

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ МАГНИТНОЙ СЕПАРАЦИИ ДЛЯ СОКРАЩЕНИЯ ВЫХОДА КОНЦЕНТРАТА ТЯЖЕЛОСРЕДНОЙ СЕПАРАЦИИ АЛМАЗОСОДЕРЖАЩИХ РОССЫПЕЙ НАКЫНСКОГО РУДНОГО ПОЛЯ

Ю.Н. Никитина¹, Г.П. Двойченкова^{2,3}, А.С. Тимофеев²

¹ Институт «Якутнипроалмаз» Акционерная компания «АЛРОСА» (ПАО), Мирный, Россия

² Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В. Мельникова РАН,
Москва, Россия, e-mail: Timofeev_ac@mail.ru

³ Политехнический институт (филиал) Северо-Восточного федерального университета
имени М.К. Аммосова, Мирный, Россия

Аннотация: В результате работы специалистов Мирнинско-Нюрбинского ГОКа с учетом данных технологического проектного регламента установлено, что в современных условиях эксплуатации выход гравитационного концентрата тяжелосредной сепарации алмазосодержащих россыпей с обогатительной фабрики № 15 на участок доводки обогатительной фабрики № 16 превышает допустимые значения в 2,5–3 раза. Приведены результаты сравнительной оценки возможных вариантов модернизации технологической схемы обогатительной фабрики № 15, выполненной специалистами института «Якутнипроалмаз». При этом в качестве «базового» варианта принята существующая схема, а в качестве альтернативных рассмотрены основные апробированные варианты ее модернизации: магнитная сепарация концентрата фабрики № 15; доводка концентратов фабрики № 15 с применением сушки, рентгенографического и рентгенолюминесцентного сепараторов; первичное обогащение исходного материала на универсальном высокопроизводительном сепараторе; первичное обогащение исходного материала на универсальном высокопроизводительном сепараторе с контролем хвостов в аналогичных сепараторах. На основании полученных результатов для снижения загрузки участка доводки фабрики № 16 рекомендован способ применения двухстадийной магнитной сепарации концентрата фабрики № 15, позволяющий: сократить в 3,5 раза его выход в схему фабрики № 16 за счет удаления более 70% из тяжелой фракции алмазосодержащих россыпей железосодержащих минералов; сохранить извлечение алмазов (96,64%) на уровне проектных значений (96,60%).

Ключевые слова: тяжелосредная сепарация, магнитная сепарация, концентрат, алмаз, россыпи, эффективность, технико-экономические расчеты, обогатительная фабрика.

Для цитирования: Никитина Ю. Н., Двойченкова Г. П., Тимофеев А. С. Оценка эффективности применения магнитной сепарации для сокращения выхода концентрата тяжелосредной сепарации алмазосодержащих россыпей Накынского рудного поля // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2026. – № 9. – С. 21–39. DOI: 10.25018/0236_1493_2026_9_0_21.

Efficiency of magnetic separation in reduction of concentrate yield after float-and-sink separation at the Nakyn diamond-bearing placers

Yu.N. Nikitina¹, G.P. Dvoichenkova^{2,3}, A.S. Timofeev²

¹ Yakutniiproalmaz Institute Joint Stock Company ALROSA
(Public Joint Stock Company), Mirny, Russia

² Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources
of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia, e-mail: Timofeev_ac@mail.ru

³ Polytechnic Institute (branch) of North-Eastern Federal University
named after M.K. Ammosov, Mirny, Russia

Abstract: As a result of work of specialists at the Mirny–Nyurba GOK with regard to data of the production procedure design, it is found that in the current operating conditions, the yield of the gravity concentrate after float-and-sink separation of diamond-bearing placer material sent from concentrating mill no. 15 to a refinement workshop at concentrating mill no. 16 exceeds the allowable values by 2.5–3 times. This study describes the comparative estimate of possible upgrading scenarios for the process flowsheet adopted at concentrating mill no. 15, implemented by specialists of the Yakutniiproalmaz Institute. The reference scenario was adopted as the current flowsheet, and the alternative scenarios were the tested upgraded processes: magnetic separation of the concentrate of mill no. 15, refinement of the concentrate of mill. no. 15 using drying, X-ray and X-ray luminescence separators; primary treatment of original material on a universal high-production separator with the control of tailings on analogous separators. Based on the obtained results, for the reduction of the load ratio at the refinement workshop of mill no. 16, two-stage magnetic separation is proposed for the concentrate of mill no. 15, which allows: the reduced intake of the concentrate at mill no. 16 by 3.5 times owing to removal of 70% of diamond-bearing material from the sink; the maintained recovery of diamonds (96.64%) at the design level (96,60%).

Key words: float-and-sink separation, magnetic separation, concentrate, diamond, placers, efficiency, technical–economic calculation, concentrating mill.

For citation: Nikitina Yu. N., Dvoichenkova G. P., Timofeev A. S. Efficiency of magnetic separation in reduction of concentrate yield after float-and-sink separation at the Nakyn diamond-bearing placers. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2026;(9):21-39. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2026_9_0_21.

Введение

Россыпные месторождения алмазов, сопутствующие коренным кимберлитовым трубкам, являются одним из основных дополнительных источников рудного сырья, поступающего в технологические схемы алмазоизвлекающих обогатительных фабрик (ОФ) АК «АЛРОСА». Кимберлитовый материал россыпных месторождений, как правило, характеризуется сложным вещественным составом, тяжелая фракция которого в большом количестве содержит минералы,

близкие по своим технологическим свойствам к алмазу [1].

Одним из примеров таких месторождений служат россыпи Накынского рудного поля, являющиеся составной частью кимберлитовых трубок Ботубинская и Нюрбинская, перерабатываемых в технологических схемах обогатительного комплекса Мирнинско-Нюрбинского ГОКа (МНГОКа), включающего алмазоизвлекающие фабрики № 15 и 16 [2, 3].

Предварительное обогащение алмазосодержащих россыпей осуществляет

ся в процессе тяжелосредной сепарации (ТСС), составляющей основу технологической схемы ОФ № 15, гравитационный концентрат которой поступает в общую схему переработки кимберлитовых руд на ОФ № 16 [3–5].

Таким образом, количество первичного гравитационного концентрата из технологической схемы ОФ № 15 и его качественные характеристики оказывают существенное влияние на стабильность и эффективность полного цикла переработки кимберлитовых руд на обогащательной фабрике № 16 [6].

Результатами исследований [7] установлено, что исходный рудный материал, поступающий в технологическую схему ОФ № 15 при переработке россыпей Накынского поля характеризуется высоким содержанием фракций с отличающимися от коренных кимберлитов гранулометрическим и минеральным составом, физико-механическими свойствами и, в первую очередь, повышенным выходом железосодержащих минералов с высокой плотностью: оксидов, гидроксидов и карбонатов железа, а также их сростков с силикатными и алюмосиликатными минералами.

В условиях переработки алмазосодержащего сырья коренных и россыпных месторождений Накынского рудного поля по общему технологическому тракту, включающему последовательность технологических операций, реализуемых от ОФ № 15 к ОФ № 16, установлено снижение качества при увеличении выхода гравитационного концентрата ОФ № 15 до значений, намного превышающих допустимые регламентные нагрузки цеха доводки ОФ № 16, что приводит к перегрузке оборудования и высоким потерям алмазов с хвостами технологических операций.

При этом вынужденное снижение нагрузки по исходному питанию приводит к ограничению исходной произ-

водительности ОФ № 15, а введение дополнительных производственных мощностей цеха доводки требует значительных капитальных затрат на модернизацию производства.

Результатами выполненных институтами «Якутнипроалмаз» АК «АЛРОСА» и ИПКОН РАН экспериментов установлена возможность решения данной проблемы применением магнитной сепарации (МС) первичного гравитационного концентрата ТСС в схеме ОФ № 15 МНГОКа, включение которой в схему позволило сократить его выход в 3–4 раза за счет выделения магнитных железосодержащих минералов [7].

Задачи настоящих исследований включали:

- обработку и анализ результатов испытаний технологии двухстадийной магнитной сепарации в схеме ТСС (ОФ № 15) алмазосодержащих россыпей Накынского рудного поля;
- сравнительный анализ полученных данных с имеющимися ранее полученными результатами экспериментальных исследований методов, альтернативных магнитной сепарации;
- оценку преимуществ разработанного способа применения двухстадийной магнитной сепарации для повышения качества и сокращения выхода черного гравитационного концентрата в условиях ОФ № 15 МНГОКа.

