

# Разработка инновационных технологий обогащения полезных ископаемых Арктической зоны России

А.С. Опалев✉, В.В. Марчевская

Горный институт Кольского научного центра РАН, 184209, г. Апатиты, Российская Федерация

✉a.opalev@ksc.ru

**Резюме:** Действующая опытно-промышленная обогатительная установка Горного института Кольского научного центра Российской академии наук, оснащенная дробильно-измельчительным, флотационным, гравитационным, магнитным, радиометрическим оборудованием, обеспечивает проведение в непрерывном режиме испытаний технологий и наработку опытных партий концентратов из минерального сырья месторождений Арктической зоны и других регионов России. В статье приведены результаты опытно-промышленных испытаний разработанных технологий обогащения малосульфидных благороднометалльных руд двух месторождений из Федорово-Панского и Мончегорского интрузивов Кольского полуострова.

Из малосульфидных платинометалльных тонкодисперсных руд Кольского полуострова разного качества по флотационной технологии получены сульфидные благороднометалльные концентраты с извлечением суммы благородных металлов (Pt+Pd+Au) 82,6 и 88,0% соответственно для руд Федорово-Панского интрузива и Мончегорского плутона. По результатам опытных плавок, проведенных на одном из металлургических предприятий Кольского полуострова, установлена возможность металлургической переработки концентратов с высокими технико-экономическими показателями.

Усовершенствованная технологическая схема ресурсосберегающей комбинированной флотационно-гравитационной технологии обогащения комплексных малосульфидных платинометалльных руд с предварительным кусковым обогащением, разработанная в лабораторных условиях, способствует повышению извлечения благородных металлов в концентрат и снижению негативного воздействия хвостохранилищ на природную среду.

Приведены также результаты опытно-промышленных испытаний по повышению качества железорудных концентратов предприятий ПАО «Северсталь» (АО «Олкон» и АО «Карельский окатыш») с использованием магнитно-гравитационной сепарации и флотации, на основе которых была разработана и внедрена инновационная технология получения высококачественного железорудного сырья, пригодного для внедоменной металлургии.

**Ключевые слова:** опытно-промышленная обогатительная установка, руды Арктической зоны России, малосульфидные платинометалльные руды, железные руды, флотация, гравитационное обогащение, магнитно-гравитационная сепарация, предконцентрация, концентрат, технологические показатели

**Для цитирования:** Опалев А.С., Марчевская В.В. Разработка инновационных технологий обогащения полезных ископаемых Арктической зоны России. *Горная промышленность*. 2023;(1):63–70. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-1-63-70>

## Development of innovative technologies of ore mineral resources concentration from the Russian Arctic zone

A.S. Opalev✉, V.V. Marchevskaya

Mining Institute Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences, Apatity, Russian Federation

✉a.opalev@ksc.ru

**Abstract:** The running pilot processing plant of the Mining Institute KSC RAS is completed with crushing and grinding, flotation, gravity, magnetic, and radiometric equipment, and provides for continuous testing of technologies and production of pilot concentrate batches from mineral deposits occurred in the Arctic zone and other Russia's regions.

The article presents the results of pilot tests of the developed technologies low-sulfide precious metal ores concentration from two deposits from the Kola Peninsula (the Fedorovo-Pansky and Monchegorsky intrusive).

Sulfide precious metal concentrates with recovery of the sum of precious metals (Pt+Pd+Au) of 82,6% and 88,0% for ores of Fedorovo-Pansky intrusion and Monchegorsky pluton, respectively, were produced from low-sulfide platinum-metal finely-dispersed ores of different quality using the flotation technology. The results of pilot melts carried out at a metallurgical enterprise of the Kola Peninsula have established the potential of metallurgical processing of concentrates with high technical and economic indicators.

An improved technological flowsheet of a resource-saving combined flotation-gravity technology of complex low-sulfide platinum-metal ores concentration with preliminary lumpy dressing was developed in laboratory conditions and contributes to increasing the recovery of precious metals into concentrate and reducing the negative impact of tailings on the natural environment.

The article also demonstrates the results of pilot tests to improve the quality of iron ore concentrates at joint-stock company Severstal (Olkon and Karelsky Okatysh) using magnetic-gravity separation and flotation technologies which are a basis for development and implementation of an innovative technology aimed at producing high-quality iron ore raw materials suitable for nonblast-furnace metallurgy.

**Keywords:** pilot concentration plant, Russian Arctic zone ores, low-sulfide platinum-metal ores, iron ores, flotation, gravity concentration, magnetic-gravity separation, pre-concentration, concentrate, technological indices

**For citation:** Opalev A.S., Marchevskaya V.V. Development of innovative technologies of ore mineral resources concentration from the Russian Arctic zone. *Russian Mining Industry*. 2023;(1):63–70. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-1-63-70>

**Введение**

Опытно-промышленная обогатительная установка является одной из важнейших составляющих экспериментальной базы Горного института (рис. 1). Установка создана в середине 1970-х годов с целью оценки обогатимости минерального сырья в непрерывных условиях. Первоначально установка использовалась для оценки обогатимости апатит-нефелиновых руд текущей добычи и перспективных месторождений Хибинского массива. В том числе на установке были разработаны и испытаны технологии обогащения апатит-нефелиновых руд в условиях водооборота с получением апатитового и нефелинового концентратов, что способствовало переводу на режим оборотного водоснабжения обогатительных фабрик ПО «Апатит».



