света.

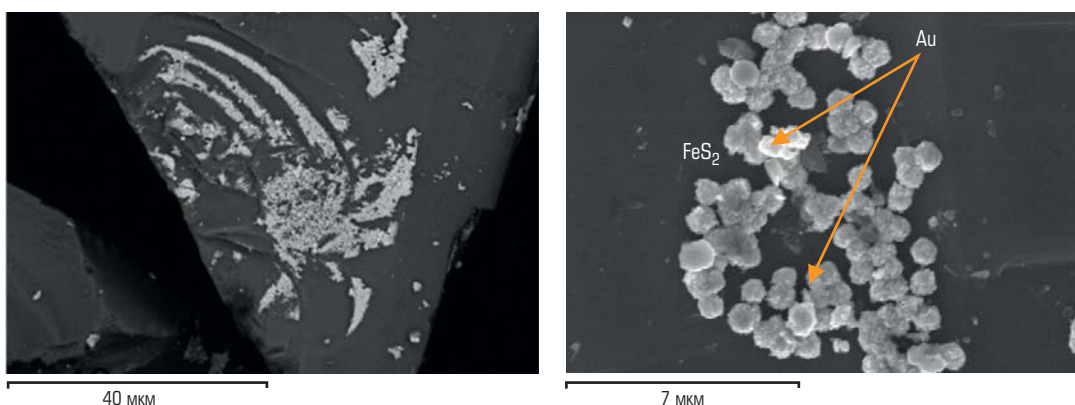
При работе с образцами неправильной формы, например при контроле качества нанесения наночастиц благородных металлов на поверхность сульфидных минералов, пробоподготовка сводилась к фиксации максимально тонкого слоя готовых сухих минеральных порошков на углеродной электропроводящей подложке с помощью электростатически заряженной органической пленки.

Данные методы и методики позволили исследовать состав, структуру и свойства геоматериалов на микро- и наноуровне [8] в том числе:

- выявить микро- и наноразмерные частицы благородных металлов, поверхностные природные и искусственные нанозагрязнения на минералах;
- экспериментально обосновать структурные, фазовые и химические преобразования минералов при различных энергетических воздействиях [9];
- обосновать выбор и механизм взаимодействия реагентов с благородными металлами при флотации комплексных руд сложного вещественного состава;
- исследовать структурные, фазовые и химические преобразования сульфидов и горных пород в процессах выщелачивания.

Кроме того, вследствие низкой концентрации и тонкой вкрапленности благородных металлов в сульфидах были разработаны методы их искусственного нанесения на минералы, позволяющие получать образцы с микро- и наночастицами золота и платины, имитирующие природные объекты. Получены образцы пирита, пирротина, арсенопирита и кварца, искусственно обогащенные микро- и наноразмерными частицами (НРЧ) благородных металлов (БМ) (рис. 1–3). В табл. 1 приведены различные варианты обогащения сульфидов микро- и наночастицами благородных металлов и области их применения [8].

В настоящее время до 35–40 % потерь ценных компонентов в процессах первичной переработки связано со сrostками и



