

УДК 622.7:001.89

## ИССЛЕДОВАНИЯ И РАЗРАБОТКА НОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ НА ОПЫТНО-ПРОМЫШЛЕННОЙ УСТАНОВКЕ ГОРНОГО ИНСТИТУТА



**Т. Н. МУХИНА**<sup>1</sup>,  
зав. сектором, канд. техн. наук



**В. В. МАРЧЕВСКАЯ**<sup>1</sup>,  
ведущий научный сотрудник, канд. техн. наук,  
vvt@goi.kolasc.net.ru



**В. И. МАКСИМОВ**<sup>2</sup>,  
зав. лабораторией

<sup>1</sup> Горный институт Кольского научного центра РАН, Апатиты, Россия

<sup>2</sup> ООО «Институт Гипроникель», Санкт-Петербург, Россия

### Введение

Опытно-промышленная обогатительная установка Горного института КНЦ РАН создана в 1975 г. Ее проект был разработан канд. техн. наук А. И. Андреевой, которая руководила работой установки в первые годы. Цель создания опытно-промышленной обогатительной установки – оценка обогатимости минерального сырья в непрерывных условиях. Первые работы на установке были связаны с обогащением апатит-нефелиновых руд текущей добычи и перспективных месторождений Хибинского массива. Так, на установке были разработаны и испытаны технологии комплексного обогащения апатит-нефелиновых руд в условиях водооборота, что способствовало переводу на режим оборотного водоснабжения обогатительных фабрик ПО «Апатит».

Состав опытно-промышленной установки за прошедшие годы значительно изменился. В него входят: закрытый рудный склад; технологические участки дробления, измельчения, флотационного, гравитационного, магнитного, электрического и радиометрического обогащения; приготовления реагентов; пробоподготовки. Гравитационные аппараты включают винтовые сепараторы и шлюзы, концентрационные столы и центробежный концентратор. Имеются сепараторы для работы в слабом и высокоинтенсивном

Приведены результаты опытно-промышленных испытаний разработанных технологий обогащения малосульфидных благородно-металлических руд трех месторождений Федорово-Панского интрузива и Мончегорского плутона Кольского полуострова, а также золотосодержащих руд месторождений Восточной Сибири, выполненных сотрудниками Горного института КНЦ РАН совместно со специалистами ООО «Институт Гипроникель». Получены благороднометаллические и золотосульфидный концентраты, пригодные для дальнейшей переработки.

**Ключевые слова:** опытно-промышленная обогатительная установка, руды разных регионов России, малосульфидные платинOMETаллические руды, золотосодержащие руды, флотация, реагентный режим, гравитационное обогащение, концентрат, технологические показатели.

**DOI:** 10.17580/gzh.2020.09.07

магнитных полях. Это позволило значительно расширить ассортимент обогащаемого минерального сырья.

В настоящее время опытно-промышленная установка является одной из важнейших составляющих экспериментальной базы института.

Установка обеспечивает апробацию разрабатываемых в Институте обогатительных технологий, а также проведение испытаний технологий и наработку опытных партий концентратов из сырья месторождений Мурманской области и других регионов России совместно с ведущими отечественными научно-исследовательскими и специализированными организациями (ООО «Институт Гипроникель», ЗАО «Механобр инжиниринг», АО «Пана», АО «Кольская ГМК», АО «Апатит», МХК «ЕвроХим», АО «Ковдорский ГОК», АО «Полиметалл» и др.).

За последние годы исследователями Горного института при опытно-промышленных испытаниях технологий обогащения природного и техногенного минерального сырья получены следующие важные результаты:

- испытана технология флотационного обогащения комплексных малосульфидных благороднометаллических руд Федорово-Панского интрузивного комплекса;
- установлена эффективность обогащения хромитовых руд месторождений Сопчеозерское (Кольский п-ов) и Рай-Из (Урал) по гравитационной технологии;
- подтверждена возможность получения апатитового и нефелинового концентратов из апатит-нефелиновых руд текущей добычи месторождения Олений Ручей;
- оценена обогатимость апатит-магнетитовых руд глубоких горизонтов Ковдорского месторождения и отходов обогащения,

складированных во втором поле хвостохранилища АО «Ковдорский ГОК»;

- апробирована гравитационно-магнитоэлектрическая технологическая схема обогащения гранатовых песков участка Явр (Кольский п-ов) с наработкой партий гранатовых концентратов для испытаний гидроабразивной резки.

Проведены совместные опытно-промышленные испытания:

- обогатимости золотосульфидных руд месторождений Попутнинское (Красноярский край) и Майское (Чукотский АО);
- обогатимости малосульфидных благороднометаллических руд месторождения Мончегорского плутона Кольского п-ва;
- обогатимости медно-никелевых руд Кингашского рудного узла (Красноярский край), месторождения Кун-Манье (Амурская обл.), месторождений Печенгского рудного поля (Кольский п-ов) по флотационной технологии;
- магнитфлотационной технологии обогащения золотосодержащих железомедных руд трех месторождений Быстринского рудного поля (Забайкалье);
- обогатимости свинцово-цинковых руд Павловского месторождения (Новая Земля);
- обогащения магнетит-ильменитовых руд месторождения Большой Сейим (Амурская обл.) по магнитно-гравитационно-флотационной технологической схеме;
- обогатимости сидеритовых руд Бакальского месторождения различными физическими методами с оценкой их технико-экономической эффективности;
- технологии обогащения титаноциркониевых песков россыпных месторождений Центральное (Тамбовская обл.) и Бешпагир (Ставропольский край).