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

**Fig. 1**  
Overall view of the pilot concentration plant

В настоящее время в состав опытно-промышленной установки 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. Магнитные сепараторы представлены аппаратами для работы в слабом и высокоинтенсивном магнитном поле. Имеется двухручьевого рентгенофлуоресцентный сепаратор. Наличие данного оборудования позволяет значительно расширить круг обогащаемого минерального сырья.

Опытно-промышленная установка (ОПУ) обеспечивает апробацию разрабатываемых в институте обогатительных технологий, а также проведение испытаний технологий и наработку опытных партий концентратов руд многих месторождений арктической зоны и других регионов России совместно с ведущими отечественными научно-исследовательскими и специализированными организациями (АО «Механобр инжиниринг», ООО «Институт Гипроникель», АО «Кольская ГМК», АО «Апатит», АО «МХК «ЕвроХим», АО «Северо-Западная фосфорная компания», АО «Полиметалл» и др.).

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

Апробирована комбинированная гравитационно-флотационная технология обогащения малосульфидных благороднометаллических руд Федорово-Панского интрузивного комплекса и Мончегорского плутона (Кольский полуостров). Обоснована целесообразность включения крупнокусковой рентгенофлуоресцентной предконцентрации в технологическую схему их обогащения.

Установлена эффективность обогащения хромитовых руд месторождений «Сопчеозерское» (Кольский полуостров), «Центральное» (массива Рай-Из, Приполярный Урал), Аганозерское (Карелия) по гравитационной технологии.

Подтверждена возможность получения апатитового и нефелинового концентратов из апатит-нефелиновых руд текущей добычи месторождения «Олений Ручей» (Кольский полуостров).

Апробирована обогатимость титаномагнетит-ильменитовых руд рудопроявления Юго-Восточная Гремяха (Кольский полуостров) по магнитно-гравитационной технологической схеме. Обоснована целесообразность их крупнокусковой предконцентрации радиометрическими и гравитационными методами.

Оценена обогатимость апатит-магнетитовых руд глубоких горизонтов Ковдорского месторождения и отходов обогащения, складированных во втором поле хвостохранилища ОАО «Ковдорский ГОК» (Кольский полуостров).

Апробирована гравитационно-магнитно-электрическая технологическая схема обогащения гранатовых песков участка «Явр» (Кольский полуостров) с наработкой партий гранатовых концентратов для испытаний гидроабразивной резки, которые прошли успешно.

Установлена возможность получения высококачественной железорудной продукции с содержанием железа

общего более 70% путем флотационной доводки товарного концентрата АО «Карельский окатыш».

Проведены совместные опытно-промышленные испытания:

- обогатимости медно-никелевых руд месторождений Печенгского рудного поля (Кольский полуостров) по флотационной технологии с использованием нескольких технологических схем;
- обогатимости золотосульфидных руд месторождения «Майское» (Чукотский АО);
- обогатимости свинцово-цинковых руд Павловского месторождения (Новая Земля) с оценкой их крупнокусковой рентгенофлуоресцентной предконцентрации.

В настоящей статье представлены результаты испытаний технологий обогащения малосульфидных благороднометаллических руд и железных руд месторождений Арктической зоны России.

В Арктической зоне России сосредоточено около 19% мировых запасов металлов платиновой группы (МПГ), а доля запасов платины и палладия составляет более 99% от суммарных российских [1].

По экономическим оценкам отечественных и зарубежных специалистов, в XXI в. основное производство МПГ в России будет связано с добычей малосульфидных руд, ресурсы которых в Норильском районе оцениваются в тысячи тонн, в Кольском регионе – в сотни тонн [2–7].

В Кольском поясе интрузивных комплексов России преобладают малосульфидные платино-палладиевые месторождения, в т.ч. месторождения и рудопроявления Федорово-Панского интрузива (Федорова Тундра, Киевей, С. Каменник и др.), Мончегорского рудного района (Вурчуйвенч) и ряд других до конца не разведанных месторождений, в том числе рудопроявление Южносопчинское, расположенное в двух километрах от Вурчуйвенч [3; 8–11].

Федорово-Панский расслоенный интрузивный комплекс и Мончегорский плутон являются важнейшими рудными узлами Кольской платинометаллической провинции. Месторождения Федорово-Панского интрузива относятся к крупным и уникальным месторождениям МПГ, а по критерию внутренней нормы доходности – к инвестиционно привлекательным. Они представляют наибольший интерес при возможном создании на Северо-Западе России новой минерально-сырьевой базы добычи и переработки платиносодержащих руд и сохранении уровня производства платиновых металлов в России. При условии их ввода в эксплуатацию совместно с другими, более мелкими малосульфидными объектами Мончегорского рудного района, в XXI в. они смогут обеспечить не менее 20% от общероссийской добычи платиновых металлов [12; 13].

Поэтому, а также в связи с планируемым в 2027 г. запуском ГОКа по добыче и переработке платинометаллических руд Федорово-Панского интрузива актуальность научно-исследовательских работ с целью совершенствования технологии обогащения малосульфидных платинометаллических руд Кольского полуострова очевидна.

В настоящее время массовая доля железа общего в магнетитовых концентратах, выпускаемых на российских и зарубежных предприятиях, находится на уровне 66–68% при достаточно высокой массовой доле диоксида кремния [14; 15].