**Рис. 1. Пирит с выделениями золота из раствора золотохлористоводородной кислоты в присутствии восстановителя**

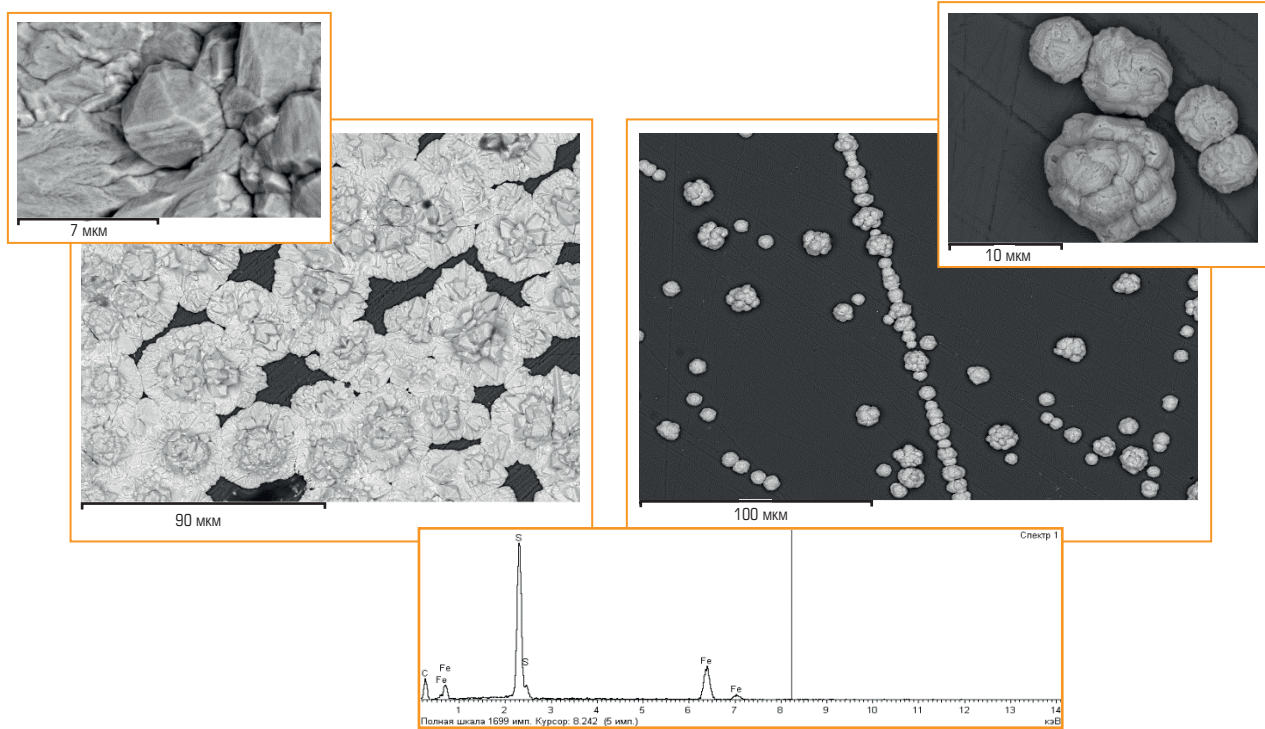


Рис. 2. Формы выделения золота на пирите в ходе восстановительной адсорбции

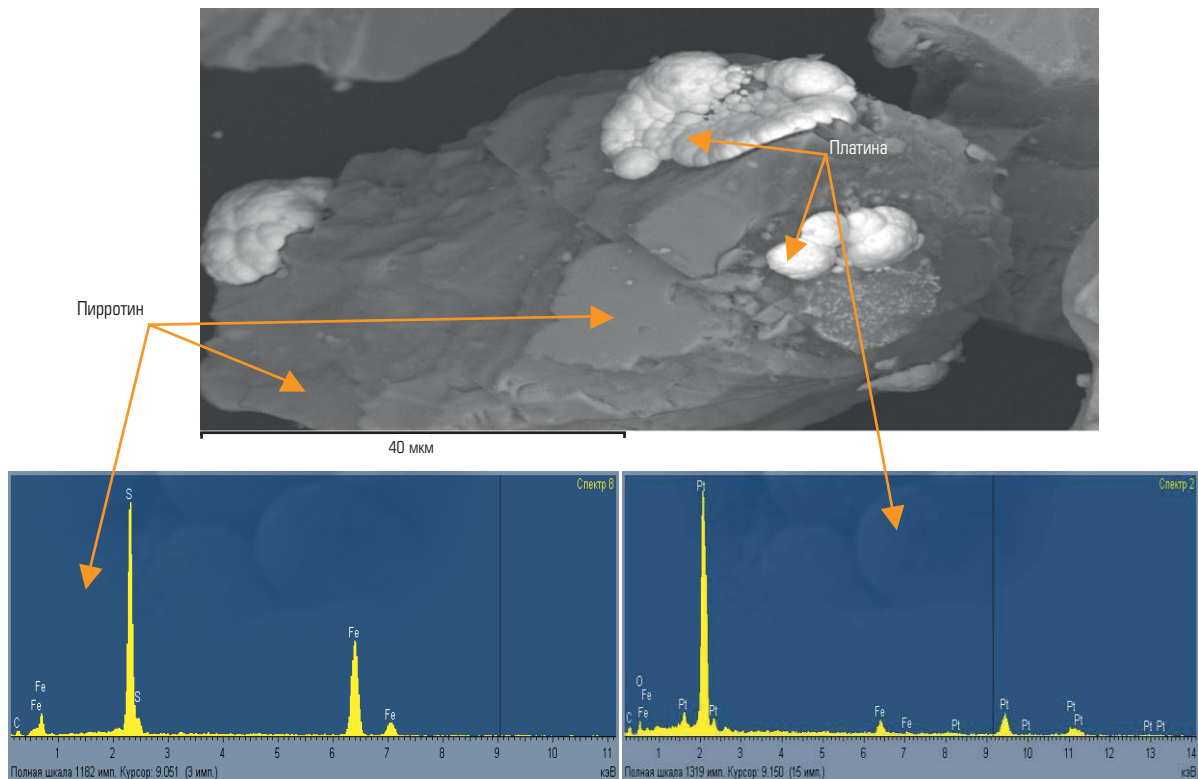


Рис. 3. Изображение поверхности пирротина после обработки его платинохлористоводородной кислотой. Рентгеновские спектры отдельных участков пирротина

**Таблица 1. Методы обогащения природных сульфидов микро- и наночастицами благородных металлов и области их применения при изучении механизма взаимодействия реагентов с минералами, содержащими золото и платину**

Метод нанесения, размер новообразований Au или Pt	Минерал-носитель	Область применения при исследовании свойств флотореагентов	Методы исследований, приборы
Восстановительная адсорбция Au из раствора $\text{Na}[\text{AuCl}_4]$ , $>0,5$ мкм Восстановительная адсорбция Pt из раствора $\text{Na}_2[\text{PtCl}_6]$ или $\text{K}_2[\text{PtCl}_6]$ , $>0,5$ мкм	Пирит, арсенопирит, халькопирит Пирротин, галенит, халькопирит (0,15–0,063 мм)	Исследование селективности адсорбции реагентов на новообразованиях $\text{Au}^0$ или $\text{Pt}^0$ Оценка толщины слоя реагента на частицах AuO и PtO Идентификация комплексного соединения реагента с металлом, образовавшегося на поверхности минеральных частиц и полученного в водном растворе	(РЭМ) LEO 1420VP (INCA350); JED(JSM-6610LV) Лазерная микроскопия (KEYNCE с VK-9700) Тонкослойная хроматография (ТСХ) Визуальная оценка количества частиц Au или Pt в продуктах флотации (РЭМ)
