

УДК 622.765

**Прохоров Константин Валерьевич**

кандидат технических наук,  
старший научный сотрудник,  
Хабаровский федеральный  
исследовательский центр ДВО РАН,  
680000, г. Хабаровск, ул. Тургенева, 51,  
e-mail: [kostyan1986\\_ne@mail.ru](mailto:kostyan1986_ne@mail.ru)

**Копылова Александра Евгеньевна**

старший инженер,  
Хабаровский федеральный  
исследовательский центр ДВО РАН

**ПЕРСПЕКТИВНЫЕ СПОСОБЫ  
ИНТЕНСИФИКАЦИИ ПРОЦЕССА  
ФЛОТАЦИИ МЕДНО-ПОРФИРОВЫХ  
И ЗОЛОТО-СЕРЕБРЯНЫХ РУД ПУТЕМ  
ПРИМЕНЕНИЯ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ  
ОБРАБОТКИ\****Аннотация:*

Рассмотрена проблема обогащения упорных руд сложного вещественного состава, содержащих благородные металлы, находящиеся в тонкодисперсном состоянии. Отмечена актуальность использования методов интенсификации флотационного обогащения с использованием электрохимической подготовки раствора для приготовления пульпы флотации. Проведены экспериментальные исследования на двух различных типах руд для сравнения эффективности повышения извлечения ценных компонентов в концентраты. При переработке медно-порфировых руд использование католита и смеси католита и анолита существенно (на 13,5 – 19 %) повышает перевод золота в пенный продукт. Электрофлотацией золото кварцевых руд с использованием раствора католита удалось повысить извлечение золота более чем на 6 %, что может иметь большое практическое значение при переработке техногенного сырья. Потери золота в хвосты возможны вследствие окисления содержащегося в руде пирита, содержащего золото, частично окисляющегося в присутствии анолита, и частицы приобретают гидрофильные свойства. Извлечение золота в хвосты идентично извлечению железа в хвосты, что еще раз подтверждает упорность руды; золотоносные сульфиды представлены как халькопиритом, так и пиритом.

Положительной динамикой характеризуется извлечение меди. Наилучшими показателями отличаются опыты, проведенные с использованием дополнительной ультразвуковой обработки раствора. Извлечение меди в этих условиях увеличивается на 3,75 % и достигает 91,5 % за счет диспергирования раствора католита и образования пузырьков микронного размера, позволяющих

DOI: 10.25635/2313-1586.2020.02.096

**Prokhorov Konstantin V.**

Senior Researcher,  
Candidate of Technical Sciences,  
Khabarovsk Federal Research Center,  
Far-East Branch of RAS,  
680000 Khabarovsk, 51 Turgeneva Str.  
e-mail: [kostyan1986\\_ne@mail.ru](mailto:kostyan1986_ne@mail.ru)

**Kopylova Alexandra E.**

Senior Engineer  
Khabarovsk Federal Research Center,  
Far-East Branch of RAS

**PROMISING WAYS TO INTENSIFY  
THE FLOTATION PROCESS  
OF COPPER-PORPHYRY  
AND GOLD-SILVER ORES BY APPLYING  
ELECTROCHEMICAL PROCESSING***Abstract:*

The paper deals with the problem of enrichment of persistent ores with complex material composition containing precious metals in a fine state. It notes the relevance of involving methods of flotation enrichment intensification using electrochemical solution preparation for flotation pulp preparation. Experimental studies were conducted on two different types of ores to compare the efficiency of increasing the extraction of valuable components into concentrates. When processing copper-porphyry ores, the use of catholyte and a mixture of catholyte and anolyte significantly (by 13.5-19%) increases the conversion of gold into a foam product. Electroflotation of gold-quartz ores, using a solution of catholyte, helped to increase the extraction of gold by more than 6%, which can be of great practical importance in the processing of man-made raw materials. The loss of gold to tailings is possible due to the oxidation of pyrite containing gold in the ore, which is partially oxidized in the presence of an anolyte, and the particles acquire hydrophilic properties. The extraction of gold into tailings is identical to the extraction of iron into tailings, which once again confirms the tenacity of the ore, gold-bearing sulfides are represented by both chalcopyrite and pyrite.