Актуальность поставленных задач обусловлена следующими факторами:

1. Опытом работы специалистов МНГОКа показано, что в современных условиях эксплуатации ОФ № 15 максимально допустимый выход концентрата ТСС крупностью $-6+1$ мм, направляемый на участок доводки ОФ № 16, не должен превышать 0,9 т/ч. Однако в настоящее время эта цифра составляет более 2,4 т/ч. При этом, согласно календарному плану обработки в алмазосодержащих россыпях Нюрбинского

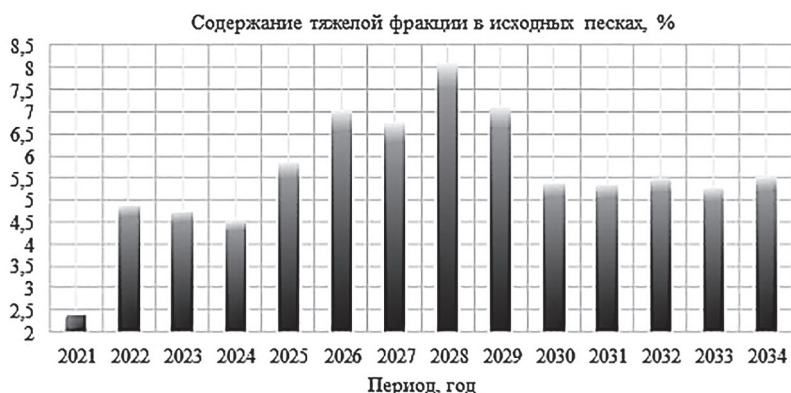


Рис. 1. Календарный план обработки алмазосодержащих россыпей Нюрбинского месторождения
Fig. 1. The calendar plan for processing diamond-bearing placers of the Nyurbinskoye deposit

рудного поля (на период по 2034 г.), ожидается увеличение выхода тяжелой фракции (рис. 1), что обуславливает необходимость поиска, обоснования и применения метода его сокращения.

2. Техничко-экономическое обоснование разработанного способа повышения качества и сокращения выхода черного гравитационного концентрата в условиях ОФ № 15 МНГОКа должно обеспечивать требуемые по регламенту значения производительности производственных процессов с минимальными затратами на их модернизацию и сохранением значений извлечения алмазных кристаллов по переделам обогащения, заложенных в технологическом регламенте института «Якутнипроалмаз».

Объекты, предметы и методы исследований

Кимберлитовые трубки Нюрбинская и Ботубинская, а также сопутствующие им россыпные месторождения в настоящее время являются основными поставщиками алмазосодержащего сырья на переработку в технологических схемах обогатительных фабрик № 15, 16. Доводка полученных алмазосодержащих промежуточных продуктов осуществляется на ОФ № 16 с использованием рентгенолюминесцентной (РЛС)

и липкостной (ЛС) сепараций (на участке УДиС ОФ № 16). Для повышения эффективности процессов доводочных операций в действующую схему ТСС ОФ № 15 МНГОКа предложено включить двухстадийную магнитную сепарацию черного гравитационного концентрата, промышленные испытания которой подтвердили возможность при ее использовании снижения выхода концентрата ТСС при практически полном исключении извлечения алмазных кристаллов в магнитные продукты [8].

С учетом приведенной информации с целью получения необходимых данных для сравнительного анализа технико-экономических показателей в качестве основных объектов исследований в данной работе приняты процессы базовой и опытной (с магнитной сепарацией) схем ТСС на ОФ № 15 МНГОКа, приведенных на рис. 2 и 3 соответственно.

Базовая схема (вариант 1) включает предварительную подготовку и обогащение алмазосодержащих песков методом ТСС с дальнейшей доводкой гравитационных концентратов по классу +6 методом РЛС, крупностью –6 мм методами РЛС и ЛС (см. рис. 2).

Опытная схема (вариант 2) включает предварительную подготовку и обога-

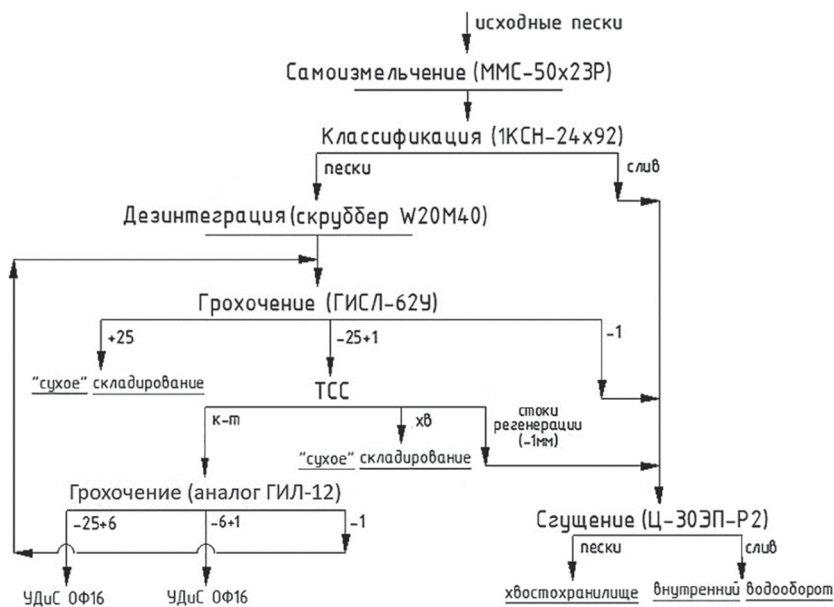


Рис. 2. Технологическая схема обработки алмазосодержащих россыпей на ОФ № 15 по базовому варианту

Fig. 2. Flow chart for processing diamond-bearing placers at processing plant No. 15 according to the basic option

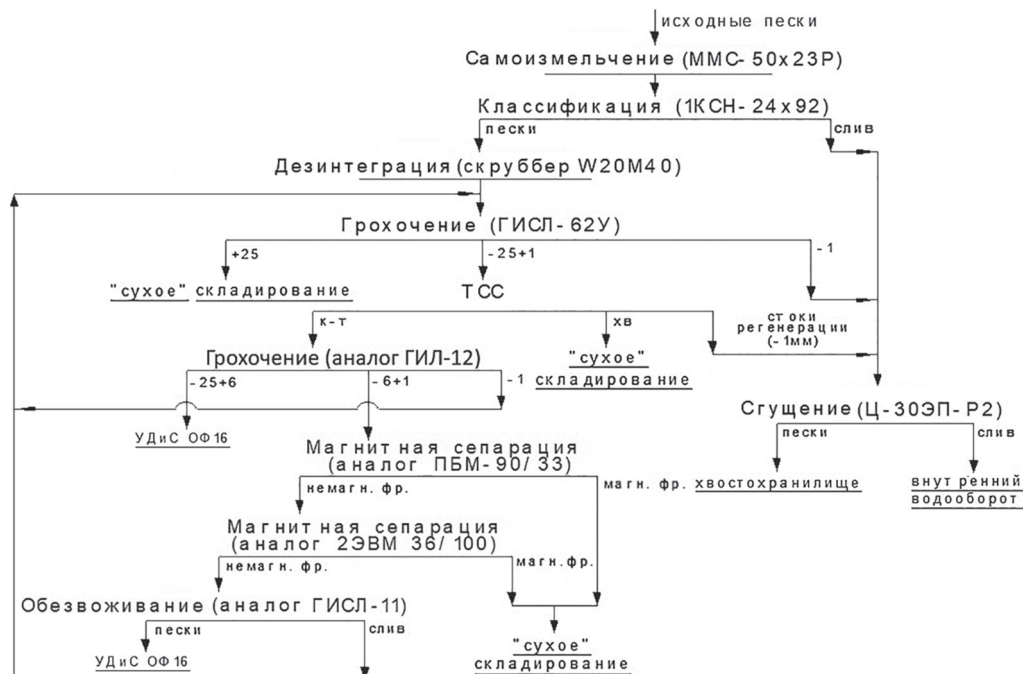


Рис. 3. Технологическая схема обработки алмазосодержащих россыпей на ОФ № 15 по опытному варианту

Fig. 3. Flow chart for processing diamond-bearing placers at processing plant No. 15 according to a pilot variant

шение алмазосодержащих песков методом ТСС с дальнейшей перечисткой гравитационного концентрата крупностью –6 мм на магнитных сепараторах в две стадии и доводкой немагнитной фракции магнитной сепарации методами РЛС и ЛС. Гравитационный концентрат класса +6 мм поступает на доводку методом РЛС (см. рис. 3).

В качестве предметов исследований изучены технологические и технико-экономические показатели рассматриваемых вариантов эксплуатации процесса ТСС в условиях переработки алмазосодержащих россыпей Нюрбинского месторождения.