В последнее время требования к качеству железорудных

концентратов постоянно повышаются. Для удовлетворения спроса металлургии на высококачественные магнетитовые концентраты с содержанием железа общего 70% и диоксида кремния 2,5%, необходимые для прямого бездомного получения металла, в технологические схемы требуется вводить доводочные операции. Поэтому исследования, направленные на создание высокоэффективных и экологически сбалансированных технологий переработки железных руд, отвечающих современным требованиям, приобретают актуальное значение.

### Материалы и методы

Платинометаллическое оруденение Федорово-Панского и Мончегорского 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 [3; 8; 9; 13; 16–24].

На опытно-промышленной установке выполнены испытания обогатимости малосульфидных платинометаллических руд Федорово-Панского и Мончегорского интрузивов. В настоящей статье рассмотрены результаты испытаний на материале двух представительных технологических проб №MS-FT и №MS-M.

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 платинометаллических руд Федорово-Панского интрузива в полупромышленных условиях включала основную флотацию, четыре перечистки концентрата основной флотации, контрольную операцию флотации камерного продукта основной флотации.

Флотационная схема обогащения малосульфидных платинометаллических руд Мончегорского плутона включала основную сульфидную флотацию, две перечистки 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 перечистками и дофлотацией камерного продукта I контрольной перечистки с получением концентрата 2 и дополнительных отвальных хвостов.

Крупность питания флотации руд обеих проб составляла 91–92% класса –0,071 мм. Флотация проводилась в машинах механического типа 59А ФЛ, 60А ФЛ, 94Б ФЛ с объемом камер соответственно 30, 12, 3 л.

Испытания проводились с усовершенствованным реагентным режимом сульфидной флотации, отличающимся от традиционно применяемого тем, что помимо бутилового ксантогената калия, натриево-бутилового аэрофлота, медного купороса и карбоксиметилцеллюлозы в процессе флотации дополнительно подавался вспениватель

1 Платина: обзор рынков, спрос, предложение, прогнозы. URL: <http://ru-precious-met.livejournal.com> (дата обращения 03.10.2022).

модификатор марки DSF004 фирмы Orica Mining Chemicals.

Определение содержаний благородных металлов в исходных рудах технологических проб и продуктах их обогащения выполнялось пробирно (Pb)-атомно-абсорбционным методом по СТП 1402.151.0-96, СТП 14-02.151.0-96 (Pd, Pt, Au, Rh) и атомно-абсорбционным методом по СТП 1402.151.12-96 (Ag) в Региональном аналитическом центре ЗАО «Механобр инжиниринг аналит» (г. Санкт-Петербург).

Для апробации технологии флотационной доводки магнетитового концентрата текущего производства АО «Карельский окатыш» с целью удаления из него силикатов использовалась «обратная» катионная флотация магнетита с извлечением силикатсодержащих минералов в пенный продукт.

Флотация проводилась в машинах механического типа 59<sup>A</sup> ФЛ с объемом камер 30 л в щелочной среде при pH пульпы 10,3–10,5.

Для флотации силикатов использовали следующие реагенты: собиратель – Lilaflot 811-М (Akzo Nobel, Швеция); регулятор среды – NaOH, депрессор магнетита – щелочной крахмал.

**Результаты и обсуждение**

По данным минералого-технологических исследований основными минералами рудовмещающих пород исследованных проб являются амфиболы, плагиоклазы, хлориты, минералы группы цоизита-эпидота, слюды, кварц, кальцит. Пироксены присутствуют только в пробе руды месторождения «Федорова Тундра» Федорова-Панского интрузива №MS-FT, в руде пробы №MS-М месторождения Мончегорского плутона они полностью замещены амфиболами. В руде пробы №MS-FT имеются оливин и серпентины, а в руде пробы №MS-М – кальциевые алюмосиликаты.

Главными рудообразующими сульфидами руд проб являются минералы цветных металлов пентландит и халькопирит при преобладании второго, и пирротин, слагающие не менее 90–95% рудной минерализации, в рудах присутствует также пирит. Поскольку пентландит является концентратом не только никеля, но и около 50% палладия от общего баланса этого металла в руде, он является наиболее важным сульфидным минералом.

Из платиновых минералов в пробе №MS-FT наиболее распространенными являются висмутотеллуриды и сульфиды палладия и платины; арсениды платины и палладия

присутствуют в подчиненном количестве. В пробе №MS-М наоборот наиболее распространены арсениды палладия и платины, в меньшей степени – висмутотеллуриды палладия. Золото в рудах обеих проб присутствует в виде золото-серебряных сплавов с высокими вариациями элементов.

Содержания цветных и благородных металлов в пробах составляют:

- в пробе №MS-FT: Ni – 0,102%, Cu – 0,12%, Pt – 0,26 г/т, Pd – 1,24 г/т, Au – 0,09 г/т, ΣБМ - 1,59 г/т;
- в пробе №MS-М: Ni – 0,24%, Cu – 0,35%, Pt – 0,39 г/т, Pd – 3,14 г/т, Au – 0,18 г/т, ΣБМ – 3,71 г/т.

Технологические показатели, полученные при обогащении на опытно-промышленной установке малосульфидных платинометалльных руд Федорова-Панского и Мончегорского интрузивов, представлены в табл. 1.