Адсорбция наноразмерных частиц (НРЧ) Au на носитель из золя, полученного цитратным или сульфидным способом (40–100 нм) Адсорбция наноразмерных частиц (НРЧ) Pt на носитель из золя, полученного с использованием таннина или сульфида натрия. (40–100 нм)	Пирит, кварц, арсенопирит флотационной крупности Пирротин флотационной крупности	Исследование адсорбции реагента на Au- или Pt-содержащих минералах фотометрическим методом (по остаточной концентрации реагента в растворе) Изучение влияния реагентов на флотацию минералов с искусственно нанесенными НРЧ Au или Pt Изучение влияния реагентов на флотацию Au и Pt из природной руды, в которую добавлен минерал, искусственно обогащенный НРЧ Au или Pt Изучение растворимости и устойчивости соединений Au или Pt с реагентами	Спектрофотометр UV-1700 Shimadzu Флотомашина $V = 15\text{--}50$ мл (по выходу продукта) Флотомашина $V = 50\text{--}1000$ мл Атомно-адсорбционный анализ продуктов флотации (РЭМ) LEO 1420VP (INCA350); Спектрофотометр UV-1700 Shimadzu
Синтез твердых трудно растворимых сульфидов золота $\text{Au}_2\text{S}$ или платины $\text{PtS}_2$	Крупность 3–0,1 мкм	Изучение флотационных свойств реагентов при флотации руды с низким содержанием Au или Pt после добавления микро- или наночастиц $\text{AuS}$ и $\text{PtS}_2$	Флотомашина $V = 15\text{--}50$ мл или $V = 50\text{--}1000$ мл Атомно-адсорбционный анализ продуктов флотации
Нанесение Au на электрод методом восстановительной адсорбции Напыление тонких слоев золота на установке Emitech K550X Sputter Coater	Электрод из пирита	Изучение влияния собирателей на электрохимические свойства золота	Измерение электродных потенциалов пирита и золота