Методика оценки эффективности применения магнитной сепарации для сокращения выхода концентрата тяжелой средней сепарации алмазосодержащих россыпей Накынского рудного поля заключалась в расчете и оценке экспериментальных данных опытных испытаний, анализе их технико-экономических показателей с аналогичными результатами, полученными при апробации альтернативных магнитной сепарации методов сокращения выхода гравитационного концентрата ТСС ОФ № 15 МНГОКа с последующей доводкой в схеме ОФ № 16 МНГОКа.

Промышленные испытания и обработка результатов, показывающих их

технологическую и технико-экономическую эффективность, выполнены согласно методикам, утвержденным соответствующими службами АК «АЛРОСА».

Результаты исследований

На первом этапе исследований выполнен анализ расчетных показателей опытной схемы межцикловой магнитной сепарации концентрата ТСС, включающей последовательные стадии сепарации в полях слабой (2000 Эрстед) и высокой (14000 Эрстед) напряженности (рис. 4), с учетом которых составлен перечень исходных данных для технико-экономической оценки исследуемых вариантов обогащения алмазосодержащих россыпей с подачей гравитационного концентрата ОФ № 15 в цех доводки ОФ № 16 МНГОКа.

Схема и алгоритм технологических испытаний включали четыре стадии.

Первая стадия предполагала выбор оптимальных режимов работы слабомагнитного сепаратора СТС-910, обеспечивающего наиболее полное удаление сильномагнитных минералов из алмазосодержащих концентратов ТСС в магнитную фракцию первой стадии сепарации [9, 10].

Вторая стадия включала выбор оптимальных режимов работы сильномагнитного сепаратора ЭВМ-28/9, обеспе-

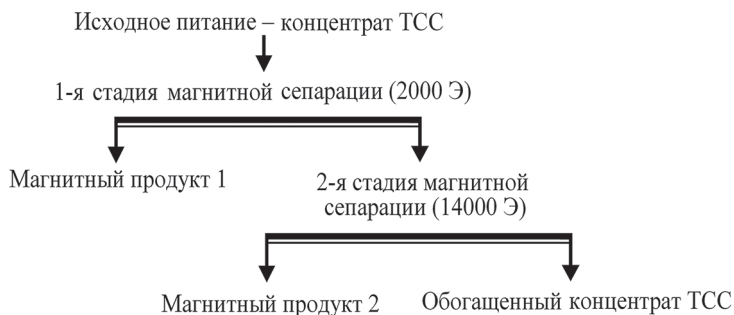


Рис. 4. Схема межцикловой двухстадийной магнитной сепарации алмазосодержащего концентрата ТСС на ОФ № 15 МНГОКа

Fig. 4. Scheme of inter-cycle two-stage magnetic separation of diamond-bearing concentrate (DMS) at processing plant No. 15 of MNGOK

чивающих максимальное удаление из алмазосодержащих концентратов ТСС слабомагнитных минералов в магнитную фракцию второй стадии сепарации [11, 12].

Третья стадия предусматривала проведение испытаний двухстадиальной схемы магнитной сепарации в условиях непрерывной работы последовательно установленных сепараторов СТС-910 и ЭВМ-28/9, обеспечивающих сокращение выхода и повышение качества алмазосодержащего концентрата ТСС за счет удаления сильномагнитных и слабомагнитных минералов при максимальном извлечении алмазов в немагнитную фракцию.

Четвертая стадия включала обработку и анализ полученных данных по извлечению и, соответственно, потерям алмазов с магнитными продуктами. По результатам измерений распределения алмазов по продуктам магнитной сепарации проводилась оценка эффективности разработанной технологии повышения качества и сокращения выхода концентрата ТСС схемы переработки алмазосодержащих россыпей, поступающего в схему участка доводки ОФ № 16 МНГОКа.

Результаты проведенных полупромышленных испытаний опытной схемы (вариант 2) показали возможность сокращения выхода концентрата ТСС до 73% за счет извлечения из него магнитных минералов и их сростков с немагнитными минералами. При этом:

1) для варианта базовой схемы (вариант 1) по переделу ТСС ОФ № 15 (согласно ЦТК МНГОКа) частное извлечение по классу +1 мм составило 99,1%;

2) для варианта опытной схемы (вариант 2), согласно данным испытаний магнитной сепарации по классу –6+1 мм:

- первая стадия магнитной сепарации: частное извлечение алмазов по классу –6+1 мм составило 100% при пол-

ном отсутствии немагнитной фракции в магнитном продукте;

- вторая стадия магнитной сепарации: частное извлечение алмазов по классу –6+1 мм составило 99,5% при минимальном содержании немагнитной фракции в магнитном продукте –6+3 и –3+1 мм, равном 0,08 и 0,07% соответственно.

Расчетами института «Якутнипроалмаз», выполненными по результатам опытных испытаний, проводившихся совместно с институтом ИПКОН РАН, установлено:

1) по варианту 1 при плановой исходной производительности ОФ № 15 выход концентрата ТСС крупностью –6+1 мм составляет 2,4 т/ч, что превышает максимально возможное значение данного показателя более чем в 3 раза. Данный факт требует для обеспечения плановой производительности ОФ № 15 и стабильной работы участка доводки ОФ № 16 проведения модернизации со значительными капитальными затратами либо ограничение исходной производительности ОФ № 15;

2) по варианту 2 применение двухстадиальной магнитной сепарации для перечистки гравитационного концентрата ТСС крупностью –6+1 мм способствует сокращению выхода данного продукта на участок доводки ОФ № 16 в 4 раза (с 2,4 до 0,6 т/ч);

3) извлечение алмазов крупностью +1 мм по варианту 1 (утвержденное значение согласно данным института «Якутнипроалмаз») составляет 95,60%;

4) извлечение алмазов крупностью +1 мм, согласно расчетам опытного варианта 2, выполненным институтом «Якутнипроалмаз», составило 96,64%.

В таблице приведены исходные данные для технико-экономических расчетов (ТЭР) по рассматриваемым вариантам, включающие, по данным института «Якутнипроалмаз», показатели расход-

**Сравнительные данные для технико-экономических расчетов
по исследуемым вариантам обогащения алмазосодержащих россыпей
Накынского месторождения (данные института «Якутнипроалмаз»)
Comparative data for technical and economic calculations
for the studied options for enrichment of diamond-bearing placers
of the Nakyn deposit (data from the Yakutnioproalmaz Institute)**

№ п/п	Показатель	Единицы измерения	Значения по вариантам	
			1 (базовый)	2 (опытный с магнитной сепарацией)
1	Годовая обработка по влажным пескам	тыс. т	570,0	570,0
2	Производительность: - с учетом коэффициента неравномерности (мах) - без учета коэффициента неравномерности	т/ч	170,0 150,0	170,0 150,0
3	Выход концентрата для транспортировки на ОФ № 16: - крупностью –25+6 мм - крупностью –6+1 мм	% от исходного	1,0 1,4	1,0 0,4
4	Выход хвостов «сухое» складирование: - надрешетный продукт +25 мм - хвосты ТСС –25+1 мм - магнитная фракция –6+1 мм	% от исходного	1,8 16,3 –	1,8 16,3 0,9
5	Выход «мокрых» хвостов (сгущенный продукт)	% от исходного	79,5	79,8
6	Расход воды на обогащение 1 т песков	м³	3,85	3,87
7	Расход ферросилиция	т/год	34,3	34,3
8	Расход компонентов для липкостной сепарации на ОФ № 16 при обработке концентратов ОФ № 15: - петролатум - октол - масло И-40	т/год	0,9 0,4 0,5	0,6 0,2 0,4
9	Извлечение алмазов	%	96,6*	96,64**
10	Основное дополнительное оборудование: - аналог ПБМ-90/33 - аналог 2ЭВМ-36/100 - аналог ГИЛ-11	шт. шт. шт.	– – –	1 1 1

* Утвержденный уровень сквозного извлечения для запасов россыпи Нюрбинская.
** Расчетный уровень сквозного извлечения.

ных материалов: ферросилиция на участке обогащения ОФ № 15 и компонентов жировой мази для передела липкостной сепарации на участке доводки ОФ № 16.

Полученные данные были переданы в специализированную лабораторию института «Якутнипроалмаз» для оценки технологической и технико-экономической эффективности исследуемых ме-

тодов обогащения алмазосодержащих россыпей в схемах ОФ № 15, 16 с использованием как способа магнитной сепарации (вариант 2), так и альтернативных ему способов сокращения выхода гравитационного концентрата ТСС с ОФ № 15 в цех доводки ОФ № 16.

