

Разработка программного обеспечения исследований обогатимости железных руд: цели, задачи, первые данные

Д.Н. Шibaева✉, Д.А. Асанович, К.А. Малодушев, Д.А. Шамшура

Горный институт Кольского научного центра Российской академии наук, г. Апатиты, Российская Федерация
✉ shibaeva_goi@mail.ru

Резюме: В работе представлены результаты разработки программного обеспечения, направленного на систематизацию результатов лабораторных и укрупненно-лабораторных исследований обогатимости железных руд посредством сухой магнитной сепарации и их анализ. Основой систематизации результатов являются характеристики исследуемого сырья: гранулометрический, химический и минералого-петрографический состав с привязкой к предприятию, эксплуатирующему запасы (с учетом принятой их промышленной типизации), а также параметры, определяющие режимы и условия реализации сухой магнитной сепарации, и технологические показатели, характеризующие ее эффективность. Представленный в работе материал описывает проект программного обеспечения и реализованный один из его модулей – «Формирование данных», обеспечивающий возможность загрузки, первичной обработки и систематизации результатов исследований. Первыми исходными данными разрабатываемого программного обеспечения являются лабораторные, укрупненно-лабораторные исследования обогатимости железных руд месторождений Оленегорского рудного поля: Оленегорского, Комсомольского, 15 лет Октября, Кировогорского, Печегубского, для которых подтверждена эффективность реализации сухой магнитной сепарации.

Ключевые слова: железная руда, сухая магнитная сепарация, режимы сепарации, условия сепарации, характеристика продуктов разделения, программное обеспечение, игровой движок Unity

Благодарности: Работы выполнены при поддержке гранта в форме субсидий из областного бюджета некоммерческим организациям, не являющимся казенными учреждениями, на поддержку научно-исследовательских проектов молодых ученых Мурманской области (2024 год).

Для цитирования: Шibaева Д.Н., Асанович Д.А., Малодушев К.А., Шамшура Д.А. Разработка программного обеспечения для систематизации и анализа результатов исследований обогатимости железных руд: цели, задачи, первые данные. *Горная промышленность*. 2024;(6):99–106. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-6-99-106>

Development of a software package for systematization and analysis of research results of iron ore preparation characteristics: goals, objectives, first data

D.N. Shibaeva✉, D.A. Asanovich, K.A. Malodushev, D.A. Shamshura

Mining Institute of the Kola Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Apatity, Russian Federation
✉ shibaeva_goi@mail.ru

Abstract: The paper presents the results of software development aimed to systematize the findings of laboratory and integrated tests of iron ore preparation characteristics using dry magnetic separation and their analysis. Systematization of the findings is based on characteristics of the studied raw materials, i.e. grain-size analysis, chemical, mineralogical and petrographic composition, with reference to the enterprises exploiting the reserves (with account of their industrial types), as well as parameters determining the modes and conditions of dry magnetic separation and technological indicators characterizing its efficiency. The material presented in this paper describes the software project and one of its modules, i.e. 'Data Generation', which provides the possibility of downloading, preprocessing and systematization of the test results. The first initial data for the developed software included the laboratory and integrated tests results on the preparation characteristics of the iron ore from the deposits of the Olenegorsk ore field, including the Olenegorskoye, Komsomolskoye, 15 years of October, Kirovogorskoye, Pechegubskoye, for which the efficiency of dry magnetic separation is confirmed.

Keywords: iron ore, dry magnetic separation, separation modes, separation conditions, characteristics of the separation products, software, the Unity game engine

Acknowledgments: The research was supported by a grant in the form of subsidies from the regional budget to non-profit non-governmental organizations to support research projects by young scientists of the Murmansk region (2024).

For citation: Shibaeva D.N., Asanovich D.A., Malodushev K.A., Shamshura D.A. Development of a software package for systematization and analysis of research results of iron ore preparation characteristics: goals, objectives, first data. *Russian Mining Industry*. 2024;(6):99–106. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-6-99-106>

Введение

Наиболее серьезной проблемой экономического развития предприятий горнопромышленного комплекса Мурманской области в последнее время является истощение минерально-сырьевой базы по традиционным для области видам сырья (медно-никелевые, апатитовые и железные руды) и существенное снижение уровней и темпов ее воспроизводства [1]. Высокорентабельная приповерхностная часть большинства крупных и уникальных месторождений традиционных видов сырья практически выработана в ходе многолетней интенсивной эксплуатации. В связи с переходом к отработке глубоких горизонтов и подземной добыче полезных ископаемых значительно увеличиваются прямые производственные затраты и капиталовложения, сохраняется тенденция к ухудшению качества добываемых руд и усложняются условия их разработки [2].