В настоящей статье представлены результаты испытаний технологий обогащения малосульфидных благороднометаллических руд и золотосульфидных руд месторождения Попутнинское.

#### Методика проведения испытаний

Федорово-Панский расслоенный интрузивный комплекс и Мончегорский плутон являются важнейшими рудными узлами Кольской платинометаллической провинции, причем месторождения Федорово-Панского интрузива относятся к крупным и уникальным месторождениям металлов платиновой группы (МПГ). Платинометаллическое оруденение интрузивов повсеместно пространственно и генетически связано с сульфидной медно-никелевой минерализацией. Основными формами концентрации платиновых металлов в рудах месторождений этих интрузивов, как и на большинстве крупных малосульфидных месторождений мира, являются их собственные минералы и твердые растворы палладия в пентландите, в котором сосредоточено до 50 % валового палладия. Основным методом обогащения малосульфидных платинометаллических руд в России на обогатительных фабриках ПАО «ГМК Норильский никель», а также на зарубежных фабриках является флотация с получением коллективных сульфидных благороднометаллических концентратов [1–13].

Исследования на обогатимость малосульфидных платинометаллических руд Федорово-Панского интрузива выполнены сотрудниками Горного института на опытно-промышленной установке



**Рис. 1. Общий вид опытно-промышленной обогатительной установки**

(рис. 1) с использованием материала трех представительных технологических проб.

По данным минералого-технологических исследований, руда первой технологической пробы № ФТ-07 месторождения Федорова Тундра на 96 % состоит из трех главных минералов: плагиоклаза (45 %), пироксенов (37 %) и амфиболов (14 %). Содержание основных сульфидов – пирротина, халькопирита, пентландита, слагающих до 95 % рудной минерализации, составляет 1,2 % при их соотношении в материале пробы 5:3:2.

Наиболее распространенными минералами платиновых металлов в рудах всех трех проб являются висмутотеллуриды и сульфиды палладия и платины. Золото присутствует в виде золотосеребряных сплавов с высокими вариациями элементов.

Содержание полезных компонентов в исходной руде пробы № ФТ-07 составило: Pt – 0,26 г/т; Pd – 1,24 г/т; Au – 0,09 г/т; МПГ + Au – 1,59 г/т; Ni – 0,102 %; Cu – 0,12 %.

Руда технологической пробы № ФТ-08 с другого участка месторождения Федорова Тундра на 95 % состоит из тех же главных минералов, но в других соотношениях: плагиоклаза (35 %), пироксенов (30 %) и амфиболов (30 %). В руде присутствует большое количество вторичных минералов, прежде всего хлорита. Содержание главных рудных минералов – пирротина, халькопирита, пентландита составляет 1,2 % при их соотношении в материале пробы 5:2,5:2,5.

Содержание полезных компонентов в исходной руде составило: Pt – 0,14 г/т; Pd – 0,66 г/т; Au – 0,06 г/т; МПГ + Au – 0,85 г/т; Ni – 0,106 %; Cu – 0,095 %.

Главными нерудными минералами технологической пробы № МП-2 Панского интрузива являются плагиоклаз, составляющий 55 % объема пород, и пироксены.

Содержание в руде главных рудообразующих сульфидных минералов – пирротина, халькопирита, пентландита, слагающих в среднем около 95 % рудной минерализации, находится в пределах 1,3–1,4 % при их соотношении 5:3:2.

Содержание ценных компонентов в исходной руде составило: Pt – 0,44 г/т; Pd – 2,94 г/т; Au – 0,16 г/т; МПГ + Au – 3,54 г/т; Ni – 0,116 %, Cu – 0,145 %.

Цикл рудоподготовки материала технологических проб включал: дробление руды, измельчение в шаровой мельнице, классификацию измельченного продукта на грохоте и в гидроциклоне с возвратом надрешетного продукта грохота и песков гидроциклона в мельницу.

Флотационная схема обогащения малосульфидных платино-металлических руд Федорово-Панского интрузива в полупромышленных условиях включала основную флотацию, четыре-шесть перемывок концентрата основной флотации, контрольную операцию флотации камерного продукта основной флотации. Введение шестой перемывочной операции связано с оценкой возможности повышения качества флотационного концентрата при обогащении труднообогатимых руд сложного минерального состава пробы № ФТ-08.

Крупность питания флотации составляла 90 % класса –0,071 мм. Флотацию осуществляли в машинах механического типа 59А ФЛ, 60А ФЛ, 94Б ФЛ с камерами объемом 30, 12, 3 л соответственно.

Испытания проводили с усовершенствованным реагентным режимом сульфидной флотации, отличающимся от традиционно применяемых для флотации сульфидов реагентов тем, что, помимо бутилового ксантогената калия, натриево-бутилового аэрофлота, медного купороса и карбоксиметилцеллюлозы, в процессе флотации подавали вспениватель-модификатор марки DSFO04 компании Orica Mining Chemicals.