На втором этапе исследований выполнена технико-экономическая оценка разработанного варианта 2 сокращения

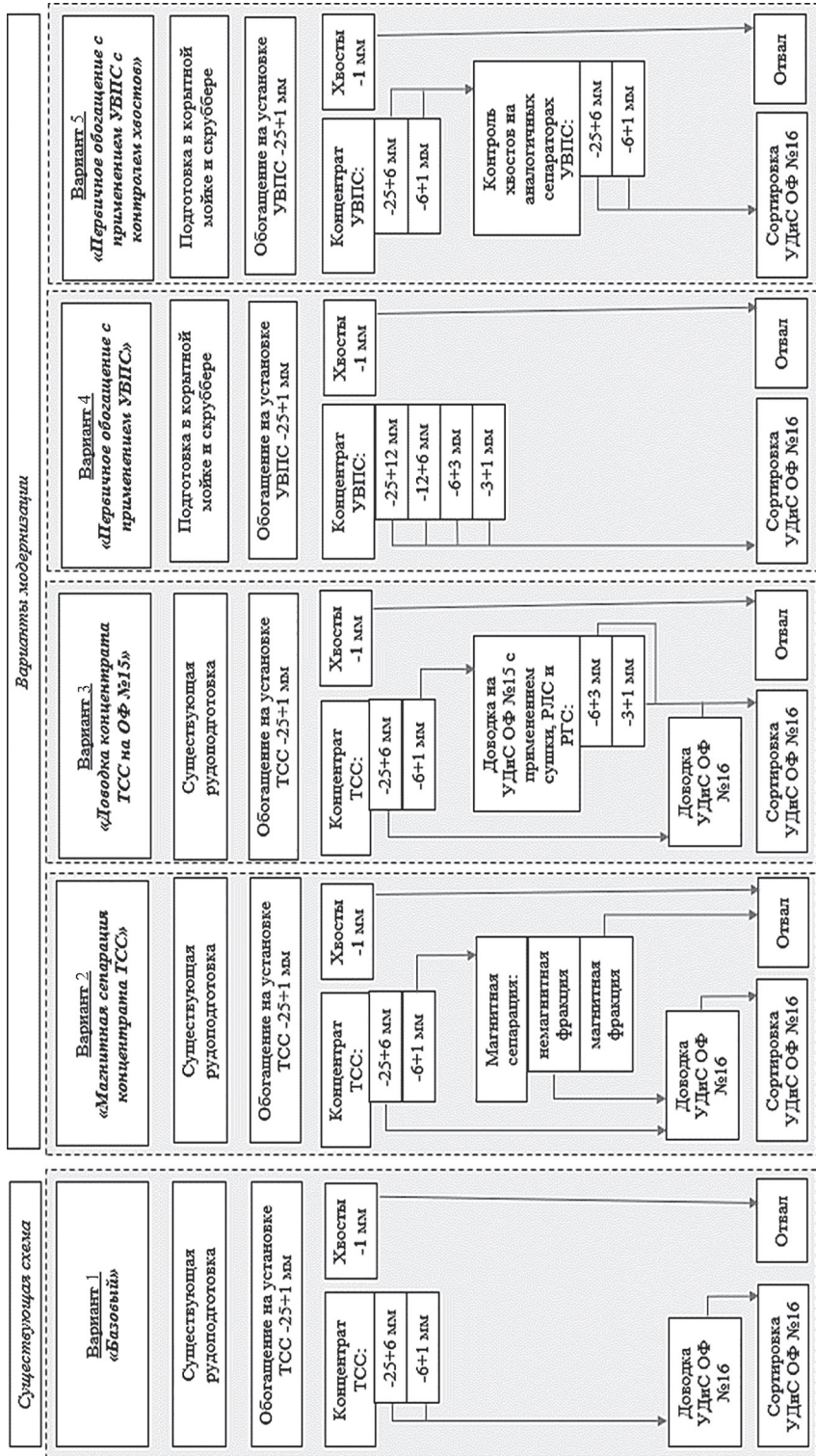


Рис. 5. Блок-схема вариантов сокращения выхода гравитационного концентрата ТСС технологической схемы ОФ №15
 Fig. 5. Block diagram of options for reducing the yield of gravity concentrate of the DMS process flow chart of processing plant No. 15

выхода концентрата ТСС в схеме ОФ № 15 МНГОКа в сравнении с базовым вариантом 1 и с вариантами альтернативных магнитной сепарации предложенных технических решений (варианты 3, 4, 5), приведенных в блок-схеме на рис. 5.

Вариант 1 – «базовый». Представлен действующей схемой, включающей подготовку исходных песков к обогащению, дальнейшее их обогащение на установке ТСС и доводку полученных концентратов ТСС крупностью +6 мм и –6 мм в схеме доводки ОФ № 16. Данный вариант приведен как базовый для сравнительного анализа технологических показателей.

Технологическая схема обработки исходных алмазосодержащих россыпей на ОФ № 15 по варианту 1 приведена выше на рис. 2.

По существующей схеме концентрат ТСС в количестве 4,1 т/ч после отмывки суспензии подается трубчатым питателем на вибрационный грохот ГЛИ-204, где рассеивается на классы крупности –25+6; –6+1 и –1 мм. Максимальная производительность грохота составляет 1 т/ч, т.е. количество подаваемого материала превышает допустимые нагрузки в 4 раза, что приводит к снижению эффективности грохочения и снижает уровень извлечения алмазов по схеме участка доводки ОФ № 16.

Технологическое извлечение алмазов по варианту 1 (ОФ № 15 + ОФ № 16), принятое институтом «Якутнипроалмаз» при оценке показателей – 97,01%.

Вариант 2 – «магнитная сепарация концентрата ТСС». Представлен опытной модернизированной действующей схемой, включающей существующую подготовку исходных песков к обогащению, дальнейшее их обогащение на установке ТСС, перемешивание концентрата ТСС крупностью –6 мм на магнитных сепараторах в две стадии и доводку

полученных концентратов ТСС крупностью +6 мм и немагнитной фракции магнитной сепарации крупностью –6 мм в схеме доводки ОФ № 16 [13].

Технологическая схема обработки исходных алмазосодержащих россыпей на ОФ № 15 по варианту 2 приведена выше на рис. 3.

Преимуществом применения магнитной сепарации на перемешивании концентрата ТСС крупностью –6+1 мм является существенное (более 70%) сокращение выхода концентрата ТСС.

Реализация технологической схемы ОФ № 15 по варианту 2 требует (по данным института «Якутнипроалмаз») установки следующего дополнительного оборудования:

- магнитный сепаратор со слабым магнитным полем (аналог ПБМ-90/33);
- магнитный сепаратор с сильным магнитным полем (аналог 2ЭВМ-36/100);
- грохот для обезвоживания немагнитной фракции производительностью не менее 2 т/ч (аналог ГИЛ-11, установленного в базовой схеме).

Результатами промышленных испытаний, выполненных институтами «Якутнипроалмаз» и ИПКОН РАН, подтверждены расчетные параметры показателей:

- выход магнитного продукта 1-й стадии МС – 0,011% от операции;
- выход магнитного продукта 2-й стадии МС – 73,3% от операции;
- снижение выхода концентрата ТСС крупностью –6+1 мм на участок доводки и сортировки ОФ № 16 после двухстадийной магнитной сепарации более 70,0%;
- потери алмазов крупностью +1 мм с магнитным продуктом 1-й стадии МС не зафиксированы;
- потери алмазов крупностью +1 мм с магнитным продуктом 2-й стадии МС 0,5%;
- расчетный уровень сквозного извлечения алмазов составил 96,64%, что

выше утвержденного для запасов россыпи Нюрбинская — 96,6% (данные института «Якутнипроалмаз»).

Вариант 3 — «доводка концентрата ТСС на ОФ № 15». Представлен опытной схемой, включающей существующую подготовку исходных песков к обогащению, дальнейшее их обогащение на установке ТСС, доводку концентрата ТСС крупностью –6 мм с применением суши, РЛС и РГС отдельно по классам крупности: –6+3 мм и –3+1 мм — в схеме доводки, включенной в технологию ОФ № 15, и доводку полученных концентратов ТСС крупностью +6 мм и –6 мм в схеме доводки ОФ № 16.

Технологическая схема обработки исходных алмазосодержащих россыпей на ОФ № 15 по варианту 3 приведена на рис. 6. Технологическое извлечение алмазов по варианту 3 (ОФ № 15 + ОФ № 16), принятое институтом «Якутнипроалмаз» при оценке показателей, — 97,01%. Преимущество варианта 3 — снижение нагрузки на переделе суши и РЛС в схеме доводки ОФ № 16 путем исключения из обработки концентрата ТСС ОФ № 15 крупностью –6 мм.