Следует отметить, что высокие потери никеля с хвостами при обогащении руд Федорова-Панского интрузива, представленных пробой №MS-FT, в значительной степени обусловлены его вхождением не только в сульфидные, но изоморфно и в структуру силикатных минералов, в основном оливина.

При обогащении на опытно-промышленной установке малосульфидных платинометалльных руд месторождения Федорова Тундра при оптимизации крупности питания основной флотации 91–92% класса –71 мкм получен сульфидный благороднометалльный концентрат, содержащий 135,6 г/т суммы благородных металлов при извлечении 82,6%. Из малосульфидных платинометалльных руд месторождения Мончегорского плутона при оптимизации крупности питания основной флотации 91–92% класса –71 мкм, промпродуктовой флотации 90% класса –40 мкм получен общий сульфидный благороднометалльный концентрат, содержащий 125,3 г/т суммы благородных металлов при извлечении 88%. В благороднометалльном концентрате, полученном из руд месторождения Федорова Тундра, соотношение благородных и цветных металлов повысилось по сравнению с их отношением в руде в 1,2 раза в отличие от этих соотношений для руд месторождения Мончегорского плутона – 1,03. Вероятно, это связано с меньшей флотиремостью арсенидов палладия и платины (преобладают на месторождениях Мончегорского плутона) по сравнению с висмутотеллуридами палладия и платины (преобладают на месторождениях Федорова-Панской интрузии), что отмечено в работе [21].

По результатам опытных плавок, проведенных на одном

**Таблица 1**  
Технологические показатели обогащения малосульфидных благороднометалльных руд Кольского полуострова

**Table 1**  
Technological indices of the low-sulfide platinum-metal ores concentration from the Kola Peninsula

Наименование продуктов	Выход, %	Содержание компонентов						Извлечение, %					
		г/т				%		Pt	Pd	Au	МПГ+Au	Ni	Cu
		Pt	Pd	Au	МПГ+Au	Ni	Cu						
<b>Малосульфидные руды Федорова-Панского интрузива</b>													
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
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
<b>Малосульфидные руды Мончегорского плутона</b>													
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

из металлургических предприятий Кольского полуострова, установлена возможность высокоэффективной металлургической переработки полученных благороднометалльных концентратов.

В связи с приостановкой геологоразведочных работ на месторождениях малосульфидных руд и отсутствием достаточного количества материала проб для процессов непрерывного обогащения на ОПУ дальнейшие работы по совершенствованию разработанной флотационной технологии обогащения малосульфидных руд с учетом опубликованных работ [25–28] выполнены в лабораторных условиях на материале проб массой около 500 кг.

Показано, что для повышения извлечения благородных металлов и пентландита, являющегося концентратом никеля и палладия, необходимо создание расширенного фронта флотации. Повышение извлечения этих компонентов в концентрат обеспечивается также использованием собирательной смеси, состоящей из бутилового ксантогената калия и реагента Hostafлот M-91 – смеси дитиофосфата и меркаптобензотиазола компании «Clariant» или бутилового ксантогената калия совместно с реагентами Hostafлот M-91 и Aero8045 [29].

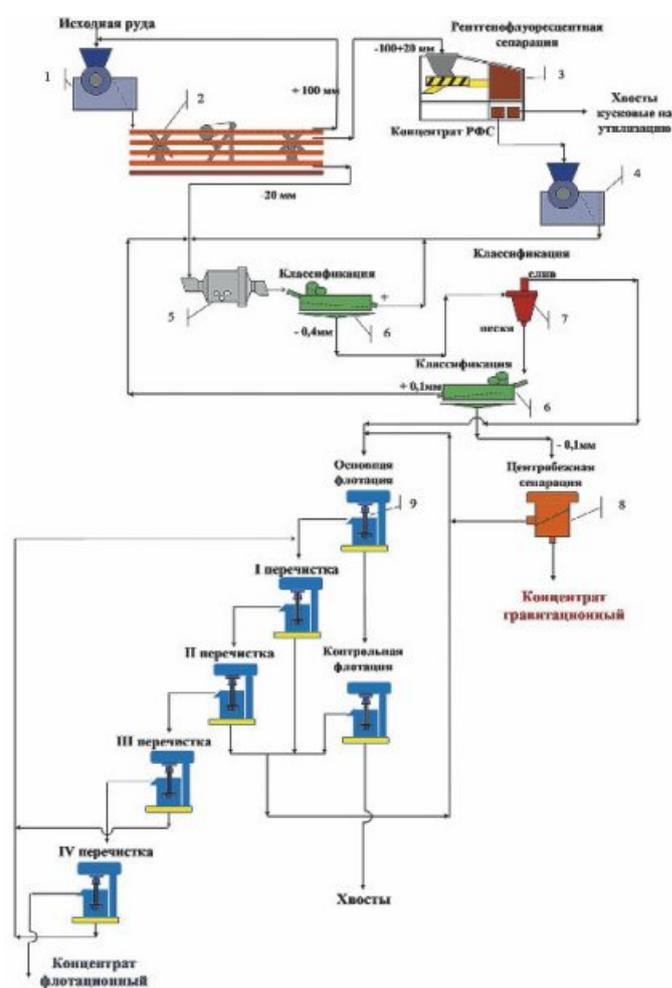
В мировой практике при обогащении благороднометалльных руд для повышения извлечения благородных металлов, помимо флотационного, реализуют гравитационное выделение концентратов ценных металлов, причем при разделении тонкодисперсных продуктов наиболее широко используются различные центробежные аппараты [21; 22; 30; 31].