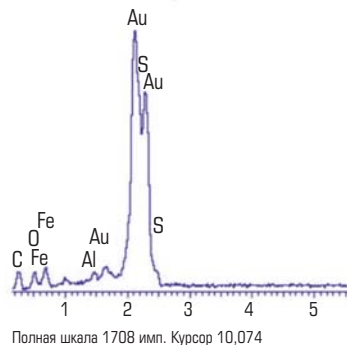
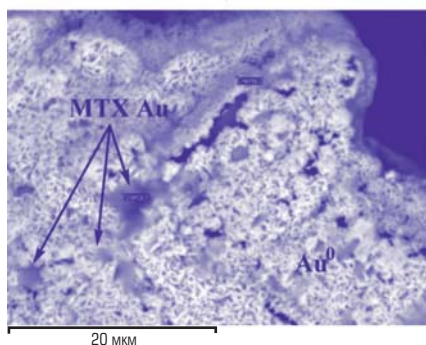
30–35 % – с тонкими частицами (менее 10 мкм). Для того, чтобы снизить эти потери при переработке тонковкрапленных руд без образования сростков и одновременно без излишнего переизмельчения, традиционные процессы дробления и измельчения в щековых, конусных дробилках и шаровых мельницах должны быть заменены процессом селективной дезинтеграции, реализуемым в мельницах динамического самоизмельчения, конусных инерционных дробилках, ролинг-прессах, газоструйных и пружинных мельницах для сверхтонкого измельчения [10].

Для раскрытия тонковкрапленных минеральных комплексов (–20 мкм) весьма перспективными являются немеханические способы разрушения, обеспечивающие дезинтеграцию по межфазовым границам за счет образования дефектов и микротрещин при электрохимической обработке пульпы или каналов пробоя при воздействии энергии ускоренных электронов или мощных наносекундных импульсов [11].

В процессе поляризации сульфидных руд при их мокром измельчении на границе контакта минералов протекают электрохимические реакции с образованием новых продуктов – элементарной серы, гидроокислов металла и ряда других продуктов, что приводит к разупрочнению частиц по границам срастания мине-

ралов и, как следствие, к повышению эффективности процесса раскрытия минералов.

Из вышеперечисленных методов дезинтеграции минерального сырья существенные преимущества имеет метод воздействия на золотосодержащие и полиметаллические руды мощными наносекундными электромагнитными импульсами (МЭМИ). Этот метод позволяет наиболее рационально использовать электроэнергию (селективное разрушение происходит без нагрева руды) и достигать наибольшей полноты интергранулярного разрушения минеральных компонентов и, как следствие, максимального извлечения металлов при наименьших затратах электроэнергии. Кроме создания каналов пробоя и микротрещин по границам срастания минералов мощные наносекундные воздействия в процессе обработки сульфидов в зависимости от дозы облучения за счет протекания химических твердофазных реакций образуют на их поверхности наноразмерные соединения в виде гидрофобной элементной серы и различных гидрофильных кислородсодержащих соединений. Данный факт позволяет выбирать такой режим обработки, который позволяет не только достичь эффективного разделения минеральных комплексов, но и создать оптимальные условия для повышения контрастности их свойств и последующей сепарации в



**Рис. 4. Адсорбция реагента МТХ на поверхности пирита с нанесенным Au**

процессе флотации за счет образования на их поверхности нанообразований гидрофобного и гидрофильного состава [9].