Недостатки варианта (по данным института «Якутнипроалмаз»):

- высокие затраты на организацию участка доводки на ОФ № 15;

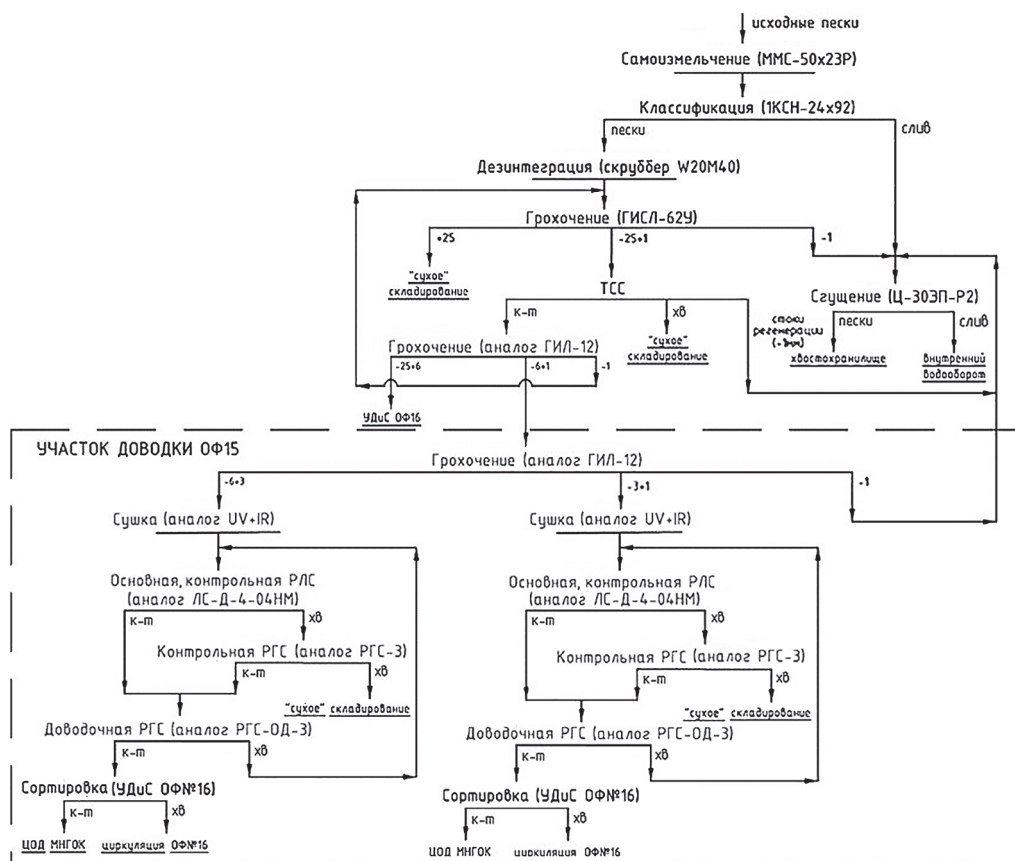


Рис. 6. Технологическая схема обработки алмазосодержащих россыпей на ОФ № 15 по опытному варианту 3

Fig. 6. Flow chart for processing diamond-bearing placers at processing plant No. 15 according to pilot variant 3

- необходимость применения гидро-транспорта при перекачке алмазосодержащего концентрата класса $-6+1$ мм, что может привести к повреждению крупных алмазов данного класса;

- отсутствие (на момент сравнительного анализа) данных по эффективности обогащения сепараторов РГС, извлечение (97,01%) принято в соответствии с требованиями к опытно-промышленному образцу, что не исключает возможности недостижения заявленных требований к новому оборудованию.

Для реализации технологической схемы ОФ № 15 по варианту 3 требуется (по данным института «Якутнипроалмаз») установка следующего оборудования:

- грохот для отсева концентрата ТСС на классы крупности $-6+3$ и $-3+1$ мм (аналог ГИЛ-12);
- инфракрасные сушилки для концентрата ТСС крупностью $-6+3$ и $-3+1$ мм (аналог UV+IR) [14];

- сепараторы РЛС (аналог ЛС-Д-4-04НМ);

- контрольные сепараторы РГС (аналог РГС-3);

- доводочные сепараторы РГС (аналог РГС-ОД-3) [15, 16].

В связи со значительным приростом электрических нагрузок необходима установка комплектной однострансформаторной подстанции 630 кВт.

Вариант 4 – «первичное обогащение с применением УВПС». (URL: <https://www.bouvestnik.ru/products/obogashchenie-almazov/universalnyy-vysokoproizvoditelnyy-separator-almazov-uvps/>). Представлен опытной схемой, применяющей первичное обогащение с использованием универсального высокопроизводительного сепаратора (УВПС), включающего предварительную промывку исходных россыпей в скруббере с последующим обогащением непосредственно в сепараторе УВПС раздельно по классам крупности:

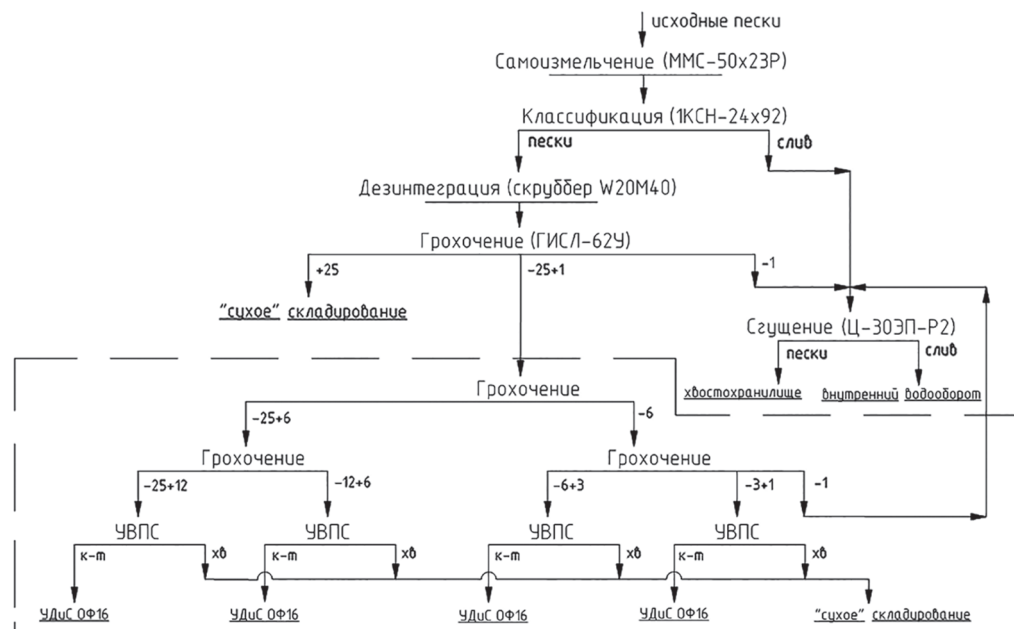


Рис. 7. Технологическая схема обработки алмазосодержащих россыпей на ОФ № 15 по опытному варианту 4

Fig. 7. Flow chart for processing diamond-bearing placers at processing plant No. 15 according to pilot variant 4

+12 мм; -12+6 мм; -6+3 мм и -3+1 мм в схеме ОФ № 15 и последующую их доводку в схеме ОФ № 16 [17–19].

Технологическое извлечение алмазов по варианту 4 (ОФ № 15 + ОФ № 16), принятое институтом «Якутнипроалмаз» при оценке показателей, — 97,09%. Технологическая схема обработки исходных алмазосодержащих россыпей на ОФ № 15 по варианту 4 приведена на рис. 7.

Преимущество варианта: снижение нагрузки на передел суши РЛС на участке доводки ОФ № 16 путем исключения из обработки концентратов ТСС ОФ № 15.

Недостатки варианта (по данным института «Якутнипроалмаз»):

- отсутствие данных по эффективности обогащения на УВПС, извлечение 97,09% принято в соответствии с тре-

бованиями к опытно-промышленному образцу, что не исключает возможность недостижения заявляемых требований к новому оборудованию;

- технологическая схема не предполагает контроль хвостовых продуктов, что приводит к необходимости обеспечения заявленных показателей извлечения непосредственно в сепараторах УВПС за 1 цикл и, соответственно, может привести к потере алмазов;

- сепараторы УВПС предлагаются к внедрению без резервирования, что может привести к росту расходов на этапе внедрения схемы.