В связи с наличием в малосульфидных рудах Кольского полуострова тонкодисперсных платинометалльных минералов и интерметаллических соединений золота [32], которые недостаточно полно извлекаются флотацией, в технологическую схему обогащения малосульфидных руд включена операция гравитационного разделения с использованием центробежного концентратора с периодической разгрузкой Falcon модели SB40, способного при высоком гравитационном поле извлекать ультратонкие частицы менее 10 мкм. Включение гравитационного разделения руд в цикл измельчения-классификации обеспечивает повышение извлечения из руд тонкодисперсных платинометалльных минералов и интерметаллических соединений, особенно платины и золота, а также снижение более чем на 20% циркуляционной нагрузки в наиболее энергоемкой операции измельчения по сравнению с флотационной технологией.

На основании результатов выполненных исследований обоснована целесообразность включения в схему крупнукусковой предконцентрации. Показано, что вывод из процессов глубокого обогащения 30–35% пустых пород в процессе предварительного обогащения обеспечивает повышение показателей флотационного обогащения, а также способствует снижению энергетических и других материальных затрат в дробильно-измельчительном и флотационном переделах, в хвостовом хозяйстве за счет снижения количества флотационных хвостов на 35–45%, продление срока эксплуатации хвостохранилищ на 55–75%, а следовательно, снижение воздействия хвостохранилищ с содержащимися в них тяжелыми металлами на природную среду, что имеет особенно большое значение в Арктической зоне, в которой территории горнопромышленного производства, связанные с добычей и переработкой цветных и благородных металлов, являются постоянным источником экологической угрозы [33].

Технологическая схема комбинированной технологии

обогащения комплексных малосульфидных платинометалльных руд включает: дробление руд до крупности минус 100 мм; рентгенофлуоресцентную сепарацию руд крупностью минус 100 плюс 20 мм; вывод отсортированных пустых пород, представленных в основном габброидами, на утилизацию; измельчение предварительно обогащенной руды, состоящей из кускового концентрата сепарации и рудного отсева минус 20 мм; вывод песков гидроциклона, их классификацию по сетке 0,1 мм, гравитационное обогащение песков крупностью минус 0,1 мм в центробежном концентраторе, вывод гравитационного концентрата; операции флотации продукта, состоящего из слива гидроциклона и гравитационных хвостов крупностью 90% класса минус 71 мкм: основную, контрольную и четыре перечистные концентрата основной флотации. Схема цепи аппаратов предлагаемой технологии обогащения приведена на рис. 2.



**Рис. 2**  
Схема цепи аппаратов комбинированной технологии обогащения малосульфидных платинометалльных руд:  
1 – щековая дробилка;  
2 – конвейер-грохот;  
3 – рентгенофлуоресцентный сепаратор; 4 – дробилка;  
5 – мельница шаровая;  
6 – грохот вибрационный;  
7 – гидроциклон;  
8 – центробежный сепаратор;  
9 – флотомшины

**Fig. 2**  
Equipment flowsheet of the low-sulfide platinum-metal ores beneficiating technology:  
1 – jaw crusher;  
2 – conveyor-screen;  
3 – X-ray fluorescence separator; 4 – crusher;  
5 – ball mill;  
6 – vibrating screen;  
7 – hydrocyclone;  
8 – centrifugal separator;  
9 – mechanical flotation machines



**Рис. 3**  
Магнитно-гравитационные сепараторы МГС-2.0 на АО «Карельский Окамыш»

**Fig. 3**  
Magnetic-gravity separators MGS-2.0 at joint-stock company “Karelsky Okatysh”

При флотационной доводке магнетитового концентрата АО «Карельский окамыш», содержащего 68,3% железа общего, 5,0% кремнезема, получен высококачественный магнетитовый концентрат, содержащий 70,7% Feобщ, 1,6% SiO<sub>2</sub>. При этом потери железа общего с хвостами – силикат-содержащим продуктом составили 11,3%.

Поскольку в последнее время при разработке технологий важное значение имеют экологические критерии, в Горном институте на опытном образце сепаратора разработана экологически сбалансированная технология магнитно-гравитационной доводки магнетитовых концентратов, получаемых на предприятиях Арктической зоны России – АО «Олкон» (Кольский полуостров) и АО «Карельский окамыш».

По результатам дальнейших исследований и испытаний полупромышленного образца магнитно-гравитационного сепаратора в промышленных условиях для переработки железистых кварцитов Арктической зоны России специалистами Горного института была разработана инновационная технология получения железорудных концентратов с содержанием железа общего не менее 69,5–70,5% и SiO<sub>2</sub> не более 2,5–3,0%, пригодных для внедоменных металлургических процессов [15]. В настоящее время разработанная технология, базирующаяся на принципе стадийного вывода готового концентрата, успешно внедрена на АО «Олкон»,

при этом достигнуто не только повышение качества магнетитового концентрата до уровня, пригодного для процессов металлизации, но и снижены потери железа на 4–5% и энергозатраты до 25–30%. На АО «Карельский окамыш» внедрены 48 магнитно-гравитационных сепараторов, обеспечивающих получение высококачественных концентратов из любого типа руд, перерабатываемых на предприятии (рис. 3).