Опытно-промышленные испытания обогатимости малосульфидных платино-металлических руд месторождения Мончегорского плутона выполнены совместно сотрудниками Горного института и ООО «Институт Гипроникель» на той же установке.

Силикатную часть технологической пробы составляют следующие основные минералы: амфиболы, альбит, кварц, слюды, хлорит, минералы группы цоизита-эпидота. Особенность руды проявляется в отсутствии пироксенов, которые практически полностью замещены амфиболами.

Главные сульфидные минералы представлены халькопиритом, пентландитом, пирротинитом, борнитом, миллеритом. В отличие от малосульфидных руд Федорово-Панского интрузива, здесь сульфидная часть преимущественно (на 50 %) представлена халькопиритом.

Из платиновых минералов в руде пробы наиболее распространены арсениды палладия, платины и висмутотеллуриды палладия; золото представлено Au-Ag-сплавами.

Содержание ценных компонентов в исходной руде технологической пробы составило: Pt – 0,39 г/т; Pd – 3,14 г/т; Au – 0,18 г/т; МПГ + Au – 3,71 г/т; Ni – 0,24 %; Cu – 0,35 %.

Технологическая схема обогащения руды включала: измельчение дробленой руды в шаровой мельнице, работающей в замкнутом цикле с грохотом и гидроциклоном; основную сульфидную флотацию; две перемывки концентрата основной флотации и три операции контрольной флотации камерного продукта основной флотации с выделением концентрата 1 и основных отвальных хвостов; доизмельчение промпродуктов до крупности 90 % класса –40 мкм; последующую их флотацию в отдельном цикле с двумя контрольными перемывками и дофлотацией камерного

продукта 1 контрольной перемывки с получением концентрата 2 и дополнительных отвальных хвостов.

Испытания проводили с использованием следующих реагентов: бутилового ксантогената калия, натриево-бутилового аэрофлота, медного купороса, карбоксиметилцеллюлозы, кальцинированной соды, вспенивателя марки DSFO04.

Оптимальная крупность питания основной флотации составила 91,5 % класса –0,071 мм. Флотацию выполняли в машинах механического типа 59А ФЛ, 60А ФЛ, 94Б ФЛ с камерами объемом 30, 12, 3 л соответственно.

Рудоносная минерализованная зона Попутнинского золоторудного месторождения (Южно-Енисейский район Красноярского края), в которой заключены все известные рудные тела, имеет вид крутопадающей залежи с изгибами, пережимами, раздувами и расщеплениями. Наиболее значимыми индикаторами оруденения являются карбонат-кварцевые жильно-прожилковые и сульфидные прожилково-вкрапленные зоны минерализации [14].

Опытно-промышленные испытания флотационной обогатимости золотосодержащих руд Попутнинского месторождения выполнены совместно сотрудниками Горного института и ООО «Институт Гипроникель» на материале технологической пробы, характеризующей усредненный состав руд месторождения.

Основными нерудными минералами являются кварц, слюды, карбонаты, основными сульфидными минералами – пирит и арсенидопирит.

Золото представлено самородной формой, причем проба золота в золотосеребряных сплавах высокая. Наиболее часто золото микроскопических и ультрамикроскопических размеров образует сростки с пиритом и арсенидопиритом, реже – с кварцем.

Среднее значение содержания компонентов в исходной руде технологической пробы составило: Au – 4,5 г/т; Ag – 0,2 г/т; Fe<sub>общ</sub> – 7,7 %; S<sub>общ</sub> – 3,5 %; As – 0,33 %.

Технологическая схема обогащения включала: измельчение дробленой руды в шаровой мельнице, работающей в замкнутом цикле с высокочастотным виброгрохотом с сеткой ячейкой 0,2 мм; основную флотацию сульфидов и золота; контрольную операцию флотации с выделением флотационного концентрата и хвостов; классификацию флотационных хвостов в гидроциклоне, пески которого поступали в центробежный концентратор, а слив гидроциклона и хвосты концентратора являлись отвальными хвостами; вывод объединенного золотосульфидного концентрата, состоящего из флотационного и гравитационного концентратов.

Крупность питания флотации составляла 72–74 % класса –0,071 мм. Флотацию проводили в машинах механического типа 59А ФЛ, 60А ФЛ с камерами объемом 30, 12 л соответственно; гравитационное разделение – в центробежном концентраторе с периодической разгрузкой Falcon SB40.

Для флотации использовали следующие реагенты: медный купорос, бутиловый ксантогенат калия, DSP017 – смесь дитиофосфатов и тиокарбаматов компании Orica, сосновое масло Terpin 85, карбоксиметилцеллюлозу.

**Результаты испытаний и их обсуждение**

Технологические показатели, полученные при обогащении на опытно-промышленной установке малосульфидных платинометаллических руд Федорово-Панского интрузива при оптимизации крупности питания флотации, представлены в **табл. 1**.