Для реализации технологической схемы ОФ № 15 по варианту 4 требуется (по данным института «Якутнипроалмаз») следующее дополнительное оборудование:

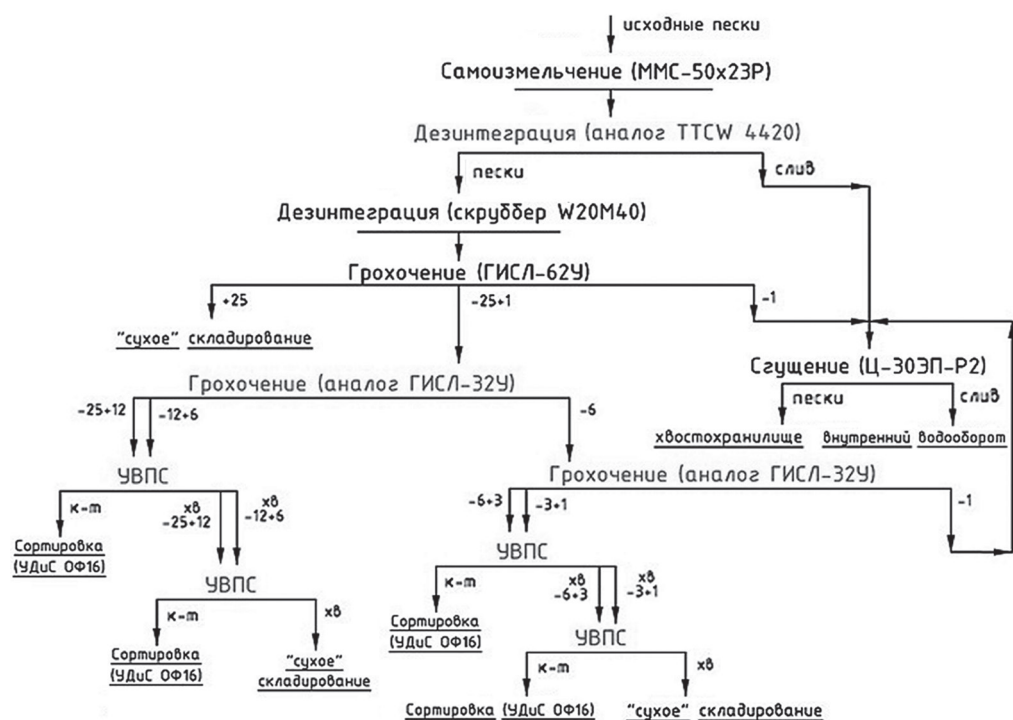


Рис. 8. Технологическая схема обработки алмазосодержащих россыпей на ОФ № 15 по опытному варианту 5

Fig. 8. Flow chart for processing diamond-bearing placers at processing plant No. 15 according to pilot variant 5

- корытная мойка (аналог ТТСW 4420);
- грохоты (аналог ГИСЛ-32У);
- сепараторы УВПС по 4 классам крупности.

Вариант 5 — «первичное обогащение с применением УВПС и контролем хвостов». Представлен опытной схемой, применяющей первичное обогащение с использованием сепаратора УВПС и контролем хвостов в аналогичных сепараторах. Используется предварительная промывка исходных россыпей в скруббере, их обогащение непосредственно в сепараторе УВПС при параллельной подаче на первый сепаратор классов +12 мм и -12+6 мм, а на второй сепаратор — классов -6+3 мм и -3+1 мм с контролем хвостов на аналогичных сепараторах и окончательной доводкой в схеме ОФ № 16.

Технологическая схема обработки исходных алмазосодержащих россыпей на ОФ № 15 по варианту 5 приведена на рис. 8.

Преимущества и недостатки данного варианта схемы аналогичны предыдущему варианту 4.

Технологическое извлечение алмазов по варианту 5 (ОФ № 15 + ОФ № 16), принятое институтом «Якутнипроалмаз» при оценке показателей — 97,91%.

Для реализации технологической схемы ОФ № 15 по варианту 4 потребуются (по данным института «Якутнипроалмаз») дополнительное оборудование:

- корытная мойка (аналог ТТСW 4420);
- грохоты (аналог ГИСЛ-32У);
- сепараторы УВПС (основная сепарация);
- сепараторы УВПС (контрольная сепарация);

Кроме представленных в качестве методов сокращения выхода гравитационного концентрата ТСС алмазосодержащего сырья в условиях ОФ № 15 и ОФ № 16 МНГОКа в данной работе

рассмотрена возможность применения процесса роторной дезинтеграции с использованием роторного дезинтегратора РД-МНП-500, установленного на классах крупности -6+3 мм и -3+1 мм, полученных в процессе грохочения концентрата ТСС крупностью -6+3 мм [20].

Продукты дезинтеграции после сушки проходили стадию доводки в схеме ОФ № 16.

Технологическая схема обработки исходных алмазосодержащих россыпей по рассматриваемому опытному варианту с использованием роторного дезинтегратора РД-МНП-500 приведена на рис. 9.

Материал крупностью -6+3 и -3+1 мм отдельно обезвоживается на грохотах Ketsch H1E 3000/800 (2 единицы), сушится в инфракрасных сушилках UV+IR (2 единицы) и доводится по комбинированной схеме — РЛС (основная, контрольная) в сепараторах ЛСД-4-04Н и (перечистная, контрольно-перечистная стадия) в сепараторах ЛС-ОД-6. Хвосты всех операций РЛС объединяются и направляются на липкостную сепарацию на СЛЛ-10.

Для проведения испытаний дезинтегратор РД-МНП-500 был установлен после обезвоживающих грохотов, перед сушильным оборудованием. Материал подавался в приемный бункер дезинтегратора. Разгрузка РД-МНП-500 направлялась в существующую схему по классам крупности -6+3 и -3+1 мм.

По результатам опытных испытаний установка РД-МНП-500 на участке доводки ОФ № 16 с целью сокращения концентрата ТСС перед операцией РЛС не рекомендована к дальнейшим промышленным испытаниям в связи с установленной высокой степенью повреждаемости исследуемых классов крупности алмазов: -6+3 мм и -3+1 мм, которые являются одними из основных в торговой классификации алмазного сырья.

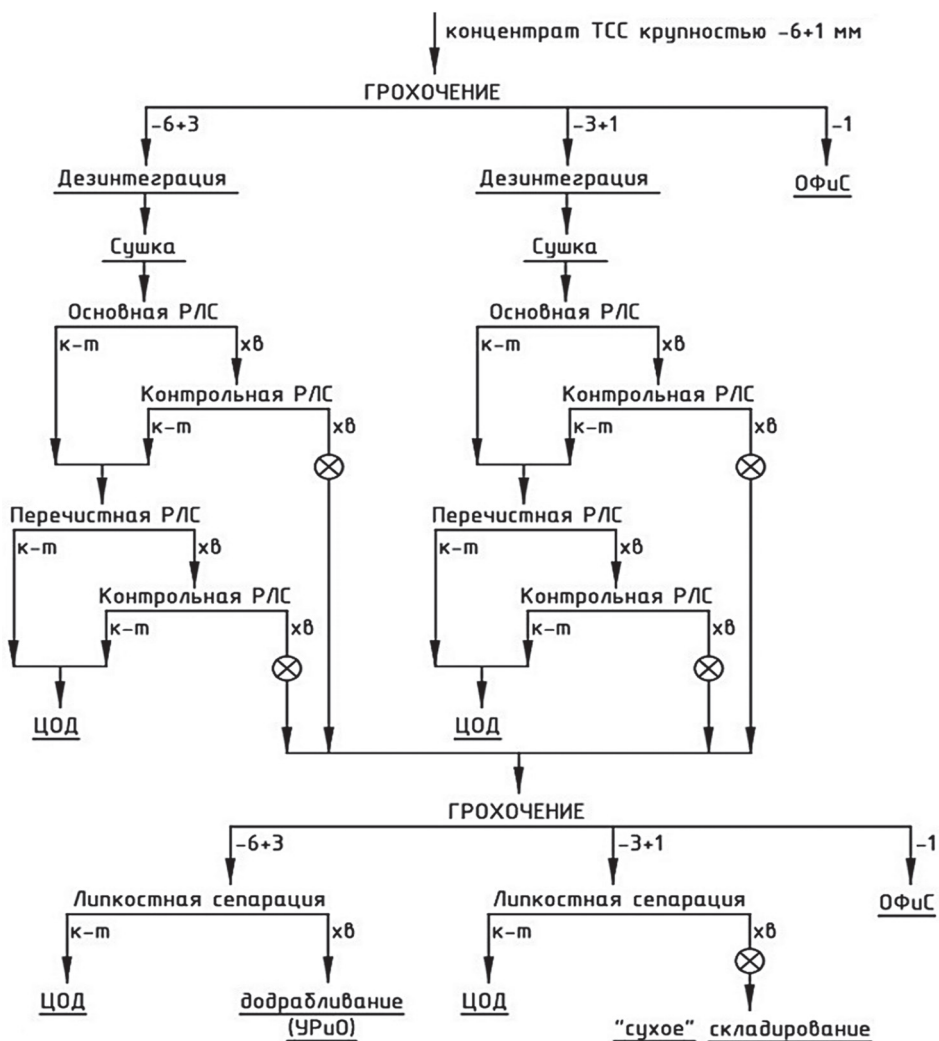


Рис. 9. Технологическая схема обработки алмазосодержащих россыпей на ОФ № 15 по рассматриваемому опытному варианту с использованием роторного дезинтегратора РДН-500

Fig. 9. The process flow chart for processing diamond-bearing placers at processing plant No. 15 according to the experimental variant under consideration using the RDN-500 rotary disintegrator

Выводы

1. Действующая схема обогащения алмазосодержащих россыпей в схемах ОФ № 15, 16 МНГОКа эффективна с экономической точки зрения только при условии, что в долгосрочной перспективе содержание минералов тяжелой фракции в обрабатываемых песках россыпных месторождений не изменится и будет находиться на стабильно низком уровне.