**Заключение**

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

2. На опытно-промышленной установке из тонкодисперсных малосульфидных платинометалльных руд Кольского полуострова разного качества по флотационной технологии получены сульфидные благороднометалльные концентраты с извлечением суммы благородных металлов 82,6–88,0%, которые успешно прошли металлургические испытания.

3. В лабораторных условиях разработана усовершенствованная технологическая схема ресурсосберегающей комбинированной флотационно-гравитационной технологии обогащения малосульфидных платинометалльных руд с предварительным обогащением на рентгенофлуоресцентном сепараторе, позволяющая повысить извлечение благородных металлов в концентрат и снизить негативное воздействие хвостохранилищ с содержащимися в них тяжелыми металлами на природную среду.

4. На основании результатов опытно-промышленных испытаний по повышению качества железорудных концентратов, производимых из железных руд Арктической зоны России, разработана и успешно реализована на предприятиях ПАО «Северсталь» (АО «Олкон» и АО «Карельский окамыш») инновационная технология получения высококачественной железорудной продукции с массовой долей железа общего не менее 69,5–70,5%, пригодной для процессов внедоменной металлургии.

**Список литературы**

1. Мельников Н.Н. Роль Арктики в инновационном развитии экономики России. *Горный журнал*. 2015;(7):23–27. <https://doi.org/10.17580/gzh.2015.07.04>
2. Лаверов Н.П., Дистлер В.В. Потенциальные ресурсы месторождений платиновых металлов в контексте стратегических национальных интересов России. *Геология рудных месторождений*. 2003;45(4):291–304.
3. Митрофанов Ф.П., Баянова Т.Б., Корчагин А.У., Грошев Н.Ю., Малич К.Н., Жиров Д.В., Митрофанов А.Ф. Восточно-Скандинавская и Норильская плюмовые базитовые обширные изверженные провинции Pt-Pd руд: геологическое и металлогеническое сопоставление. *Геология рудных месторождений*. 2013;55(5):357–373. <https://doi.org/10.7868/S0016777013050067>
4. Беневольский Б.И., Мызенкова Л.Ф., Августинчик И.А. Минерально-сырьевая база благородных металлов – ретроспектива и прогноз. *Руды и металлы*. 2007;(3):25–31.
5. Козловский Е.А. Минерально-сырьевые ресурсы в экономике мира и России. *Горный журнал*. 2015;(7):47–53. <https://doi.org/10.17580/gzh.2015.07.07>
6. Наталенко А.Е., Пак В.А., Савский А.П. Основные направления развития минерально-сырьевой базы Российской Федерации. *Минеральные ресурсы России. Экономика и управление*. 2015;(1):2–8.
7. Митрофанов Ф.П., Жиров Д.В., Баянова Т.Б. Комплексные прогнозно-поисковые критерии главной металлогенической специализации (малосульфидной Pt-Pd или сульфидной Cu-Ni) раннепротерозойских базит-гипербазитовых расслоенных массивов кристаллических щитов. *Вестник Кольского научного центра РАН*. 2012;(1):7–13.
8. Субботин В.В., Корчагин А.У., Савченко Е.Э. Платинометалльная минерализация Федорово-Панского рудного узла: типы оруденения, минеральный состав, особенности генезиса. *Вестник Кольского научного центра РАН*. 2012;(1):55–66.
9. Корчагин А.У., Гончаров Ю.В., Субботин В.В., Грошев Н.Ю., Габов Д.А., Иванов А.Н., Савченко Е.Э. Геология и вещественный состав руд малосульфидного платинометалльного месторождения Северный Каменник в Западно-Панском массиве, Кольский полуостров. *Руды и металлы*. 2016;(1):42–51.