Исследованиями, проведенными в [3] на примере железорудных карьеров, установлено, что с ростом глубины разработки горно-геологические факторы характеризуются¹: увеличением удельного веса скальных пород в общем объеме горной массы; увеличением средней прочности и блочности пород; уменьшением содержания железа в сырой руде; уменьшением мощности рудных тел, изменением углов падения залежей, дизъюнктивными нарушениями; изменением гидрогеологических условий разработки (возрастанием водообильности); изменением устойчивости пород в бортах карьеров.

Совокупность изменяющихся с глубиной разработки запасов месторождений и уровнем развития технологий их разработки горно-геологические и горнотехнические условия отработки запасов месторождений формируют тенденцию повышения объемов пустых и слабоминерализованных пород, обусловленную снижением содержания железа в сырой руде, уменьшением мощности рудных тел, изменением углов падения залежи, ростом рабочих параметров выемочно-погрузочного оборудования.

Снизить влияние изменения вещественного состава (соотношения основных породообразующих с промышленно значимым минералом) добытой горной массы на процессы рудоподготовки и последующего «глубокого» обогащения возможно посредством предварительной концентрации (предконцентрации). Предконцентрация способствует повышению качества рудной массы в кусковой форме и формирует, в зависимости от состава ее отходов, сырье для вторичного полезного применения – «экологичные» техногенные месторождения или строительный материал (например, для производства щебня, используемого при ремонте дорог, подсыпке дамб, насыпей, закладке выработанного пространства) [4–6]. За счет образования кусковых отходов в процессе предконцентрации (более 10 мм) сокращается количество тонкоизмельченных хвостов, явля-

ющихся основным источником загрязнения атмосферного воздуха с поверхности сухих пляжей, намывных отсеков, откосов дамб и плотин [7].

При обогащении железных руд применяется предконцентрация, реализуемая посредством сухой магнитной сепарации (СМС) [8–10], эффективность которой зависит от качественных и количественных параметров материала, поступающего на разделение; максимального линейного размера кусков в пробе; сформированных при классификации классов крупности и модуля крупности, характеризующего отношение максимального значения линейного размера куска к минимальному в классе крупности; от режимов и условий реализации процесса разделения [10–13].

В работах [7; 14–16] представлено положительное влияние процессов предконцентрации на дробильно-измельчительный передел. На примере руд месторождений Костомукшского рудного поля [16] показано, что за счет выделения посредством сухой магнитной сепарации немагнитного продукта в количестве 12–14%, представленного пустыми и/или слабоминерализованными породами, энергозатраты на дробление с сокращением крупности от –80 мм до –2 мм снижаются не менее чем на 5%.

Рациональные и экологичные технологии природопользования особенно актуальны для арктических территорий, которые не позволяют рассчитывать на их скорое восстановление в случае серьезного ущерба [17; 18]. Необходимо отметить, что использование процессов предконцентрации позволяет на ранних стадиях технологического процесса вывести пустую и/или слабоминерализованную породу, обеспечив снижение количества отходов «глубокого» обогащения. В работе [19] на примере одного из месторождений Хибинского массива показано, что удаление в процессе кусковой рентгенолюминесцентной сепарации пород, содержащих менее 1% P2O5, позволяет снизить до 19% отн. количество хвостов апатитовой флотации на 1 т обогащаемой руды и увеличить срок службы хвостохранилища не менее чем в 1,4 раза.