2. В случае увеличения в исходном сырье содержания минералов тяжелой фракции, что подтверждается диаграммой рис. 1, присутствует риск перегрузки производственного оборудования на участке доводки ОФ № 16, что может в свою очередь потребовать снижения объемов обработки ОФ № 15 по исходному материалу с целью сохранения уровня извлечения алмазов.

3. Для решения поставленной проблемы по обеспечению плановой загрузки участка доводки на ОФ № 16 МНГОКа специалистами института «Якутнипроалмаз» предложен и апробирован ряд возможных вариантов модернизации технологической схемы обогащательной фабрики № 15.

При этом в качестве «базового» варианта принята существующая схема, а в качестве альтернативных рассмотрены основные апробированные варианты ее модернизации:

- магнитная сепарация концентрата ТСС ОФ № 15 класса –6+1 мм перед отправкой в схему доводки ОФ № 16;

- доводка концентратов ТСС на ОФ № 15 с применением операций сушки, РГС и РЛС перед отправкой в схему доводки ОФ № 16;

- первичное обогащение исходного алмазосодержащего материала класса –25+1 мм на установке УВПС с последующей доводкой в схеме ОФ № 16;

- первичное обогащение исходного алмазосодержащего материала класса –25+1 мм на установке УВПС и контролем хвостов в аналогичных сепараторах

с последующей доводкой в схеме ОФ № 16.

4. На основании полученных результатов для снижения загрузки участка доводки ОФ № 16 рекомендован способ применения двухстадийной магнитной сепарации концентрата ТСС ОФ № 15, позволяющий:

- сократить в 3,5 раза его выход в схему ОФ № 16 за счет удаления более 70% из тяжелой фракции алмазосодержащих россыпей железосодержащих минералов;

- сохранить фактическое извлечение алмазов (96,64%) на уровне проектного значения (96,60%).

5. Разработанный способ модернизации технологической схемы ОФ № 15 по варианту включения операции магнитной сепарации для концентрата ТСС перед отправкой его в схему доводки ОФ № 16 в исследуемых условиях с учетом качества вещественного состава планируемого к переработке россыпного алмазосодержащего сырья принят как наиболее эффективный для реализации в установленных промышленных условиях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Leontiev R. G., Arkhipova Y. A.* Development of the mining complex of the Russian Far East // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2021, vol. 723, no. 5, article 052014. DOI: 10.1088/1755-1315/723/5/052014.

2. *Чантурия В. А., Двойченкова Г. П., Чантурия Е. Л., Тимофеев А. С.* Интенсификация процессов сепарации труднообогатимого алмазосодержащего сырья коренных, россыпных и техногенных месторождений // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. — 2022. — № 5. — С. 95–108.

3. *Айгистов М. Р., Герасимов Е. Н., Бондаренко И. Ф., Зырянов И. В.* Современные технологии при добыче и переработке алмазосодержащего сырья // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2022. — № 5-2. — С. 6–21. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_52_0_6.

4. *Зельберг А. С., Зырянов И. В., Бондаренко И. Ф.* Современные и перспективные технологии при разработке месторождений алмазов // Горная промышленность. — 2019. — № 3(145). — С. 26–31.

5. *Герасимов Е. Н., Зырянов И. В., Коваленко Е. Г.* Институт Якутнипроалмаз: результаты, достижения, планы // Горный журнал. — 2021. — № 2. — С. 39–47.

6. *Васильева А. А., Савицкий Л. В.* Особенности вещественного состава и технологии переработки кимберлитов трубки Нюрбинская / Молодежь и научно-технический прогресс в современном мире. Сборник материалов XII-й Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. — М., 2023. — С. 139–140.

7. Никитина Ю. Н., Двойченкова Г. П., Тимофеев А. С., Подкаменный Ю. А. Результаты полупромышленной апробации магнитной сепарации в качестве способа межциклового концентрирования продуктов тяжелосредной сепарации алмазосодержащих россыпей Нюрбинского месторождения // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2025. — № 10. — С. 5—20. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_10_0_5.

8. Richter M. C., Mainza A. N., Govender I., Mangadoddy N., Sivakumar R., Sreedhar G. E., van Heerden M. R., Features of near gravitational material tracers in a dense medium cyclone from PEPT / Powder Technology. 2023, vol. 415, article 118095. DOI: 10.1016/j.powtec.2022.118095.

9. Guiral-Vega J. S., Pérez-Barnuevo L., Bouchard J., Ure A., Poulin É., Du Breuil C. Particle-based characterization and process modeling to comprehend the behavior of iron ores in drum-type wet low-intensity magnetic separation // Minerals Engineering. 2024, vol. 206, article 108509. DOI: 10.1016/j.mineng.2023.108509.

10. Shiteng Qin, Sheng Dou, Yang Hu, Shijie Ma, Fulai Lai, Chuan Zhang, Chong Shen, Hongyu Zhao Application of pre-magnetic separation to address grinding classification density effects and enhance iron-copper separation in deep polymetallic magnetite ores // Engineering Science and Technology, an International Journal. 2024, vol. 60, article 101912. DOI: 10.1016/j.jestch.2024.101912.

11. Пелевин А. Е. Повышение эффективности обогащения железорудного сырья путем применения сепарации в повышенном магнитном поле // Черные металлы. — 2022. — № 1. — С. 31—36. DOI: 10.17580/chm.2022.01.04.

12. Дегодя Е. Ю., Сединкина Н. А., Шавакулева О. П., Гмызина Н. В. Совершенствование технологии обогащения сидеритовых руд Бакапского месторождения // Вестник Забайкальского государственного университета. — 2021. — Т. 27. — № 4. — С. 6—12. DOI: 10.21209/2227-9245-2021-27-4-6-12.

13. Dong Chen, Suo Chen, Hongwei Guo, Wei Zhao, Peng Li, Bingji Yan, Shunhu Zhang A novel metallurgical technique for the preparation of soft magnetic iron carbide from low-grade siderite // Journal of Alloys and Compounds. 2022, vol. 928, article 167186. DOI: 10.1016/j.jallcom.2022.167186.

14. Медведев А. В. Технология инфракрасной сушки жидких материалов // Дальневосточный аграрный вестник. — 2024. — Т. 18. — № 1. — С. 74—82. DOI: 10.22450/1999-6837-2024-18-1-74-82.

15. Бубырь Е. В., Владимиров Е. Н., Казаков Л. В., Левитин А. И., Мальков А. В., Межевич А. Н., Местер Ю. А., Морозов В. Г., Райзман В. Ш., Таткин Л. З. Рентгенолюминесцентные сепараторы алмазосодержащего сырья // Записки Горного института. — 2025. — Т. 165. — С. 38—40.

16. Зырянов И. В., Макалин И. А. Развитие рентгенолюминесцентного метода обогащения алмазосодержащего сырья // Наука и техника в Якутии. 2015. — № 1(28). — С. 16—19. DOI: 10.24411/1728-516X-2015-00004.

17. Монастырский В. Ф., Макалин И. А. Повышение эффективности рентгенолюминесцентной сепарации алмазосодержащего сырья // Наука и образование. — 2017. — № 3. — С. 86—90.

18. Mironov V. P., Emelyanova A. S., Shabalin S. A., Bubyer E. V., Kazakov L. V., Martynovich E. F. X-ray luminescence in diamonds and its application in industry // AIP Conference Proceedings. 2021, vol. 2392, no. 1, article 020010.

19. Rakhmeev R. N., Fedorov Y. O., Chikin A. Y., Kononko R. V. X-RAY radiometric and triboelectric separation of diamond-bearing materials / IMPC 2018. 29th International Mineral Processing Congress, 2019, pp. 748—756.