Copper recovery is characterized by positive dynamics. The best indicators result from the experiments conducted with the use of additional ultrasonic treatment of the solution. Copper extraction under these conditions increases by 3.75% and reaches 91.5%, due to the dispersion of the catholyte solution and the formation of micron-sized bubbles that allow the finer fractions to be flowed. The obtained results proved and experimentally confirmed the feasibility of using combined pneumatic and electric flotation in the processing of fine-grained copper-porphyry and gold-

\* Работа выполнена при финансовой поддержке проекта Президиума ДВО РАН №18-2-015 «Золото-медно-порфировое оруденение Дальнего Востока: индикаторы геодинимических обстановок, рудоносного магматизма и минералого-геохимические особенности рудно-магматических систем в связи с решением проблем прогноза, поиска, оценки и технологий разработки месторождений данного типа»

сфлотировать более тонкие фракции. Полученными результатами обоснована и экспериментально подтверждена целесообразность использования комбинированной пневмо- и электрофлотации при переработке тонковкрапленных медно-порфировых и золотокварцевых руд с сопутствующей благороднометалльной минерализацией.

*Ключевые слова:* пирит, медно-порфировые руды, электрохимическая обработка, комбинированная флотация, окислительно-восстановительный потенциал, сульфидный концентрат, извлечение золота

*quartz ores with accompanying noble metal mineralization.*

*Keywords:* pyrite, copper-porphyry ores, electrochemical processing, combined flotation, redox potential, sulfide concentrate, gold extraction.

### Введение

Одной из важнейших проблем золотодобывающей промышленности является извлечение ценных металлов из упорных труднообоготимых руд. Упорные золотосодержащие руды характеризуются, как правило, сложным вещественным составом, тонкодисперсным состоянием золота и тонковкрапленностью минералов. В настоящее время вопрос создания эффективной технологии переработки упорных золотосодержащих руд является проблематичным, поэтому достижение высокой степени извлечения золота является актуальной задачей.

Развитие минерально-сырьевой базы золотодобывающей промышленности на современном этапе связано, главным образом, с масштабным вовлечением в переработку руд с рассеянными (дисперсными) формами нахождения золота в кристаллической решетке минералов-носителей. Включения дисперсного золота ввиду своей малой (относительно размеров вмещающих кристаллов минералов-носителей) величины являются наиболее сложноизвлекаемыми. Минералы благородных металлов в труднообоготимых рудах отличаются малыми размерами и слабой раскрываемостью, степень измельчения достигает 85 % класса  $-0,04$  мм, что сопровождается образованием большого количества шламов, являющихся источником потерь (до 15–20 %) ценных компонентов при обогащении. Такие сложноизвлекаемые формы нахождения золота требуют особого подхода к его извлечению с использованием специальной техники и технологий. В целом необходим гибкий подход и к выбору схемы доизвлечения золота, базирующийся, в первую очередь, на комплексном геолого-технологическом исследовании сырья и пространственном распределении и перераспределении в нем различных форм золота [1 – 3].

Золото во многих сульфидных рудах связано с кристаллической решеткой халькопирита и пирита. Пирит является наиболее распространенным сульфидным минералом [4, 5]. Присутствие пирита в концентрате приводит к снижению содержания ценных компонентов и загрязнению серой и железом, что влечет за собой увеличение затрат на плавку.

Пирит имеет небольшую экономическую ценность, но часто связан с ценными минералами, такими как сфалерит, халькопирит и галенит. Иногда пирит может также нести дисперсии ценных металлов, таких как золото, и иногда добывается для этого [6, 7]. При нормальных условиях золото и пирит образуют устойчивые парагенетические ассоциации, а субмикроскопические и наноразмерные частицы золота распределяются в структурно неплотных зонах кристаллов пирита [8].

Разведка и эксплуатация мелких месторождений коренного золота на территории Дальнего Востока России имеет важное стратегическое значение в связи с имеющимися высокими перспективами прироста запасов на многих из них в пределах золотоносных площадей. Недоразведанные и недоизученные мелкие золоторудные месторождения наряду с перспективными рудопроявлениями золота являются важным резервом для будущей золотодобычи в регионе.

В работе проводились технологические исследования руды Малмыжского и Киранканского месторождений. В настоящее время Малмыжское золото-медно-порфировое месторождение в Хабаровском крае является крупнейшим в России объектом золото-медно-порфирового типа, относится к категории уникальных по запасам с относительно умеренными содержаниями меди ( $\text{Cu} - 0,27-0,39\%$ ) и золота ( $\text{Au} - 0,12-0,24$  г/т). Руда обладает агрегатно-вкрапленной, тонкопрожилковой и микро-трещиноватой текстурой. Главными рудными минералами являются халькопирит и пирит. [9 – 11].