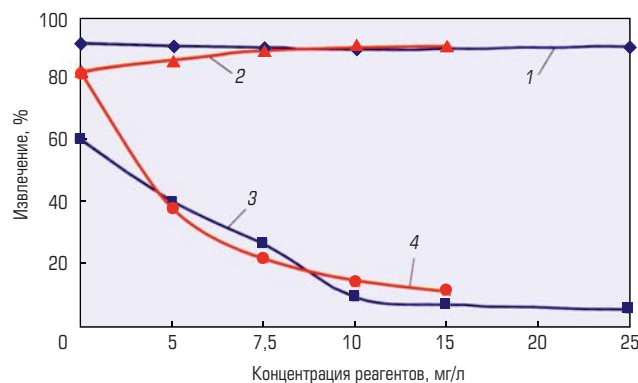
Проблема разделения минералов с близкими технологическими свойствами традиционно решается повышением селективности обогатительных процессов. Эти работы ведутся по нескольким направлениям: синтез флотационных реагентов направленного действия и использование энергетических методов обработки минералов пульп и промышленных вод.

В связи с тем, что основные потери от 25 до 30 % ценных компонентов (золота и минералов платиновой группы) связаны с частицами минералов микро- и наноразмеров, концентрация которых в рудах не превышает 1,5–3,0 г/т, для изучения механизма взаимодействия реагентов с благородными металлами и создания нового класса флотационных реагентов в ИПКОН РАН [1, 2, 12, 13] были разработаны методы и методики получения объектов данной размерности. Реализация новых реагентов позволила повысить как сорбцию реагента (рис. 4), так и извлечение и качество концентратов при переработке бедных, труднообогатимых руд благородных металлов сложного вещественного состава (рис. 5, табл. 2).

Также впервые было установлено, что только при определенном соотношении содержания меди, мышьяка и золота в пирите и арсенопирите возможна их селекция при флотации, что позволило разработать критерии разделения сульфидов (табл. 3).

В последние годы для направленного изменения поверхностных свойств минералов широкие исследования проводятся по использованию таких энергетических воздействий, как радиационные, ультразвуковые, электрохимические, механохимические, плазменные.

В настоящее время существуют большие перспективы для практического внедрения новой технологии использования энергии мощных энергетических воздействий при обогащении различных видов минерального сырья. Разработаны теоретические основы направленного модифицирования структурного состояния, химического и фазового состава поверхности сульфидных минералов (пирита, арсенопирита, пирротина, пентландита, халькопирита и сфалерита) и структурно-зависимых (электрохимических, электрофизических, физико-химических и технологических) свойств сульфидов при воздействии мощных наносекундных электромагнитных импульсов. Вскрыты основные механизмы формирования поверхностных микро- и наночастиц, обеспечивающих повышение извлечения и качества концентратов в процессах обогащения труднообогатимых руд сложного вещественного состава [9, 14], что наглядно иллюстрируется результатами флотации медно-мышьякового продукта после его электроимпульсной обработки, позволившей снизить содержание мышьяка в медном концентрате в 2,7 раза (табл. 4).



**Рис. 5. Результаты флотации пирита (1, 2) и арсенопирита (3, 4) с использованием ДМДК (1, 3) при pH = 10 и ПРОКС (2, 4) при pH = 5,5**

**Таблица 2. Никель-пирротинная флотация в присутствии термоморфных полимеров**

Собиратели	Выход, %	Содержание				Извлечение, %			
		Cu, %	Ni, %	Pt, г/т	Pd, г/т	Cu	Ni	Pt	Pd
ДП-4*	56	1,96	5,05	1,89	19,43	87	85	58	80
ДП-4 + ТМФ**	61	1,93	5,20	2,34	19,10	93	90	75	82
ДП-4 + ТМПА**	61	1,93	5,20	2,08	18,68	92	90	71	84
ДП-4 + ТМПБ**	59	1,90	5,00	2,30	19,98	91	89	72	84

\* Расход ДП-4 30 г/т.

\*\* Расход ДП-4 10 г/т, полимера 20 г/т (ТМФ – полимер, модифицированный диизобутилдитиофосфинатом натрия).