Обогащаемые руды резко различались по соотношению благородных и цветных металлов  $\eta = [(Pt + Pd + Au), \text{г/т}]/[(Ni + Cu), \text{‰}]$  при близких значениях содержания цветных металлов, особенно никеля:  $\eta = 4,7$  в руде пробы № ФТ-08;  $\eta = 7,1$  в руде пробы № ФТ-07;  $\eta = 12,5$  в руде пробы № МП-2. В сульфидных благороднометаллических концентратах эти различия сохранились, но значения соотношения повысились:  $\eta = 5,5$  (проба № ФТ-08),  $\eta = 8,5$  (№ ФТ-07),  $\eta = 13,4$  (№ МП-2), что свидетельствует о более высокой концентрации благородных металлов по отношению к цветным.

В результате введения двух дополнительных перерешек концентрата основной флотации из труднообогатимых бедных руд пробы № ФТ-08 получен концентрат, близкий по содержанию цветных металлов к концентрату из более благоприятной руды пробы № ФТ-07 (**рис. 2**), но в связи с низким соотношением благородных и цветных металлов в руде – в целом более низкого качества.

Несмотря на эти различия, извлечение благородных металлов из всех руд близко – 80,2–82,5 %. Следует отметить, что поскольку доля палладия в суммарном количестве благородных металлов в руде составляет около 80 %, характеристики благороднометаллического концентрата большей частью определяются именно этим элементом.

Высокие потери никеля с хвостами при обогащении руд месторождения Федорова Тундра, представленных пробами № ФТ-07 и ФТ-08, в значительной степени обусловлены его входением не только в сульфидные минералы, но и изоморфно – в структуру силикатных минералов, в основном оливина.

При обогащении на опытно-промышленной установке малосульфидных платинометаллических руд месторождения Мончегорского плутона при оптимизации крупности питания основной флотации до 91,5–92 % класса –71 мкм, промпродуктовой флотации ~90 % класса –40 мкм получен общий сульфидный



**Рис. 2. Благороднометаллический сульфидный концентрат из малосульфидных руд месторождения Федорова Тундра**

благороднометаллический концентрат, содержащий 125,3 г/т суммарного количества благородных металлов при извлечении 88 % (**табл. 2**). При близких значениях содержания цветных металлов в концентрате из руды пробы № МП-2 данный концентрат значительно беднее по благородным металлам в связи с низким соотношением благородных и цветных металлов в руде – 6,3 против 12,5.

Результаты опытно-промышленных испытаний использованы в отчетах при подсчете запасов двух месторождений Федорово-Панского интрузива и одного месторождения Мончегорского плутона. По результатам опытных плавок, проведенных на одном из металлургических предприятий Кольского п-ва, установлена возможность их высокоэффективной металлургической переработки.

Позднее с учетом опубликованных работ [15–19] выполнены укрупненные сравнительные лабораторные исследования по совершенствованию разработанной флотационной технологии обогащения малосульфидных руд. По результатам исследований установлено, что оптимальные условия флотационного обогащения тонкодисперсных малосульфидных платинометаллических руд

**Таблица 1. Технологические показатели обогащения малосульфидных руд Федорово-Панского интрузива**

Продукты	Выход, %	Содержание компонентов						Извлечение, %						Примечание
		г/т				‰								
		Pt	Pd	Au	МПГ+Au	Ni	Cu	Pt	Pd	Au	МПГ+Au	Ni	Cu	
<i>Руда пробы № ФТ-07</i>														
Концентрат	0,97	21,90	106,70	7,04	135,60	5,40	10,63	81,10	83,27	77,50	82,59	52,43	83,22	4 перерешетки
Хвосты	99,03	0,05	0,21	0,02	0,28	0,048	0,021	18,90	16,73	22,50	17,41	47,57	16,78	
Исходная руда	100	0,26	1,24	0,09	1,59	0,10	0,124	100	100	100	100	100	100	
<i>Руда пробы № ФТ-08</i>														
Концентрат	1,10	10,50	51,90	3,56	65,96	5,00	7,01	80,11	82,79	69,96	81,55	55,27	83,86	6 перерешеток
Хвосты	98,90	0,05	0,12	0,02	0,19	0,045	0,015	19,89	17,21	30,04	18,45	44,73	16,14	
Исходная руда	100	0,14	0,69	0,06	0,89	0,10	0,09	100	100	100	100	100	100	
<i>Руда пробы № МП-2</i>														
Концентрат	0,97	32,80	231,00	9,98	273,78	7,14	13,35	85,88	80,06	68,94	80,24	65,41	83,19	4 перерешетки
Хвосты	99,03	0,06	0,64	0,05	0,75	0,042	0,030	14,12	19,94	31,06	19,76	34,59	16,81	
Исходная руда	100	0,42	3,17	0,16	3,75	0,12	0,18	100	100	100	100	100	100	



**Таблица 2. Технологические показатели обогащения малосульфидных руд Мончегорского плутона**

Продукты	Выход, %	Содержание компонентов						Извлечение, %					
		г/т				%							
		Pt	Pd	Au	МПГ+Au	Ni	Cu	Pt	Pd	Au	МПГ+Au	Ni	Cu
Концентрат	2,61	12,88	107,32	5,10	125,3	7,48	11,79	86,15	88,65	75,10	88,00	78,19	89,96
Хвосты	97,39	0,06	0,37	0,04	0,47	0,056	0,035	13,85	11,35	24,90	12,00	21,81	10,04
Исходная руда	100	0,39	3,16	0,16	3,71	0,25	0,34	100	100	100	100	100	100