Целью работы является разработка прикладного программного обеспечения, направленного на систематизацию формирования и хранения результатов исследований обогатимости железных руд с учетом их минералого-петрографического состава и привязки к предприятию, эксплуатирующему запасы (с учетом принятой промышленной типизации). Разрабатываемое программное обеспечение позволит:

- стандартизировать проведение сравнительного анализа технологических показателей сухой магнитной сепарации;

- оценивать качество пробоподготовки (формирования проб с минимальными/допустимыми отклонениями качественных и количественных показателей), обеспечивающей возможность сопоставления результатов, и определения на этой основе оптимальных режимов и условий сухой магнитной сепарации;

¹ Разработка методики определения производительности глубоких карьеров по горнотехническим возможностям: Отчет о НИР (заключительный). ИГД МЧМ СССР; Рук. А.Ф. Ткачев, №ГР 01880058566, Инв. 02860062732. Свердловск; 1989. 130 с.

– сформировать основу для прогнозирования режимов и условий сухой магнитной сепарации и ее результатов в зависимости от химического, granulometric и минералого-петрографического состава поступающей на разделение руды.

Для достижения обозначенной цели в рамках текущего этапа работы над программным обеспечением поставлены следующие задачи:

1. Систематизировать параметры, определяющие режимы и условия реализации сухой магнитной сепарации, технологические показатели, характеризующие ее эффективность.
2. Разработать проект программного обеспечения для систематизации и анализа результатов исследований обогатимости железных руд.
3. Разработать модуль «Формирование данных», обеспечивающий возможность загрузки, первичной обработки и систематизации результатов исследований обогатимости проб железной руд посредством сухой магнитной сепарации и включающий:

- данные о granulometric и химическом составе пробы;
- данные о минералого-петрографическом составе пробы, содержащем в том числе фотографии образцов, характеризующих выделенные породные разновидности;
- технологические показатели сухой магнитной сепарации, полученные при различных режимах и условиях ее реализации (крупности материала, поступающего на сепарацию: верхняя граница крупности сепарируемого мате-

риала, диапазоны классов крупности (модуль крупности), магнитная индукция на поверхности барабана магнитного сепаратора, скорость вращения барабана магнитного сепаратора).

Первыми исходными и тестовыми данными разрабатываемого программного обеспечения являются результаты лабораторных, укрупненно-лабораторных исследований обогатимости железных руд месторождений Оленегорского рудного поля: Оленегорского, Комсомольского, 15 лет Октября, Кировогорского, Печегубского (рис. 1), для которых подтверждена эффективность реализации сухой магнитной сепарации [20; 21]. Необходимо отметить, что эти месторождения железистых кварцитов относятся к основным промышленным типам месторождений, в которых сосредоточена большая часть балансовых запасов [22].

Объект исследования

Все крупные промышленные месторождения железистых кварцитов, образующие Оленегорское рудное поле, находятся в пределах главной Приимандровской складчатой структуры. Оленегорское рудное поле расположено в юго-западной части Центрально-Кольской структуры, и представлено сложными купольно-блоковыми структурами гранитоидов, обрамленных комплексом пород железорудной (BIF – banded iron formation) формации и глинозёмистыми гнейсами [23; 24]. Купольно-блоковые структуры сложены в основном гранито- и гранодиорито-гнейсами, в разной степени мигматизированными и рассланцованными, иногда в них присутствуют амфиболиты [25].

Породы BIF-формации располагаются во фрагментах, линзах и синформах между купольно-блоковыми структурами, рассматриваемыми в ранге оленегорской толщи. Разрез этой толщи пестрый и сложен в основном чередующимися пластами амфиболовых, биотит-амфиболовых и биотитовых гнейсов с прослоями железистых кварцитов, магнетит-куммингтонитовых кварцитов, гранат-диопсидовых кальцифиров, гранат-биотитовых гнейсов, иногда со ставролитом и силлиманитом, и с редкими прослоями полевошпатовых, роговообманковых, тремолитовых, жедритовых и гранатовых амфиболитов. Преобладают в оленегорской толще амфиболовые и биотит-амфиболовые гнейсы – лептиты. Кварциты имеют полосчатое строение, обусловленное чередованием магнетитовых, гематит-магнетитовых, кварцевых и пироксен-амфиболовых прослоев. Структура руд в основном мелкозернистая, текстура полосчатая. Вмещающие гнейсы и железистые кварциты прорываются жилами пегматитов и дайками базитов. Гранит-пегматиты распространены по всему разрезу железорудной толщи в виде секущих жил мощностью от нескольких сантиметров до 20–40 м, протяженностью – первые сотни метров.