10. Гроховская Т.Л., Бакаев В.Ф., Шелепина Е.П., Лапина М.И., Лапутина И.П., Муравицкая Г.Н. Платинометалльная минерализация в габброноритах массива Вуручайвенч, Мончегорский плутон (Кольский полуостров, Россия). *Геология рудных месторождений*. 2000;42(2):147–161.
11. Гроховская Т.Л., Иванченко В.Н., Каримова О.В. Геологическое строение, минералогия и генезис ЭПГ-минерализации массива Южная Сопча, Мончегорский комплекс, Россия. *Геология рудных месторождений*. 2012;54(5):416–440.
12. Додин Д.А. *Устойчивое развитие Арктики. Проблемы и перспективы*. СПб.: Наука; 2005. 279 с.
13. Беневольский Б.И., Блинова Е.В., Лобач В.И. Инвестиционная привлекательность резервного фонда месторождений цветных и благородных металлов. *Руды и металлы*. 2008;(5):5–9.
14. Гзогян Т.Н. Теоретические и экспериментальные исследования получения высококачественных концентратов. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2010;(4):389–394.
15. Опалев А.С., Хохуля М.С., Фомин А.В., Карпов И.В. Создание инновационных технологий производства высококачественного железорудного концентрата на предприятиях Северо-Запада России. *Горный журнал*. 2019;(6):56–61. <https://doi.org/10.17580/gzh.2019.06.07>
16. 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;51(6):520–539.
17. 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. *Canadian Mineralogist*. 2004;42(2):261–277. <https://doi.org/10.2113/gscanmin.42.2.261>
18. 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;50(1):41–54. <https://doi.org/10.1007/s00126-014-0561-0>
19. 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;8(12):581–609. <https://doi.org/10.3390/min8120581>
20. 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):24–30.
21. Петров С.В., Алексеев И.А., Шелухина Ю.С. Технологическая минералогия металлов платиновой группы в месторождениях малосульфидного типа. В кн.: *Проблемы геологии и эксплуатации месторождений платиновых металлов: сб. науч. тр. Всерос. конф. с междунар. участием, г. Санкт-Петербург, 25 мая 2016 г.* СПб.: Изд-во СПбГУ; 2016. С. 160–167.
22. Петров С.В. О зависимости флотационного извлечения платиноидов от содержания металлов в руде. *Обогащение руд*. 2015;(5):14–19. <https://doi.org/10.17580/or.2015.05.03>
23. 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;124:74–76. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2018.05.014>
24. 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;36(1):55–62. <https://doi.org/10.1007/s42461-018-0026-6>
25. Игнаткина В.А. Селективные реагентные режимы флотации сульфидов цветных и благородных металлов из упорных сульфидных руд. *Цветные металлы*. 2016;(11):27–33. <https://doi.org/10.17580/tsm.2016.11.03>
26. Лавриненко А.А., Саркисова Л.М., Глухова Н.И., Шрадер Э.А., Мошонкин С.А. Применение композиций сульфидрильных собирателей при флотации бедного медно-никелевого платинометалльного минерального сырья. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2015;(9):80–87.
27. 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;36–38:100–104. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2012.02.019>
28. 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;109:80–97. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2017.03.002>
29. Мухина Т.Н., Марчевская В.В. Совершенствование режима флотационного обогащения малосульфидных платинометалльных руд Кольского полуострова. *Обогащение руд*. 2018;(4):20–27. <https://doi.org/10.17580/or.2018.04.05>
30. Дьяченко В.Т., Манцевич М.И., Брюквин В.А., Цыбин О.И. Комбинированная технология переработки вкрапленных медно-никелевых руд. *Цветные металлы*. 2015;(2):25–28. Режим доступа: <https://www.rudmet.ru/journal/1394/article/23945/>
31. Kroll-Rabotin J.-S., Sanders S.R. Implementation of a model for Falcon separation units using continuous size-density distributions. *Minerals Engineering*. 2014;62:138–141. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2014.01.015>
32. Марчевская В.В., Мухина Т.Н., Хашковская Т.Н. Распределение ценных металлов в измельченных малосульфидных платинометалльных рудах Кольского полуострова. *Известия высших учебных заведений. Горный журнал*. 2018;(2):105–112. <https://doi.org/10.21440/0536-1028-2018-2-105-112>
33. Соколов Ю.И. Арктика: к проблеме накопленного экологического ущерба. *Арктика: экология и экономика*. 2013;(2):18–27.

## References

1. Melnikov N.N. Role of the Arctic Region in the innovation-driven economic development of Russia. *Gornyi Zhurnal*. 2015;(7):23–27. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/gzh.2015.07.04>
2. Laverov N.P., Distler V.V. Potential resources of PGM deposits in the context of Russian national strategic interests. *Geology of Ore Deposits*. 2003;45(4):255–264.
3. Mitrofanov F.P., Bayanova T.B., Korchagin A.U., Groshev N.Y., Zhirov D.V., Malitch K.N., Mitrofanov A.F. East Scandinavian and Noril'sk plume mafic large igneous provinces of Pd-Pt ores: geological and metallogenic comparison. *Geology of Ore Deposits*. 2013;55(5):305–319. <https://doi.org/10.1134/S107570151305005X>
4. Benevol'sky B.I., Myzenkova L.F., Avgustinszyk I.A. Mineral base of precious metals: A retrospective and future views. *Ores and Metals*. 2007;(3):25–31. (In Russ.)
5. Kozlovsky E.A. Natural resources in the economy of Russia and in the world. *Gornyi Zhurnal*. 2015;(7):47–53. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/gzh.2015.07.07>
6. Natalenko A.E., Pak V.A., Stavsky A.P. Main trends in the development of the mineral resource base in the Russian Federation. *Mineral Resources of Russia. Economics and Management*. 2015;(1):2–8. (In Russ.)
7. Mitrofanov F.P., Zhirov D.V., Bayanova T.B. Complex forecasting and prospecting criteria of the main metallogenic specialization (low-sulfide Pt-Pd or sulfide Cu-Ni) for the early proterozoic basic-hyperbasic layered massifs of crystalline shields. *Vestnik Kolskogo nauchnogo tsentra RAN*. 2012;(1):7–13. (In Russ.)
8. 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;(1):55–66. (In Russ.)