**Таблица 3. Технологические показатели обогащения золотосодержащих руд Попутнинского месторождения**

Продукты	Выход, %	Содержание компонентов						Извлечение, %				
		г/т			%							
		Au	Ag	S <sub>общ</sub>	Fe <sub>общ</sub>	As	Au	Ag	S <sub>общ</sub>	Fe <sub>общ</sub>	As	
Концентрат золотосульфидный	13,39	32,26	0,94	25,79	24,72	2,34	95,96	61,66	97,55	42,98	94,27	
В том числе:												
флотационный	13,33	32,40	0,94	25,90	24,80	2,35	95,94	61,63	97,55	42,93	94,25	
гравитационный	0,06	1,68	0,10	0,36	7,30	0,11	0,02	0,03	0,01	0,06	0,02	
Хвосты отвальные	86,61	0,21	0,09	0,10	5,07	0,02	4,04	38,34	2,45	57,02	5,73	
Исходная руда	100	4,50	0,20	3,54	7,70	0,33	100	100	100	100	100	

Кольского п-ва, заключающиеся в тонком измельчении питания до 91–93 % класса –71 мкм, выборе продолжительности флотации, обеспечивающей максимальную ее эффективность, и смеси сульфгидрильных собирателей, селективной по отношению к благородным металлам, способствуют повышению извлечения суммарного количества благородных металлов на 1,8–7,8 % [20].

В мировой практике при обогащении благороднометалльных руд для повышения извлечения благородных металлов, помимо флотационного, реализуют гравитационное выделение концентратов ценных металлов, причем при разделении тонкодисперсных продуктов наиболее широко используют различные центробежные аппараты [10, 11, 21, 22].

В связи с наличием в малосульфидных рудах Кольского п-ва тонкодисперсных минералов платиновых металлов и интерметаллических соединений золота размером менее 20 мкм, которые недостаточно полно извлекаются флотацией, обоснована рациональность включения в технологическую схему их переработки гравитационного обогащения в центробежных концентраторах. Показано, что комбинированная гравитационно-флотационная технология обогащения тонкодисперсных малосульфидных руд при оптимальном размещении гравитационных аппаратов в цикле измельчения-классификации обеспечивает повышение извлечения суммарного количества платиновых металлов и золота на 2,5 %, а также снижение более чем на 20 % циркуляционной нагрузки в наиболее энергоемкой операции измельчения по сравнению с флотационной технологией.

Технологические показатели, полученные при обогащении на опытно-промышленной установке золотосодержащих руд Попутнинского месторождения, представлены в **табл. 3**.

В процессе испытаний установлено, что тонкодисперсные руды месторождения характеризуются высоким извлечением сульфидов и золота в концентрат по флотационной технологии.

Получен золотосульфидный концентрат, пригодный для

дальнейшей переработки. Извлечение и степень концентрации золота и сульфидов в концентрат приблизительно одинаковые – 96–97,6 и 7,2–7,3 % соответственно. Поскольку в руде пробы сульфаты (сульфасоли) практически отсутствуют, можно принять, что  $S_{общ} \approx S_{сул}$ . Потери золота связаны с его ультрамикроскопическими включениями в кварце.

Рассчитать ожидаемый экономический эффект от внедрения результатов исследований по разработке технологий обогащения малосульфидных благороднометалльных и золотосодержащих руд, приведенных в статье, в настоящее время не представляется возможным в связи с отсутствием действующих производств.

### Заключение

1. Действующая опытно-промышленная обогатительная установка Горного института, оснащенная дробильно-измельчительным оборудованием, флотационными, гравитационными, магнитными аппаратами, позволяет проводить в непрерывном режиме испытания разрабатываемых технологий переработки многих видов минерального сырья, в том числе благороднометалльного, с оптимизацией режимов обогащения в процессе испытаний и наработкой партий концентратов для дальнейшей переработки.

2. Из малосульфидных платинометалльных тонкодисперсных руд Кольского п-ва разного качества по флотационной технологии получены сульфидные благороднометалльные концентраты с извлечением суммарного количества благородных металлов 80,2–88 %, которые успешно прошли металлургические испытания.

3. Из руд золоторудного месторождения Попутнинское получен золотосульфидный концентрат, пригодный для дальнейшей переработки. Показано, что руды месторождения характеризуются высокими технологическими показателями по флотационной технологии обогащения как по качеству концентрата (32,3 г/т золота), так и по его извлечению (96 %).