Структура месторождений, расположенных в пределах главной Приимандровской складчатой структуры, представлена многочисленными пластово-линзовыми телами железистых кварцитов (наиболее яркий пример такой организации рудных тел – Кировогорское месторождение); единственной более или менее компактной линзой (месторождение им. проф. Баумана, Оленегорское, Комсомольское); множеством изолированных «шнуровидных» тел (мелкие рудопоявления и месторождения, в частности, Железная Варака, им. 15-летия Октября, Восточно-Большелицкое и др.) [24; 26].

Особенности формирования строения месторождений обуславливают колебания минералого-петрографическо-

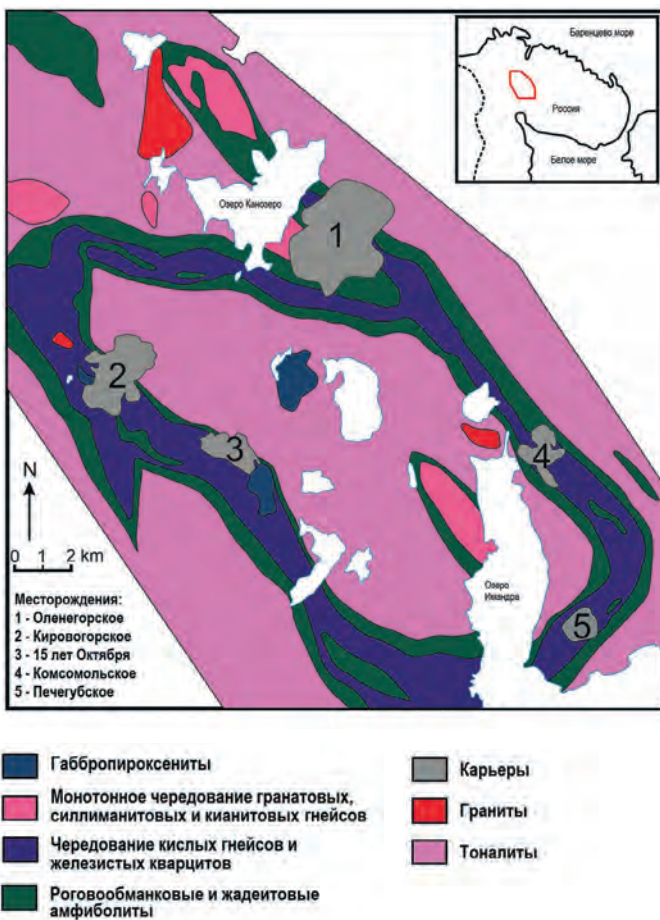


Рис. 1
Карта месторождений
Оленегорского рудного поля

Fig. 1
Map of the Olenegorsk ore
field deposits

го состава (количественные соотношения породных и минеральных разновидностей). Например, главными рудными минералами Оленегорского месторождения являются магнетит (17–28%), гематит (1,3–22,3%), встречаются пирит и пирротин (до 0,3%), к основным нерудным минералам относят кварц (21–61%), пироксен (0–14%), амфибол (0–20%), слюда (0–5%), полевые шпаты (0–30%) [23]. Отношение магнетита к гематиту в среднем по месторождению составляет 4:1. Для руд Комсомольского месторождения основным рудным минералом является магнетит, гематит встречается крайне редко, отмечаются пирит, пирротин, ильменит; из нерудных минералов в кромке кварца присутствуют роговая обманка, куммингтонит и диопсид.

Методы исследования

Устройство, реализующее сухую магнитную сепарацию. Исследования обогатимости железных руд (рассмотренные на примере месторождений Оленегорского рудного поля) реализованы на лабораторном барабанном магнитном сепараторе серии СМБС-Л секторного исполнения с верхним способом подачи материала в рабочую зону. Разделение осуществляется за счет удержания магнитных частиц на транспортирующей поверхности (обечайке барабана магнитного сепаратора).

Магнитное поле в сепараторе формируется системой из постоянных магнитов, полюса которых чередуются по ходу движения материала (по периметру барабана). Секторное исполнение позволяет проводить сухую магнитную сепарацию железной руды при различных значениях магнитной индукции на поверхности обечайки барабана магнитного сепаратора (0,16 Тл, 0,32 Тл, 0,45 Тл и 0,75 Тл) в одну стадию и при их комплексировании реализовывать стадийную сепарацию.