**Таблица 3. Критерий разделения пирита и арсенопирита при флотации ксантогенатом**

Минерал	Требуемое содержание элементов-примесей		
	Си, %	As, %	Au, г/т
Пирит	>0,1	<2	>10
Арсенопирит	<0,2	–	≤100

**Таблица 4. Влияние МЭМИ на показатели флотации (флотационный промпродукт ЗИФ-2 месторождения «Олимпиадинское»)**

Энергия высокоимпульсного воздействия, кДж	Продукт	Выход		
		γ, %	β, %	ε, %
1	Концентрат	13,9	1,0	5,55
	Хвосты	86,1	2,75	94,45
	Итого	100	2,5	100
0,1	Концентрат	10,0	1,65	6,46
	Хвосты	90,0	2,65	93,54
	Итого	100	2,55	100
0	Концентрат	28,4	1,35	15,1
	Хвосты	71,6	3,0	84,87
	Итого	100	2,53	100

Проблема охраны окружающей среды может быть решена за счет перехода на систему замкнутого водооборота. Переход от саморегулирующейся среды системы оборотного водоснабжения на систему с кондиционированием позволяет отказаться от сброса сточных вод и вместе с тем обеспечить стабильность технологического процесса за счет создания или поддержания оптимального ионного состава.

В настоящее время очистка и кондиционирование оборотных вод обогатительных фабрик осуществляется с помощью химических реагентов, сорбционных, электродиализных и комбинированных методов с использованием на первичной стадии очистки природных сорбентов (высокопористые угли, цеолиты). Однако данные технологии дороги и в основном позволяют осуществлять только очистку промышленных вод от токсичных веществ и не обеспечивают регулирования их ионного состава с целью придания жидкой фазе пульпы оптимальных физико-химических свойств для эффективного проведения того или иного технологического процесса разделения минералов.

В ИПКОН РАН были разработаны научные основы, промышленные технологии и аппараты электрохимического метода водоподготовки, позволяющие без использования химических реагентов за счет протекания реакций разложения воды на катоде и аноде изменять цветность, окислительно-восстановительные свойства, ионный и газовый состав воды, тем самым создавая условия для направленного регулирования ионного состава жидкой фазы пульпы и повышения контрастности свойств минералов. Результаты промышленных испытаний данной технологии водо-

подготовки на полиметаллических, шеелитовых, апатитовых, фосфоритовых, бокситовых и редкометалльных рудах подтвердили ее высокую эффективность, возможность снижения расхода реагентов-собирателей и регуляторов среды на 50 %, повышения извлечения ценных компонентов на 5–10 % в условиях замкнутого водооборота. Расход электроэнергии составил 0,5–2 кВт·ч/м<sup>3</sup> воды [15, 16].

Использование кислого продукта электролиза воды (анолита) с высокими окислительно-восстановительными свойствами ( $E_h > 800$  мВ) и  $pH = 5-3$  позволяет при его использовании в процессах кондиционирования черновых концентратов эффективно осуществлять процесс очистки поверхности минералов от гидрофильных карбонатно-силикатных и железосодержащих гидрофильных пленок, тем самым создавая условия для повышения качества концентратов и извлечения в них ценных компонентов [15–17]. Так, предварительная обработка алмазов продуктами электролиза воды (анолит) позволяет эффективно очищать поверхность алмазов (на 80–90 %) от карбонатно-силикатных соединений, повышать гидрофобность трудноизвлекаемых кристаллов и их качество.

Создание и производство промышленных электрохимических кондиционеров воды (ЭКВ-50) и реализация электрохимической технологии водоподготовки в процессах пенной и липкостной сепарации обогащения алмазосодержащих кимберлитов на АК «АПРОСА» позволяют повысить извлечение алмазов [16].

Дополнительным резервом получения металлов могут служить минерализованные кислые технологические воды, которые могут также использоваться в качестве активного рабочего агента в процессах кучного выщелачивания бедных руд сложного вещественного состава после электрохимических методов их активации. Извлечение содержащихся в минерализованных водах металлов и других элементов при переработке продуктивных растворов выщелачивания методами гидрометаллургии позволяет получить дополнительную товарную продукцию и способствует очистке промышленных стоков перед сбросом их в окружающую среду.