Киранкан – месторождение золото-серебряного типа. По данным входного анализа, содержание золота и серебра в пробах –  $\text{Au} 4-5,4$  г/т и  $\text{Ag} 2,3-5,6$  г/т, соответственно.

Так как основной процесс обогащения руд цветных металлов – флотация, актуальным является вопрос совершенствования действующих технологий флотации, что связано преимущественно с прогрессирующим снижением качества сырья. Ранними исследованиями было выявлено, что использование электрохимических методов позволяет улучшить селекцию минералов, повышение извлечения ценных рудных компонентов в концентраты и экономическую эффективность процесса обогащения за счет сокращения расхода компонентов [12].

Поскольку большинство сульфидов металлов являются полупроводниками, в системе флотации сульфидных минералов происходят различные электрохимические реакции. Исследования показали, что существует сильная корреляция между флотацией пирита и электрохимическими реакциями. Известно, что электрохимические механизмы ответственны за различные явления, происходящие во флотационной системе, содержащей сульфиды, такие как изменения химии поверхности из-за окисления, взаимодействие с другими компонентами, адсорбция собирателя и осаждение металлов на поверхности. Важнейшим фактором, влияющим на электрохимические процессы, является электрохимический потенциал границы раздела минерал/раствор. Электрохимический потенциал контролирует образование и закрепление на поверхности не только веществ, ответственных за флотацию минерала, таких как полисульфиды, элементарная сера и ксантогенат, но и вещества, ответственные за его депрессию, например, оксид железа/гидроксид и сульфат [13].

Применение ультразвукового воздействия в процессе флотации позволяет диспергировать растворенный водород в среде католита и в целом, оказывает положительное влияние на флотацию за счет образования микроскопических газовых включений [14, 15]. Очевидно, что кислород может изменить поверхностную реакционную способность золота и усилить гальваническое взаимодействие между золотом и пиритом. При контакте пирита, содержащего золото, с кислородом образуются дополнительные продукты окисления, такие как сера, гидроксид железа, сульфат железа. Это указывает на то, что золото может изменять свойства поверхности пирита при контакте с пиритом в условиях обогащения с использованием комбинированной электрохимической обработки [16].

*Целью исследования* является достижение максимально полного извлечения в концентрат всех золотосодержащих сульфидных минералов меди путем проведения комбинированной пневмо-электрофлотации. Интенсифицировать флотационные процессы предлагается посредством электрохимической обработки пульпы флотации, что предусматривает воздействие на систему «минерал – реагент».

#### *Материалы исследования*

Для сравнения флотационных схем в качестве материалов исследования использовались два типа руд – медно-порфировая, отобранная на одном из участков Малмыжского месторождения, и золотокварцевая руда с месторождения Киранкан.

### Методика приготовления пульпы

Для дальнейшего проведения флотации приготовление пульпы осуществлялось в щелочном продукте электролиза раствора гидрокарбоната натрия (католите) и комбинации католита и анолита, полученном в диафрагменном электролизере с анодом, имеющим окисно-рутениевое покрытие, при объемной плотности тока  $I = 0,2-0,3$  А/л и времени обработки 20 мин; рН католита – 8–8,2;  $Eh = (-600) - (-750)$  мВ. С целью диспергирования растворенного водорода в среде католита раствор подвергали ультразвуковой обработке в течение 5 мин.

### Методика проведения исследований

Материал, перед технологическими исследованиями предварительно подвергался дроблению, перемешиванию и измельчению до крупности 70 – 80 % класса 0,071 мм в лабораторной шаровой мельнице «Пульвиризетте 5» мокрым способом в следующих условиях: масса навески – 125 г, шаровая нагрузка – 465 г (15 шаров по 31 г), вода – 100 мл; соотношение Q:Ш:V = 1:3,7:0,8; число оборотов – 180 об/мин.

Опыты по флотационному извлечению проводились в лабораторной флотационной машине ФМ-1М с объемами камер 0,25 л (основная флотация) и 0,1 л (перечистные операции). Масса навески – 125 г (Т/Ж=1/2). Частота вращения импеллера – 4000 об/мин. Используемый реагентный режим, постоянный во всех опытах: жидкое стекло ( $Na_2SiO_3$ ), аэрофлот ИМА-ИИ413п, сосновое масло. Схемы флотации и режим подачи реагентов представлены на рис. 1, 2.