20. Амангусов Н. Ж. Веричев Е. М., Подлевских А. В. Эксплуатационная разведка кратерной части месторождения им. В. Гриба // Горный журнал. — 2014. — № 3. — С. 27—32. **ГИАБ**

REFERENCES

1. Leontiev R. G., Arkhipova Y. A. Development of the mining complex of the Russian Far East. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021, vol. 723, no. 5, article 052014. DOI: 10.1088/1755-1315/723/5/052014.

2. Chanturia V. A., Dvoichenkova G. P., Chanturia E. L., Timofeev A. S. Intensification of separation processes of refractory diamond-bearing raw materials from primary, placer and man-made deposits. *Journal of Mining Sciences*. 2022, no. 5, pp. 95—108. [In Russ].

3. Aigistov M. R., Gerasimov E. N., Bondarenko I. F., Zyryanov I. V. State-of-the-art technologies for mining and processing of diamonds-containing raw materials. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022, no. 5-2, pp. 6–21. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_52_0_6.

4. Zelberg A. S., Zyryanov I. V., Bondarenko I. F. Modern and promising technologies in the development of diamond deposits. *Russian Mining Industry Journal*. 2019, no. 3(145), pp. 26–31. [In Russ].

5. Gerasimov E. N., Zyryanov I. V., Kovalenko E. G. Yakutniproalmaz Institute: Results, Achievements, Plans. *Gornyi Zhurnal*. 2021, no. 2, pp. 39–47. [In Russ].

6. Vasilyeva A. A., Savitsky L. V. Features of the material composition and processing technology of kimberlites from the Nyurbinskaya pipe. *Molodezh' i nauchno-tekhnicheskii progress v sovremen-nom mire. Sbornik materialov XII-y Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh* [Youth and scientific and technological progress in the modern world. Collection of materials of the XII All-Russian scientific and practical conference of students, graduate students, and young scientists], Moscow, 2023, pp. 139–140. [In Russ].

7. Nikitina Yu. N., Dvoichenkova G. P., Timofeev A. S., Podkamenny Yu. A. Pilot-scale magnetic separation as a method of inter-circuit concentration of dense medium separation products at Nyurba diamond placers. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2025, no. 10, pp. 5–20. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_10_0_5.

8. Richter M. C., Mainza A. N., Govender I., Mangadoddy N., Sivakumar R., Sreedhar G. E., van Heerden M. R., Features of near gravitational material tracers in a dense medium cyclone from PEPT. *Powder Technology*. 2023, vol. 415, article 118095. DOI: 10.1016/j.powtec.2022.118095.

9. Guiral-Vega J. S., Pérez-Barnuevo L., Bouchard J., Ure A., Poulin É., Du Breuil C. Particle-based characterization and process modeling to comprehend the behavior of iron ores in drum-type wet low-intensity magnetic separation. *Minerals Engineering*. 2024, vol. 206, article 108509. DOI: 10.1016/j.mineng.2023.108509.

10. Shiteng Qin, Sheng Dou, Yang Hu, Shijie Ma, Fulai Lai, Chuan Zhang, Chong Shen, Hongyu Zhao Application of pre-magnetic separation to address grinding classification density effects and enhance iron-copper separation in deep polymetallic magnetite ores. *Engineering Science and Technology, an International Journal*. 2024, vol. 60, article 101912. DOI: 10.1016/j.jestch.2024.101912.

11. Pelevin A. E. Increasing the efficiency of iron ore beneficiation by using separation in an increased magnetic field. *Chernye Metally*. 2022, no. 1, pp. 31–36. [In Russ]. DOI: 10.17580/chm.2022.01.04.

12. Degodya E. Yu., Sedinkina N. A., Shavakuleva O. P., Gmyzina N. V. Improvement of the technology of siderite ore enrichment at the Bakap deposit. *Transbaikal state university journal*. 2021, vol. 27, no. 4, pp. 6–12. [In Russ]. DOI: 10.21209/2227-9245-2021-27-4-6-12.

13. Dong Chen, Suo Chen, Hongwei Guo, Wei Zhao, Peng Li, Bingji Yan, Shunhu Zhang A novel metallurgical technique for the preparation of soft magnetic iron carbide from low-grade siderite. *Journal of Alloys and Compounds*. 2022, vol. 928, article 167186. DOI: 10.1016/j.jallcom.2022.167186.

14. Medvedev A. V. Technology of infrared drying of liquid materials. *Far East agrarian herald*. 2024, vol. 18, no. 1, pp. 74–82. [In Russ]. DOI: 10.22450/1999-6837-2024-18-1-74-82.

15. Bubyr E. V., Vladimirov E. N., Kazakov L. V., Levitin A. I., Malkov A. V., Mezhevich A. N., Mester Yu. A., Morozov V. G., Raizman V. Sh., Tatkin L. Z. X-ray luminescent separators of diamond-containing raw materials. *Journal of Mining Institute*. 2025, vol. 165, pp. 38–40. [In Russ].

16. Zyryanov I. V., Makalin I. A. Development of the X-ray luminescent method for processing diamond-containing raw materials. *Science and Technology in Yakutia*. 2015, no. 1(28), pp. 16–19. [In Russ]. DOI: 10.24411/1728-516X-2015-00004.

17. Monastyrsky V. F., Makalin I. A. Increasing the Efficiency of X-Ray Luminescent Separation of Diamond-Containing Raw Materials. *Science and Education*. 2017, no. 3, pp. 86–90. [In Russ].

18. Mironov V. P., Emelyanova A. S., Shabalin S. A., Bubyr E. V., Kazakov L. V., Martynovich E. F. X-ray luminescence in diamonds and its application in industry. *AIP Conference Proceedings*. 2021, vol. 2392, no. 1, article 020010.

19. Rakhmeev R. N., Fedorov Y. O., Chikin A. Y., Kononko R. V. X-RAY radiometric and tribo-electric separation of diamond-bearing materials. *IMPC 2018. 29th International Mineral Processing Congress*, 2019, pp. 748–756.

20. Amangusov N. J., Verichev E. M., Podlevskikh A. V. Operational exploration of the crater part of the IM field. V. Gryba. *Gornyi Zhurnal*. 2014, no. 3, pp. 27–32. [In Russ].

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Никитина Юлия Николаевна — научный сотрудник, институт «Якутнипроалмаз» АК «АЛРОСА» (ПАО),
*Двойченкова Галина Петровна*¹ — д-р техн. наук, доцент, главный научный сотрудник; профессор, Политехнический институт (филиал) Северо-Восточного Федерального университета имени М.К. Аммосова, e-mail: dvoigp@mail.ru, ORCID ID: 0000-0002-0940-3880,
*Тимофеев Александр Сергеевич*¹ — канд. техн. наук, старший научный сотрудник, e-mail: Timofeev_ac@mail.ru, ORCID ID: 0000-0002-3382-6007,

¹ Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В. Мельникова.

Для контактов: Тимофеев А.С., e-mail: Timofeev_ac@mail.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Yu.N. Nikitina, Researcher, Yakutnioproalmaz Institute Joint Stock Company ALROSA (Public Joint Stock Company), 678174, Mirny, Russia,
*G.P. Dvoichenkova*¹, Dr. Sci. (Eng.), Assistant Professor, Chief Researcher; Professor, Polytechnic Institute (branch) of North-Eastern Federal University named after M.K. Ammosov», 678174, Mirny, Russia, e-mail: dvoigp@mail.ru, ORCID ID: 0000-0002-0940-3880,
*A.S. Timofeev*¹, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, e-mail: Timofeev_ac@mail.ru, ORCID ID: 0000-0002-3382-6007,

¹ Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources of Russian Academy of Sciences, 111020, Moscow, Russia.

Corresponding author: A.S. Timofeev, e-mail: Timofeev_ac@mail.ru.

Получена редакцией 10.05.2026; получена после рецензии 13.06.2026; принята к печати 10.08.2026.

Received by the editors 10.05.2026; received after the review 13.06.2026; accepted for printing 10.08.2026.



ОТДЕЛЬНЫЕ СТАТЬИ ГОРНОГО ИНФОРМАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКОГО БЮЛЛЕТЕНЯ
(специальный выпуск), смотри на www.gornaya-kniga.ru

СБОРНИК

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ГОРНОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ
(2026, № 3, СБ 13, 32 с.)

Савич О. И., Мельник В. В. Об эффективности подземного хранения газового конденсата в многолетнемерзлых породах.

Савич И. Н., Савич А. О., Козлова О. Ю., Агафонов В. В. О выборе решений при подземной разработке руд.

MODELING AND OPTIMIZATION OF MINING SYSTEM PARAMETERS

Savich O. I., Melnik V. V. On the efficiency of underground storage of gas condensate in permafrost rocks.

Savich I. N., Savich A. O., Kozlova O. Yu., Agafonov V. V. On the choice of solutions in the underground mining of ores.