Библиографический список

1. Митрофанов Ф. П., Баянова Т. Б., Корчагин А. У., Грошев Н. Ю., Малич К. Н. и др. Восточно-Скандинавская и Норильская плюмовые базитовые обширные изверженные провинции Pt-Pd руд: геологическое и металлогеническое сопоставление // Геология рудных месторождений. 2013. Т. 55. № 5. С. 357–373.
2. Беневольский Б. И., Блинова Е. В., Лобач В. И. Инвестиционная привлекательность резервного фонда месторождений цветных и благородных металлов // Руды и металлы. 2008. № 5. С. 5–9.
3. Субботин В. В., Корчагин А. У., Савченко Е. Э. Платинометаллическая минерализация Федорово-Панского рудного узла: типы оруденения, минеральный состав, особенности генезиса // Вестник Кольского научного центра РАН. 2012. № 1(8). С. 54–65.
4. Корчагин А. У., Гончаров Ю. В., Субботин В. В., Грошев Н. Ю., Габов Д. А. и др. Геология и вещественный состав руд малосульфидного платинометаллического месторождения Северный Каменник в Западно-Панском массиве, Кольский полуостров // Руды и металлы. 2016. № 1. С. 42–51.
5. Гроховская Т. Л., Лапина М. И., Мохов А. В. Ассоциации и генезис минералов платиновой группы в малосульфидных рудах месторождения Мончетундра (Кольский полуостров, Россия) // Геология рудных месторождений. 2009. Т. 51. № 6. С. 520–539.
6. Polovina J. S., Hudson D. M., Jones R. E. Petrographic and geochemical characteristics of postmagmatic hydrothermal alteration and mineralization in the J-M Reef, Stillwater Complex, Montana // The Canadian Mineralogist. 2004. Vol. 42. No. 2. P. 261–277.
7. Junge M., Wirth R., Oberthür T., Melcher F., Schreiber A. Mineralogical siting of platinum-group elements in pentlandite from the Bushveld Complex, South Africa // Mineralium Deposita. 2015. Vol. 50. Iss. 1. P. 41–54.
8. Oberthür T. The Fate of Platinum-Group Minerals in the Exogenic Environment – From Sulfide Ores via Oxidized Ores into Placers: Case Studies Bushveld Complex, South Africa, and Great Dyke, Zimbabwe // Minerals. 2018. Vol. 8. Iss. 12. DOI: 10.3390/min8120581
9. Благодатин Ю. В., Яценко А. А., Захаров Б. А., Чегодаев В. Д., Алексеева Л. И. Вовлечение в переработку новых сырьевых источников цветных и благородных металлов // Цветные металлы. 2003. № 8–9. С. 24–30.
10. Петров С. В., Алексеев И. А., Шелухина Ю. С. Технологическая минералогия металлов платиновой группы в месторождениях малосульфидного типа // Проблемы геологии и эксплуатации месторождений платиновых металлов: сб. науч. тр. Всероссийской конф. с междунар. участием. – СПб.: Изд-во СПбГУ, 2016. С. 160–167.
11. Петров С. В. О зависимости флотационного извлечения платиноидов от содержания металлов в руде // Обогащение руд. 2015. № 5. С. 14–19. DOI: 10.17580/or.2015.05.03
12. Song Z. G., Corin K. C., Wiese J. G., O'Connor C. T. Effect of different grinding media composition on the flotation of a PGM ore // Minerals Engineering. 2018. Vol. 124. P. 74–76.
13. O'Connor C., Wiese J., Corin K., McFadzean B. On the Management of Gangue Minerals in the Flotation of Platinum Group Minerals // Mining, Metallurgy & Exploration. 2019. Vol. 36. Iss. 1. P. 55–62.
14. Сердюк С. С., Кирилленко В. А. Геология и перспективы золотоносности южной части Южно-Енисейского рудного района // Журнал Сибирского федерального университета. Сер. Техника и технологии. 2013. Т. 6. № 8. С. 968–994.
15. Игнаткина В. А. Селективные реагентные режимы флотации сульфидов цветных и благородных металлов из упорных сульфидных руд // Цветные металлы. 2016. № 11. С. 27–33. DOI: 10.17580/tsm.2016.11.03
16. Лавриненко А. А., Саркисова Л. М., Глухова Н. И., Шрадер Э. А., Мошонкин С. А. Применение композиции сульфидрильных собирателей при флотации бедного медно-никелевого платинометаллического минерального сырья // ГИАБ. 2015. № 9. С. 80–87.
17. Чантурия В. А., Бочаров В. А. Современное состояние и основные направления развития технологии комплексной переработки минерального сырья цветных металлов // Цветные металлы. 2016. № 11. С. 11–18. DOI: 10.17580/tsm.2016.11.01
18. Corin K. C., Bezuidenhout J. C., O'Connor C. T. The role of dithiophosphate as a co-collector in the flotation of a platinum group mineral ore // Minerals Engineering. 2012. Vol. 36–38. P. 100–104.
19. Buckley A. N., Hope G. A., Parker G. K., Steyn J., Woods R. Mechanism of mixed dithiophosphate and mercaptobenzothiazole collectors for Cu sulfide ore minerals // Minerals Engineering. 2017. Vol. 109. P. 80–97.
20. Мухина Т. Н., Марчевская В. В. Совершенствование режима флотационного обогащения малосульфидных платинометаллических руд Кольского полуострова // Обогащение руд. 2018. № 4. С. 20–27. DOI: 10.17580/or.2018.04.05
21. Дьяченко В. Т., Манцевич М. И., Брюквин В. А., Цыбин О. И. Комбинированная технология переработки вкрапленных медно-никелевых руд // Цветные металлы. 2015. № 2. С. 25–28.
22. Kroll-Rabotin J.-S., Sanders R. S. Implementation of a model for Falcon separation units using continuous size-density distributions // Minerals Engineering. 2014. Vol. 62. P. 138–141. [DOI](#)