Наиболее эффективная и адаптированная к многокомпонентным подотвальным водам горных предприятий Урала химико-электрохимическая технология впервые позволила получить селективные товарные продукты меди, цинка, марганца и очищенную воду до уровня ПДК.

Комбинированная химико-электрохимическая отработка кислых подотвальных вод УГМК позволяет за счет образования гипохлорита и концентрации в них ионов марганца и трехвалентного железа интенсифицировать процесс окисления и выщелачивания некондиционных медно-цинковых руд с получением рабочих растворов, пригодных для последующего получения товарных продуктов [18].

Электрохимическая обработка техногенных вод хвостохранилищ Мирнинского ГОКа АК «АПРОСА», содержащих до 2 г/л хлора, позволяет получить гипохлорит, который может быть использован вместо токсичного хлора для обеззараживания городских бытовых вод. Данная технология решила сразу две проблемы:

заменить токсичный хлор и увеличить срок службы хвостохранилища [16].

Электрохимический метод сепарации шламодержащих вод ОАО «Севералмаз» позволил впервые эффективно интенсифицировать процесс осаждения тонкодисперсных глинистых частиц сапонита, нарушающих процесс рентгенолюминесцентной сепарации вследствие налипания шламов на алмазах. Данный процесс позволяет получать два продукта: осветленную воду, пригодную для оптимального ведения технологического процесса извлечения алмазов, и сапонитсодержащий продукт (извлечение 82 %), который по своим характеристикам может быть использован в качестве строительного материала и в медицинских целях [19].

## Заключение

Таким образом, в ИПКОН РАН были научно обоснованы и разработаны инновационные, энергосберегающие технологии комплексной и глубокой переработки руд и техногенного сырья сложного вещественного состава с получением готовой продукции, соответствующие мировому уровню, а для ряда технологий и превосходящих его, что неоднократно отмечалось на последних международных конгрессах по обогащению полезных ископаемых.

## Библиографический список

См. англ. блок. 

«GORNYI ZHURNAL», 2017, № 11, pp. 7–13  
DOI: 10.17580/gzh.2017.11.01

### Scientific substantiation and development of innovative approaches to integrated mineral processing

#### Information about author

V. A. Chanturia<sup>1</sup>, Chief Researcher, Academician of the Russian Academy of Sciences, vohan@mail.ru

<sup>1</sup> Institute of Integrated Mineral Development – IPKON, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

#### Abstract

The feature of the mining and metallurgy development in Russia is the increase in volume of rebellious natural raw materials and mining waste, with low content of valuable components and finely disseminated aggregates composed of minerals with similar process properties, that are to be treated. Under such conditions, the highly efficient and ecology-friendly processing technologies become of the top priority. Such technologies should be created based on the intensification of the current and new approaches to mineral extraction from rebellious ore and mining waste using the latest achievements of basic sciences and by combining dressing, chemical and metallurgical processes involving modern pyro- and hydrometallurgical technologies.

IPKON Institute of the Russian Academy of Sciences has developed, experimentally validated and full-scale tested the innovative energy-saving technologies for the integrated processing and deep conversion of ore and waste materials having complex material constitution; these technologies come up to the international level and sometimes exceed it, which has been many times highlighted at the international mineral processing congresses.

**Keywords:** mineral processing, technical mineralogy, disintegration, flotation, leaching, water conditioning, environment protection.