Рис. 1 – Схема коллективной флотации медно-порфиоровой руды



Рис. 2 – Схема и реагентный режим коллективной флотации золотокварцевой руды

Поскольку руды сильно различаются, технологическая схема должна быть адаптирована для конкретного месторождения. В первом случае схема флотации подобрана таким образом, чтобы возможно было получить наиболее бедные золотом отвальные хвосты, во втором – для получения более качественного коллективного концентрата.

### Результаты исследования

Результаты извлечения целевых компонентов представлены на рис. 3 – 6. Экспериментально установлено, что при проведении процесса флотации в среде католита в качестве среды истирания при подготовке пульпы и процесса флотации, извлечение меди увеличивается на 2 %. Сравнение результатов эксперимента с использованием католита только в процессе флотации показывает снижение извлечения меди на 13,7 % в концентрат и увеличение его на 12,9 % в хвосты (см. рис 3). Это позволяет предположить, что при использовании воды в процессе измельчения за счет находящихся в ней растворенных газов (кислорода, углекислого газа, окислов азота) идут окислительные процессы на поверхности халькопирита, повышающие площадь его гидрофильных участков. Применение ультразвуковой обработки позволяет диспергировать растворенный водород до уровня микропузырьков с высокой удельной энергией окружающих их пленок воды. Извлечение меди в этих условиях увеличивается на 3,75 % и достигает 91,5 % за счет локального закрепления пузырьков микронного размера на гидрофобных участках поверхности частиц халькопирита рядовой крупности и обеспечения возможности флотации его тонких шламовых фракций. Потери меди с хвостами при данной обработке, соответственно, минимальны и составляют 6,9 %.

Накопление некоторой части железа в хвостах (см. рис. 4) может происходить вследствие окисления содержащегося в руде пирита, которое имеет место при гораздо меньших потенциалах в сравнении с халькопиритом [17]. За счет окисления происходит гидрофилизация поверхности пирита, которая очень стабильна при дефиците протонов в щелочной среде. Потенциал пульпы за счет неизбежных процессов окисления растет в ходе процесса флотации и становится положительным. В свою очередь, потенциал максимального извлечения меди близок к потенциалу +117 мВ, при котором из ксантогената образуется диксантогенид, чем можно объяснить повышенное извлечение меди в концентрат и железа – в хвосты.

Анализируя динамику изменения извлечения золота (см. рис. 5) в зависимости от условий эксперимента, можно отметить, что извлечение золота в концентрат, кроме варианта истирания (измельчения) и флотации на воде, идентично извлечению меди в концентрат, а извлечение золота в хвосты – извлечению железа в хвосты.