9. Korchagin A.U., Goncharov Yu.V., Subbotin V.V., Groshev N.Yu., Gabov D.A., Ivanov A.N., Savchenko Ye.E. Geology and ores composition of the North Kamennik low-sulfide PGE deposit in the West-Pansky massif, Kola peninsula. *Ores and Metals*. 2016;(1):42–51. (In Russ.)
10. Grokhovskaya T.L., Bakaev V.F., Shelepina E.P., Lapina M.I., Laputina I.P., Muravitskaya G.N. Platinum-metal mineralization in gabbro-norites of the Vuruchuaivench intrusion, Monchegorsk pluton (Kola Peninsula, Russia). *Geologiya rudnykh mestorozhdenij*. 2000;42(2):147–161. (In Russ.)
11. Grokhovskaya T.L., Karimova O.V., Griboedova I.G., Samoshnikova L.A., Ivanchenko V.N. Geology, mineralogy, and genesis of pge mineralization in the South Sopcha massif, Monchegorsk complex, Russia. *Geology of Ore Deposits*. 2012;54(5):347–369. <https://doi.org/10.1134/S1075701512050029>
12. Dodin D.A. *Sustainable development of the Arctic. Problems and prospects*. St. Petersburg: Nauka; 2005. 279 p. (In Russ.)
13. Benevolsky B.I., Blinova E.V., Lobach V.I. The reserve fund of base and precious metal ore deposits: Attractiveness for investors. *Ores and Metals*. 2008;(5):5–9. (In Russ.)
14. Gzogyan T.N. Theoretical and experimental research of high-quality concentrate production. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2010;(4):389–394. (In Russ.)
15. Opalev A.S., Khokhulya M.S., Fomin A.V., Karpov I.V. Creation of innovative technologies for production of high-quality iron concentrate production in the North West of Russia. *Gornyi Zhurnal*. 2019;(6):56–61. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/gzh.2019.06.07>
16. 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;51(6):467–485. <https://doi.org/10.1134/S107570150906004X>
17. 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. *Canadian Mineralogist*. 2004;42(2):261–277. <https://doi.org/10.2113/gscanmin.42.2.261>
18. 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;50(1):41–54. <https://doi.org/10.1007/s00126-014-0561-0>
19. 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;8(12):581–609. <https://doi.org/10.3390/min8120581>
20. Blagodatin Yu.V., Yatsenko A.A., Zakharov B.A., Chegodaev V.D., Alekseeva L.I. Involvement in processing of non-ferrous and precious metals new raw materials sources. *Tsvetnye Metally*. 2003;(8-9):24–30. (In Russ.)
21. Petrov S.V., Alekseev I.A., Schelukhin Yu.S. Technological mineralogy of PGE at low-sulfide kind deposits. In: *Problems of geology and exploitation of platinum metal deposits: Proceedings of All-Russian conference with international participation, St. Petersburg, 25 May 2016*. St. Petersburg: St. Petersburg State University; 2016, pp. 160–167. (In Russ.)
22. Petrov S.V. Upon dependence of platinum-group metals flotation recovery on metals grade in ore. *Obogashchenie Rud*. 2015;(5):14–19. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/or.2015.05.03>
23. 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;124:74–76. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2018.05.014>
24. 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;36(1):55–62. <https://doi.org/10.1007/s42461-018-0026-6>
25. Ignatkina V.A. Selective reagent regimes of flotation of non-ferrous and noble metal sulfides from refractory sulfide ores. *Tsvetnye Metally*. 2016;(11):27–33. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/tsm.2016.11.03>
26. Lavrinenko A.A., Sarkisova L.M., Gluhova N.I., Shrader E.A., Moshonkin S.A. Use of a composition sulphhydryl collectors in the flotation of poor pgmcopper-nickel raw materials. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2015;(9):80–87. (In Russ.)
27. 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;36–38:100–104. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2012.02.019>
28. 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;109:80–97. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2017.03.002>
29. Mukhina T.N., Marchevskaya V.V. Improvement of the flotation regime for low-sulfide platinum-metal ores of the Kola Peninsula. *Obogashchenie Rud*. 2018;(4):20–27. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/or.2018.04.05>
30. Dyachenko V.T., Mantsevich M.I., Bryukvin V.A., Tsybin O.I. Combined technology of processing of impregnated copper-nickel ores. *Tsvetnye Metally*. 2015;(2):25–28. (In Russ.) Available at: <https://www.rudmet.ru/journal/1394/article/23945/>
31. Kroll-Rabotin J.-S., Sanders S.R. Implementation of a model for Falcon separation units using continuous size-density distributions. *Minerals Engineering*. 2014;62:138–141. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2014.01.015>
32. Marchevskaia V.V., Mukhina T.N., Khashkovskaia T.N. The valuable metals distribution in grinded low-sulfide platinum-metal ores from the Kola peninsula. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal*. 2018;(2):105–112. (In Russ.) <https://doi.org/10.21440/0536-1028-2018-2-105-112>
33. Sokolov Yu.I. Arctic: Problem of the accumulated environmental damage. *Arctic: Ecology and Economy*. 2013;(2):18–27. (In Russ.)

**Информация об авторах**

**Опалев Александр Сергеевич** – кандидат технических наук, заместитель директора Горного института Кольского научного центра РАН, г. Апатиты, Российская Федерация; e-mail: a.opalev@ksc.ru  
**Марчевская Валентина Викторовна** – кандидат технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник Горного института Кольского научного центра РАН; г. Апатиты, Российская Федерация; e-mail: v.marchevskaya@ksc.ru

**Информация о статье**

Поступила в редакцию: 25.12.2022  
 Поступила после рецензирования: 12.01.2023  
 Принята к публикации: 16.01.2023

**Information about the authors**

**Aleksandr S. Opalev** – Cand. Sci. (Eng.), Deputy Director of Science, Apatity, Russian Federation; e-mail: a.opalev@ksc.ru  
**Valentina V. Marchevskaya** – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Leading Researcher, Apatity, Russian Federation; e-mail: v.marchevskaya@ksc.ru

**Article info**

Received: 25.12.2022  
 Revised: 12.01.2023  
 Accepted: 16.01.2023