#### References

- Hao Ren, Mengqi Ren, Jing Ning, Zhen Li. Research on the Interaction between Sphalerite and Silica Particles with Different Calcium Ion Solutions. *Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering*. 2013. Vol. 1, No. 4. pp. 192–199.
- McFadzeann B., Mhlanga S. S., O'Connor C. T. The effect of thiol collector mixtures on the flotation of pyrite and galena. *Minerals Engineering*. 2013. Vol. 50–51. pp. 121–129.
- Karimian A., Rezaei B., Masoumi A. The effect of mixed collectors in the rougher flotation of sungun copper. *Life Science Journal*. 2013. No. 10. pp. 268–272.
- Nakhaei F., Irannajad M. Investigation of effective parameters for molybdenite recovery from porphyry copper ores in industrial flotation circuit. *Physicochemical Problems of Mineral Processing*. 2014. Vol. 50, No. 2. pp. 477–491.
- Quast K., Connor J. N., Skinner W., Robinson D. J., Addai-Mensah J. Preconcentration strategies in the processing of nickel laterite ores. Part 1: Literature review. *Minerals Engineering*. 2015. Vol. 79. pp. 261–268.

- Aiglsperger T., Proenza J. A., Lewis J. F., Labrador M., Svojtka M. et al. Critical metals (REE, Sc, PGE) in Ni laterites from Cuba and the Dominican Republic. *Ore Geology Reviews*. 2016. Vol. 73, Part 1. pp. 127–147.
- Chanturiya B. A., Brylyakov Yu. E., Koporulina E. B., Ryazantseva M. V., Bunin I. Zh. et al. Up-to-date approaches to studying adsorption of fatty-acid collecting agents at apatite and shtaffelite ore minerals. *Fiziko-tehnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh*. 2014. No. 4. pp. 136–149.
- Chanturia V. A., Ivanova T. A., Getman V. V., Koporulina E. V. Methods of minerals modification by the micro- and nanoparticles of gold and platinum for the evaluation of the collectors selectivity at the flotation processing of noble metals from the fine ingraind ores. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*. 2015. Vol. 36, No. 5. pp. 288–304.
- Chanturiya V. A., Bunin I. Zh. Non-traditional high-energetic methods of desintegration and opening of fine-disperse mineral complexes. *Fiziko-tehnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh*. 2007. No. 3. pp. 107–128.
- Vaysberg L. A., Kruppa P. I., Baranov V. F. Basic trends of development of the processes of ore disintegration in the XXI century. *Obogashchenie Rud*. 2002. No. 3. pp. 3–10.
- Bunin I. Zh., Ivanova T. A., Lunin V. D. Influence of high-energy depositions on the process of dissolution of gold-bearing minerals. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten*. 2002. No. 8. pp. 172–176.
- Nedosekina T. V., Getman V. V., Gapchich A. O. Prospects of usage of modified diisobutyl-dithiophosphinate in the time of flotation of arsenic gold-containing ores. *Gornyi Zhurnal*. 2013. No. 10. pp. 88–91.
- Matveeva T. N., Gromova N. K., Lantsova N. B. et al. Scientific rationales of use of vegetal modifiers for mineral flotation of noble metals made of refractory ores. *X Congress of dressers of the CIS countries: collection of materials*. Vol. 1. Moscow: MISIS, 2015. pp. 132–134.
- Donato de Ph., Mustin C., Benoit R., Erre R. Spatial distribution of iron and sulphur species on the surface of pyrite. *Applied Surface Science*. 1993. No. 68. pp. 81–93.
- Chanturiya E. L. Theoretical aspects of electrochemical method of water preparation in the conditions of flotation of rare-metal raw materials. *Complex processing of mineral raw materials: collection of scientific proceedings*. Moscow: Nauka, 1992. pp. 165–174.
- Dvoychenkova G. P. Mineral formations on natural diamond surface and their destruction using electrochemically modified mineralized water. *Fiziko-tehnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh*. 2014. No. 4. pp. 159–171.
- Crundwell F. K. The influence of the electronic structure of solids on the anodic dissolution and leaching of semiconducting sulphide minerals. *Hydrometallurgy*. 1988. Vol. 21, Iss. 2. pp. 155–190.
- Samusev A. L., Minenko V. G. Productivity of chemical-electrochemical gold leaching from rebellious ore. *Fiziko-tehnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh*. 2014. No. 1. pp. 171–175.
- Minenko V. G. Justification and design of electrochemical recovery of saponite from recycled water. *Fiziko-tehnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh*. 2014. No. 3. pp. 180–186.