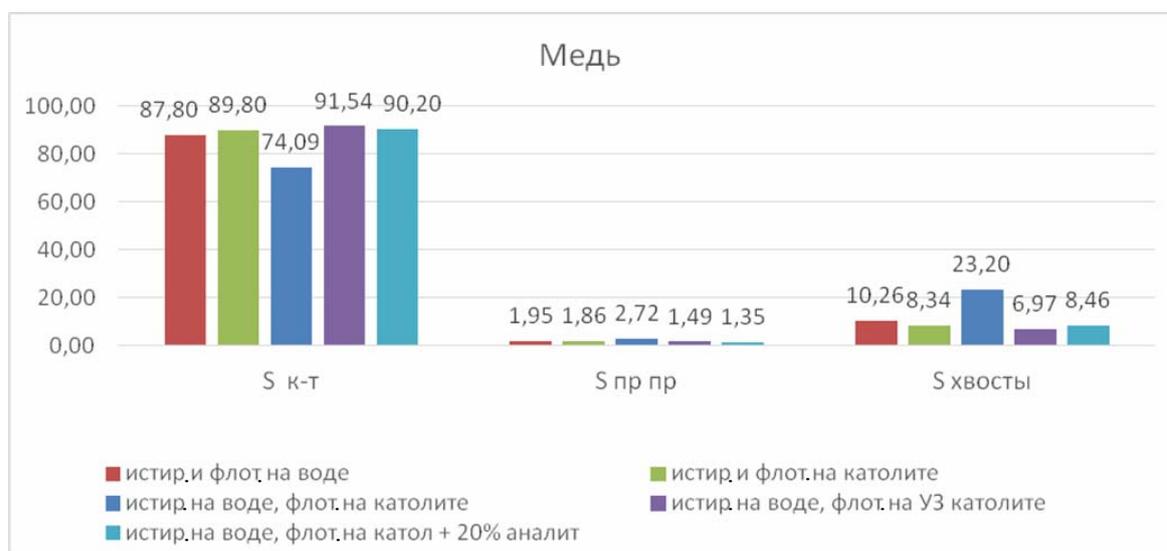


Рис. 3 – Показатели извлечения меди в процессе комбинированной флотации



Рис. 4 – Показатели извлечения железа в процессе комбинированной флотации



Рис. 5 – Показатели извлечения золота в процессе комбинированной флотации

Сравнивая диаграммы извлечения меди и золота на рис. 3 и 5, можно заметить, что использование католита и смеси католита и анолита существенно (на 13,5 – 19 %) повышает перевод золота в пенный продукт, в то время как для меди это увеличение незначительно (2 – 3,5 %), хотя такой прирост также может иметь практическое значение.

Эксперименты, проведенные на руде Киранканского месторождения, содержащей золотоносный пирит и кварц, также показали положительную динамику извлечения золота при использовании католита в качестве раствора для приготовления пульпы – до 87,15 % (см. рис. 6). При добавлении к католиту анолита извлечение снизилось на 8,84 %. Потери золота в хвосты возможны вследствие окисления содержащегося в руде пирита, содержащего золото, который частично окисляется в присутствии анолита, и частицы приобретают гидрофильные свойства.



Рис. 6 – Показатели извлечения золота в процессе комбинированной флотации золотокварцевой руды

На повышение извлечения ценных компонентов также положительно повлиял выход концентрата флотации. Выходы продуктов флотации стандартной и комбинированной флотации (см. рис. 1, 2) представлены в табл. 1 и 2. Исследования показали, что использование электрохимической подготовки среды для проведения флотации увеличивает выход концентратов и снижает количество хвостов.

Таблица 1

**Выход продуктов флотации медно-порфировой руды месторождения Малмыж**

Продукт	Выход продуктов, %		
	«Нулевой» опыт	Флотация на растворе католита	Флотация на растворе католита + обработка ультразвуком
Сульфидный концентрат	5,23	6,14	7,63
Сульфидный промежуточный продукт	4,06	3,94	4,15
Сульфидные хвосты	90,71	89,92	88,22

Таблица 2

**Выход продуктов флотации золотокварцевой руды месторождения Киранкан**

Продукт	Выход продуктов, г		
	«Нулевой» опыт	Флотация на растворе католита	Флотация на растворе католита + обработка ультразвуком
Сульфидный концентрат	3,18	2,95	3,37
Сульфидный концентрат 2	1,74	2,17	2,17
Сульфидный промежуточный продукт	18,85	12,80	12,19
Сульфидных хвосты	76,22	82,09	82,26

Происходит это в первую очередь за счет увлечения выхода в концентрат большего количества тонких классов, содержащих полезные компоненты. При классической схеме часть тонких классов (шламы), содержащих золото, переходит в хвосты и теряется. Сгенерированные микропузырьки газа в процессе электрохимической обработки и под воздействием ультразвука взаимодействуют с тонкими шламами и в дальнейшем вместе с крупными пузырьками поднимаются в пенный продукт. На рис. 7 и 8 видно, что при использовании католита в процессе подготовки пульпы для флотации в концентраты флотации переходит больше тонких классов ( $-5+0$  мкм для месторождения Киранкан, и  $-10+0$  мкм для месторождения Малмыж) в сравнении с «нулевым» опытом. Для руды месторождения Киранкан это выражено значительно, для материала Малмыжского месторождения – в меньшей степени.