«GORNYI ZHURNAL», 2020, № 9, pp. 54–60  
DOI: 10.17580/gzh.2020.09.07

Studies and development of new technologies at pilot plant of the Mining Institute

Information about authors

T. N. Mukhina<sup>1</sup>, Head of Sector, Candidate of Engineering Sciences  
V. V. Marchevskaya<sup>1</sup>, Leading Researcher, Candidate of Engineering Sciences, vvm@goi.kolasc.net.ru  
V. I. Maksimov<sup>2</sup>, Head of Laboratory

<sup>1</sup>Mining Institute, Kola Science Center, Russian Academy of Sciences, Apatity, Russia

<sup>2</sup>Gipronickel Institute, Saint-Petersburg, Russia

Abstract

A running pilot concentration plant installed in the Mining Institute of the Kola Science Center, Russian Academy of Sciences is fitted with crushing, grinding, flotation, gravity and magnetic equipment, and allows continuous testing of technologies and trial batches of concentrates from mineral raw materials taken from mineral deposits in the Murmansk Region and from other regions in Russia.

The paper gives the results of pilot tests of the developed technologies for low-sulfide precious-metal ore beneficiation from three deposits of the Kola Peninsula, and for auriferous ore from the Eastern Siberia deposit. The tests were performed by technical staff team from the Mining Institute and Gipronickel Institute.

Flotation of different-quality low-sulfide platinum-metal finely dispersed ores of the Kola Peninsula produced sulfide precious metal concentrates with the precious metal recovery of 80.2–82.5% and 88.0%, respectively, for ores from the Fedorovo–Pana intrusion and Monchegorsk pluton deposits. Based on the results of experimental smelts at a metallurgical works of the Kola Peninsula, the authors have defined metallurgical processability of the concentrates, with high technical and economic indicators.

The pilot tests have produced a gold sulfide concentrate that meets the requirements of further processing. The concentrate was produced from gold-bearing ores of the Poputninskoe deposit (Krasnoyarsk district) by flotation. The finely dispersed ores of the deposit are characterized by high

technological indicators both in terms of the quality of the concentrate (32.3 g/t Au) and the recovery of gold and sulfides (96–97%).

**Keywords:** pilot concentration plant, ores from different Russia's regions, low-sulfide platinum-metal ores, auriferous ores, flotation, reagent regime, gravity concentration, concentrate, technological indices.

References

1. Mitrofanov F. P., Bayanova T. B., Korchagin A. U., Groshev N. Yu., Malich K. N. et al. East Scandinavian and Norilsk plume mafic large igneous provinces of Pd-Pt ores: geological and metallogenetic comparison. *Geology of Ore Deposits*. 2013. Vol. 55, No. 5. pp. 305–319.
2. Bonevoleskiy B. I., Blinova E. V., Lobach V. I. Investment attractiveness of surplus resources of nonferrous and noble metal deposits. *Rudy i metally*. 2008. No. 5. pp. 5–9.
3. Subbotin V. V., Korchagin A. U., Savchenko E. E. Platinum-bearing mineralization of the Fedorov-Pana ore node: ore types, mineral composition, genesis features. *Vestnik Kolskogo nauchnogo tsentra RAN*. 2012. No. 1(8). pp. 54–65.
4. Korchagin A. U., Goncharov Yu. V., Subbotin V. V., Groshev N. Yu., Gabov D. A. et al. Geology and constitution of low-sulfide platinum ore deposit Severnyy Kamennik in the West Pana Massif, Kola Peninsula. *Rudy i metally*. 2016. No. 1. pp. 42–51.
5. Grokhovskaya T. L., Lapina M. I., Mokhov A. V. Assemblages and genesis of platinum-group minerals in low-sulfide ores of the Monchetundra deposit, Kola peninsula, Russia. *Geology of Ore Deposits*. 2009. Vol. 51, No. 6. pp. 467–485.
6. Polovina J. S., Hudson D. M., Jones R. E. Petrographic and geochemical characteristics of postmagmatic hydrothermal alteration and mineralization in the J-M Reef, Stillwater Complex, Montana. *The Canadian Mineralogist*. 2004. Vol. 42, No. 2. pp. 261–277.
7. Junge M., Wirth R., Oberthür T., Melcher F., Schreiber A. Mineralogical siting of platinum-group elements in pentlandite from the Bushveld Complex, South Africa. *Mineralium Deposita*. 2015. Vol. 50, Iss. 1. pp. 41–54.
8. Oberthür T. The Fate of Platinum-Group Minerals in the Exogenic Environment – From Sulfide Ores via Oxidized Ores into Placers: Case Studies Bushveld Complex, South Africa, and Great Dyke, Zimbabwe. *Minerals*. 2018. Vol. 8, Iss. 12. DOI: 10.3390/min8120581