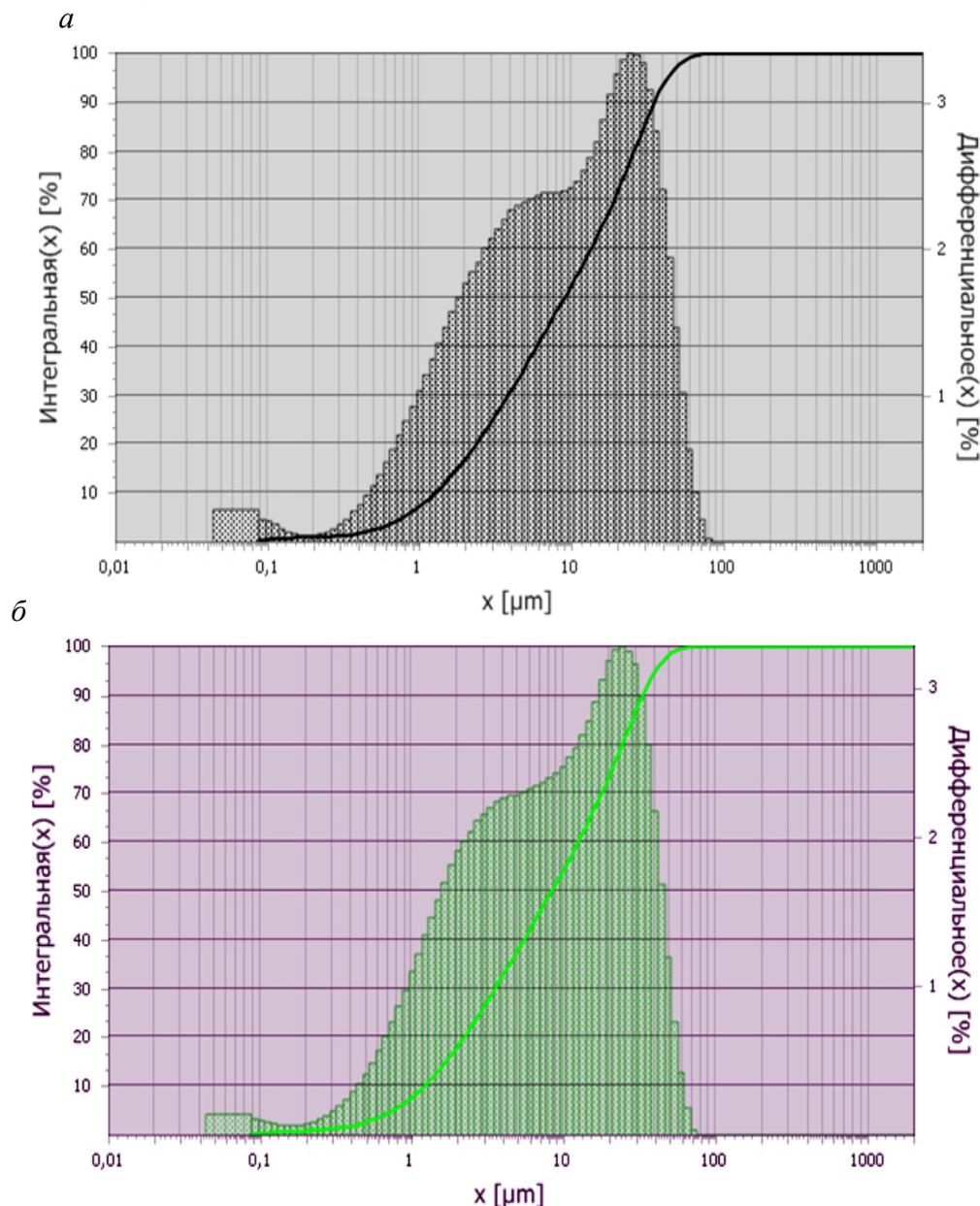


Рис. 7 – Гранулометрический состав концентрата флотации медно-порфировой руды месторождения Малмыж:

*а* – «нулевой опыт», *б* – комбинированная пневмо-электрофлотация, где  $x$  – гранулометрическая характеристика пробы, мкм

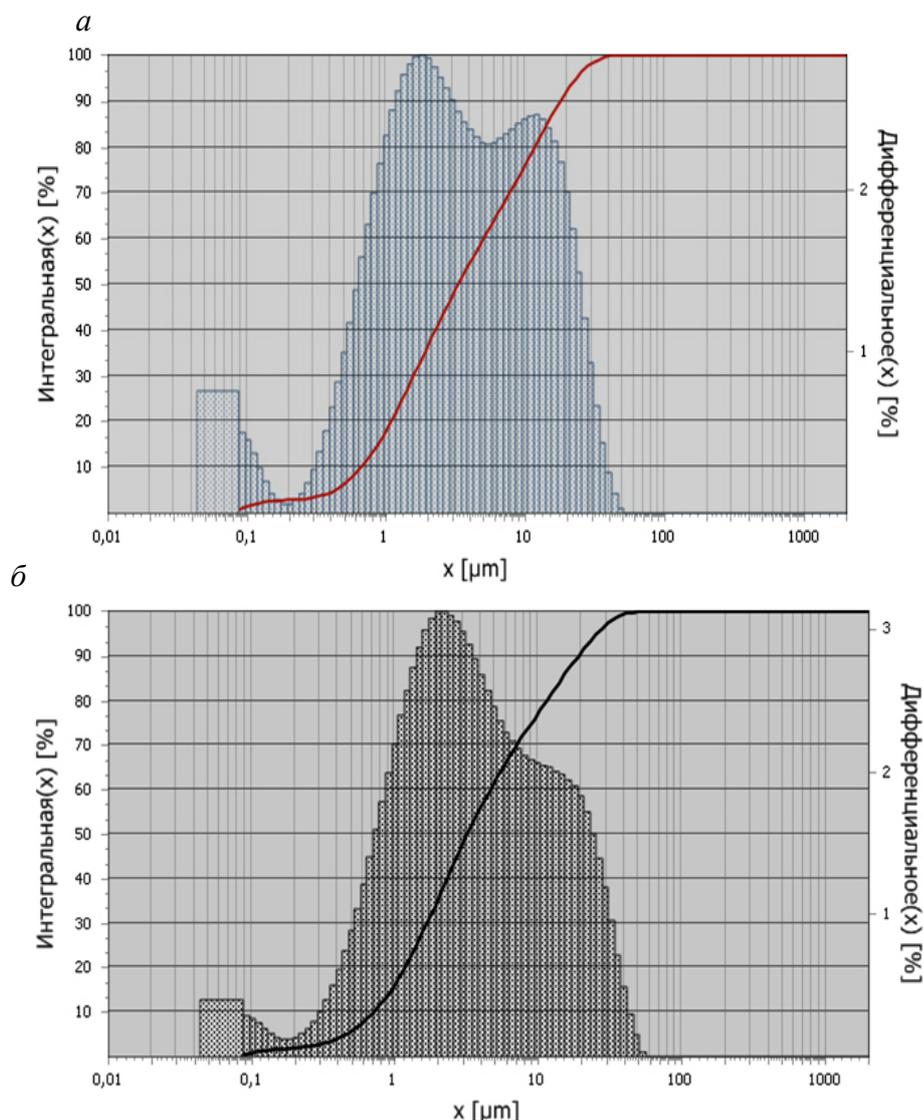


Рис. 8 – Гранулометрический состав концентрата флотации руды месторождения Киранкан:

*а* – «нулевой опыт»; *б* – комбинированная пневмо-электрофлотация, где  $x$  – гранулометрическая характеристика пробы, мкм

Увеличение извлечения золота в концентрат при большем выходе тонкой фракции подтверждает его наличие в тонких формах и эффективность применения энергетических воздействий в процессах обогащения.

#### Заключение

По полученным данным экспериментально подтверждена эффективность использования электрообработки раствора для приготовления пульпы в схемах флотации сложноизвлекаемых форм нахождения золота из руд различных формационных типов. Полученные результаты свидетельствуют о возможности интенсификации стандартных методов флотационного обогащения за счет электрохимической обработки пульпы флотации. Предлагаемая технология будет способствовать повышению извлекаемости содержащихся в кварце благородных металлов и даст не только научно-технический эффект от ее реализации, но и экономический, так как приведет к повышению ресурсов благородных металлов Дальнего Востока.

*Спектральный, химический и гранулометрический анализы выполнены на базе центра коллективного пользования "Центр исследования минерального сырья" Хабаровского Федерального исследовательского центра ДВО РАН.*