9. Blagodatn Yu. V., Yatsenko A. A., Zakharov B. A., Chegodaev V. D., Alekseeva L. I. Processing of nonferrous and noble metals from new sources. *Tsvetnye Metally*. 2003. No. 8-9. pp. 24–30.
10. Petrov S. V., Alekseev I. A., Shelukhina Yu. S. Applied mineralogy of PGM at low-sulfide deposit type. *Problems of geology and exploitation of platinum metal deposits : Proceedings of All-Russian conference with international participation*. Saint-Petersburg : Izdatelstvo SPGU, 2016. pp. 160–167.
11. Petrov S. V. Upon dependence of platinum-group metals flotation recovery on metals grade in ore. *Obogashchenie Rud*. 2015. No. 5. pp. 14–19. DOI: 10.17580/or.2015.05.03
12. Song Z. G., Corin K. C., Wiese J. G., O'Connor C. T. Effect of different grinding media composition on the flotation of a PGM ore. *Minerals Engineering*. 2018. Vol. 124. pp. 74–76.
13. O'Connor C., Wiese J., Corin K., McFadzean B. On the Management of Gangue Minerals in the Flotation of Platinum Group Minerals. *Mining, Metallurgy & Exploration*. 2019. Vol. 36, Iss. 1. pp. 55–62.
14. Serdyuk S. S., Kirilenko V. A. Geology and potential gold content in the south of the South Yenisei ore province. *Zhurnal Sibirskogo federalnogo universiteta. Ser. Tekhnika i tekhnologii*. 2013. Vol. 6, No. 8. pp. 968–994.
15. Ignatkina V. A. Selective reagent regimes of flotation of non-ferrous and noble metal sulfides from refractory sulfide ores. *Tsvetnye Metally*. 2016. No. 11. pp. 27–33. DOI: 10.17580/tsm.2016.11.03
16. Lavrinenko A. A., Sarkisova L. M., Glukhova N. I., Shrader E. A., Moshonkin S. A. Use of a composition sulfhydryl collectors in the flotation of poor pgm–copper–nickel raw materials. *GAB*. 2015. No. 9. pp. 80–87.
17. Chanturiya V. A., Bocharov V. A. Modern state and basic ways of technology development for complex processing of non-ferrous mineral raw materials. *Tsvetnye Metally*. 2016. No. 11. pp. 11–18. DOI: 10.17580/tsm.2016.11.01
18. Corin K. C., Bezuidenhout J. C., O'Connor C. T. The role of dithiophosphate as a co-collector in the flotation of a platinum group mineral ore. *Minerals Engineering*. 2012. Vol. 36-38. pp. 100–104.
19. Buckley A. N., Hope G. A., Parker G. K., Steyn J., Woods R. Mechanism of mixed dithiophosphate and mercaptobenzothiazole collectors for Cu sulfide ore minerals. *Minerals Engineering*. 2017. Vol. 109. pp. 80–97.
20. Mukhina T. N., Marchevskaya V. V. Improvement of the flotation regime for low-sulfide platinum-metal ores of the Kola Peninsula. *Obogashchenie Rud*. 2018. No. 4. pp. 20–27. DOI: 10.17580/or.2018.04.05
21. Dyachenko V. T., Mantsevich M. I., Bryukvin V. A., Tsybin O. I. Combined technology of processing of impregnated copper-nickel ores. *Tsvetnye Metally*. 2015. No. 2. pp. 25–28.
22. Kroll-Rabotin J.-S., Sanders R. S. Implementation of a model for Falcon separation units using continuous size–density distributions. *Minerals Engineering*. 2014. Vol. 62. pp. 138–141.

УДК 622.7

## ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВЕННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ РУДОПОТОКА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДОВ ПРЕДКОНЦЕНТРАЦИИ: ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА



**С. В. ТЕРЕЩЕНКО,**  
зав. лабораторией, д-р техн. наук,  
s.tereshchenko@ksc.ru



**Д. Н. ШИБАЕВА,**  
старший научный сотрудник, канд. техн. наук

Горный институт Кольского научного центра РАН, Апатиты, Россия

### Введение

Современное горное производство функционирует в сложных горно-геологических условиях, в результате чего на переработку поступает рудная масса, качество которой не всегда отвечает прогнозным данным. Поддерживать в таких условиях высокие технологические показатели процесса обогащения весьма затруднительно. Кроме того, подобная ситуация может приводить к росту негативного воздействия горного производства на окружающую среду за счет увеличения объемов измельченного материала

Сформулированы теоретические положения, обеспечивающие принятие обоснованного решения по использованию кусковой сепарации процесса предконцентрации в технологической цепи добычи и переработки полезных ископаемых. На базе результатов исследований по использованию процесса кусковой сепарации апатитсодержащих, железных, хромитовых и лопаритовых руд продемонстрирована возможность повышения качества рудопотока, направляемого на обогатительные фабрики, не менее чем в 1,3 раза за счет выделения не менее 20 % пустых и слабоминерализованных пород при сохранении высоких показателей извлечения полезных компонентов.

**Ключевые слова:** предконцентрация, кусковая сепарация, магнитные методы, гравитационные методы, радиометрические методы, модуль крупности, показатель контрастности, показатель наличия пустых пород.

DOI: 10.17580/gzh.2020.09.08

в хвостохранилищах, что противоречит основным положениям стратегии государства в области экологического развития Российской Федерации.

Таким образом, в существующих условиях возникает острая необходимость использования технологий добычи и переработки минерального сырья, создающих условия для эффективного и максимально полного извлечения полезных ископаемых из недр. При этом такие технологии должны соответствовать следующим требованиям: быть высокопроизводительными;