## Литература

1. Матвеева Т.Н. Исследование, разработка и апробация новых классов флотационных реагентов для извлечения цветных и благородных металлов из труднообогатимых руд / Т.Н. Матвеева, Т.А. Иванова // Современные проблемы комплексной переработки труднообогатимых руд и техногенного сырья (Плаксинские чтения – 2017): материалы Междунар. науч. конф., Красноярск, 12-15 сент. 2017 г. – Красноярск : СФУ, 2017. – С. 21–24.
2. Геотехнологии извлечения дисперсного и «тонкого» золота из техногенных минеральных образований Забайкальского края / А.Г. Секисов, А.Ю. Лавров, Ю.С. Шевченко и др. // Вестник Читинского государственного университета. - 2012. – № 1 (80). – С. 34 - 42.
3. Секисов А.Г. Физико-химические геотехнологии при освоении золотосодержащих техногенных отложений / А.Г. Секисов, А.И. Трубачев, Т.Г. Конарева // Золотодобывающая промышленность. - 2012. - № 3 (51).– URL: [https://nedradv.ru/nedradv/ru/page\\_industry/?obj=5be75702d47898b5f1eeaf91820cc682](https://nedradv.ru/nedradv/ru/page_industry/?obj=5be75702d47898b5f1eeaf91820cc682) (дата обращения: 03.02.2020).
4. Oertzena, G.U. Cu adsorption on pyrite (100): Ab initio and spectroscopic studies / G.U. von Oertzena, W.M. Skinnera, H.W. Nesbittb [et al.]// Surface Science. – 2007. – Vol. 601, Iss. 24. – P. 5794–5799.
5. Bicak, O. Adsorption of guar gum and CMC on pyrite Author links open overlay panel / O. Bicak, Z.Ekmekci, D.J. Bradshaw, P.J. Harris // Minerals Engineering. – 2007. – Vol. 20, Iss. 10. – P. 996–1002.
6. Chandra, A.P. The mechanisms of pyrite oxidation and leaching: A fundamental perspective /A.P. Chandra, A.R.Gerson // Surface Science Reports. – 2010. – Vol. 65, Iss. 9. – P. 293–315.
7. Mikhlin, Yu. Hard X-ray photoelectron and X-ray absorption spectroscopy characterization of oxidized surfaces of iron sulfides / Yu.Mikhlin, Y.Tomashevich, S.Vorobyev [et al.]// Applied Surface Science. – 2016. – Vol. 387. – P. 796-804.
8. Формы вхождения золота в пирит / В.И. Рождествина, Г.И. Неронский, С.И. Бородавкин, Н.В.Федорова // Федоровская сессия 2008, Санкт-Петербург, 07-09 окт. 2008 г.: тезисы докл. междунар. науч. конф. – СПб., 2008. – С. 92-95.
9. Типоморфные минералы зоны окисления золото-медно-порфириновых руд Малмыжского месторождения (участок свобода) / В.Г. Крюков, Н.А. Лаврик, Н.М. Литвинова, В.Ф. Степанова // Георесурсы. – 2019. – Т. 21, № 3. – С. 91-98.
10. Гурман М.А. Технологические исследования первичных медно-порфириновых руд Малмыжского месторождения. – DOI: 10.25635/2313-1586.2019.02.094 / М.А. Гурман, А.Е. Полтарецкая / Проблемы недропользования. - 2019. - № 2.- С. 94 -100.
11. Буханова Д.С. Условия формирования Au-Cu-порфирирового месторождения Малмыжское (по данным исследования флюидных включений) / Д.С. Буханова, П.Ю. Плечов // Вестн. КРАУНЦ. – 2017.–Т. 34, № 2.– С. 61-71.
12. Чантурия В.А. Электрохимическая технология в обогащательно-гидрометаллургических процессах / В.А. Чантурия, Г.Н. Назарова. – М.: Наука, 1977. – 166 с.
13. Прохоров К.В. Эффект электрохимического контроля процесса истирания сульфидсодержащих руд при подготовке их для флотации. – DOI: 10.25635/2313-1586.2019.02.115 / К.В. Прохоров, А.Е. Полтарецкая // Проблемы недропользования.– 2019. – №2.– С. 115-121.
14. Попова Н.В. Изучение влияния ультразвукового воздействия на показатели качества воды / Н.В. Попова, С.А. Фатеева. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/>

v/izuchenie-vliyaniya-ultrazvukovogo-vozdeystviya-na-pokazateli-kachestva-vody (дата обращения: 11.03.2020).

15. Ультразвук в обогащении полезных ископаемых. / В.А. Глембоцкий, М.А. Соколов, И.А. Якубович и др. – Алма-Ата: Наука, 1972. – 212 с.

16. The surface properties of pyrite coupled with gold in the presence of oxygen / Y. Huai, C.Plackowski, Y. Pen // Minerals Engineering. – 2017. – Vol. 111. – P. 131-139.

17. Tao, D.P. The incipient oxidation of pyrite / D.P.Tao, Y.Q.Li, P.E. Richardson, R.-H.Yoon// Colloids and Surfaces. – 1994. – Vol. 93. – P. 229-239.