Параметры систематизации результатов исследований обогатимости проб железных руд посредством сухой магнитной сепарации. В качестве основных аналитических параметров, определяемых применяемым оборудованием и характеристиками материала, влияющих на эффективность разделения посредством барабанного магнитного сепаратора, а также принятыми методиками оценки обогатимости железных руд² [27], использованы:

- значение магнитной индукции на поверхности обечайки барабана магнитного сепаратора;
- скорость вращения обечайки барабана магнитного сепаратора (параметр, позволяющий изменять соотношение магнитных и конкурирующих сил);
- количество классов крупности материала, поступающего на сепарацию, максимальный линейный размер кусков; модуль крупности, характеризующий отношение максимального значения линейного размера куска к минимальному в сформированных в процессе классификации классах крупности.

Вариация соотношений магнитных и конкурирующих сил (в данном случае центробежной силы, возникающей при движении материала по криволинейной траектории – поверхности барабана) определяет положение точки отрыва частицы (куска) от поверхности и, соответственно, траекторию движения кусков в свободном падении. В работе [23; 28] представлены результаты математического моделирования в специализированном программном комплексе COMSOL Multiphysic, иллюстрирующие изменение

траекторий движения кусков в свободном падении в зависимости от их характеристик и действующих на них сил.

Поскольку природные комплексы, даже в рамках одного рудного района могут характеризоваться изменчивостью минерального состава (набором основных породообразующих минералов), количественными соотношениями породообразующих и вмещающих пород и, соответственно, химическим составом, основополагающей задачей в процессе изучения обогатимости железных руд посредством сухой магнитной сепарации является оценка минералого-петрографического состава проб. Включение в разрабатываемый комплекс информации о минералого-петрографическом составе проб позволит в перспективе использовать результаты сухой магнитной сепарации в процессе прогнозирования, формирования и управления качественными характеристиками добываемой рудной массы. В работе [29] на примере апатит-нефелиновой руды Хибинского массива представлена схема применения раздельных и усреднительных принципов управления качеством руды в зависимости от ее вещественного состава.

Вариативность объектов исследований обогатимости железных руд обуславливает необходимость учета и систематизации мест отбора проб и ее первичных характеристик, включающих наименование горно-обогатительного комбината, разрабатывающего запасы железных руд; месторождения; карьера / рудника, эксплуатирующего запасы; типа руды.

Средства разработки программного продукта. Разработка прикладного программного обеспечения реализована в игровом движке Unity, обладающем визуальной средой разработки, межплатформенной поддержкой и модульной системой компонентов. В качестве внешнего редактора, позволяющего создавать скрипты (на языке программирования C#), использована среда разработки Visual Studio. Для выполнения отдельных задач, таких как хранение данных, работа с директориями и Excel-файлами, применялись сторонние библиотеки Mono Data SQLite, Sqlite3, Stand Alone File Browser, Office Open XML.

Результаты и их обсуждение

Разрабатываемое программное обеспечение состоит из следующих основных элементов: «Формирование данных», «Хранение данных», «Анализ данных» и «Прогноз данных» (рис. 2). Первичными для элемента «Формирование данных» являются числовые, текстовые и графические данные. Числовые и текстовые данные характеризуют режимы и условия сухой магнитной сепарации, а также полученные в результате разделения технологические показатели. Графический тип данных используется для визуализации представленных в исследуемой пробе образцов породных разновидностей.

Элемент «Формирование данных» включает в себя загрузку исходных данных, полученных в результате лабораторных, укрупненно-лабораторных исследований, и их обработку: расчет технологических показателей, необходимых для оценки обогатимости железных руд; формирование табличного представления, вид и наполнение которого предварительно разработаны пользователем.

Элемент «Хранение данных» реализует возможность хранения данных:

- в файловой системе, включающей документы формата Excel и графический материал (изображения образцов);
- в базе данных, обеспечивающей их систематизацию для работы аналитических элементов программного обе-

² Оценка обогатимости руд черных и легирующих металлов методами крупнотонусковой сепарации. Москва: ВИМС, 2014. 35с.

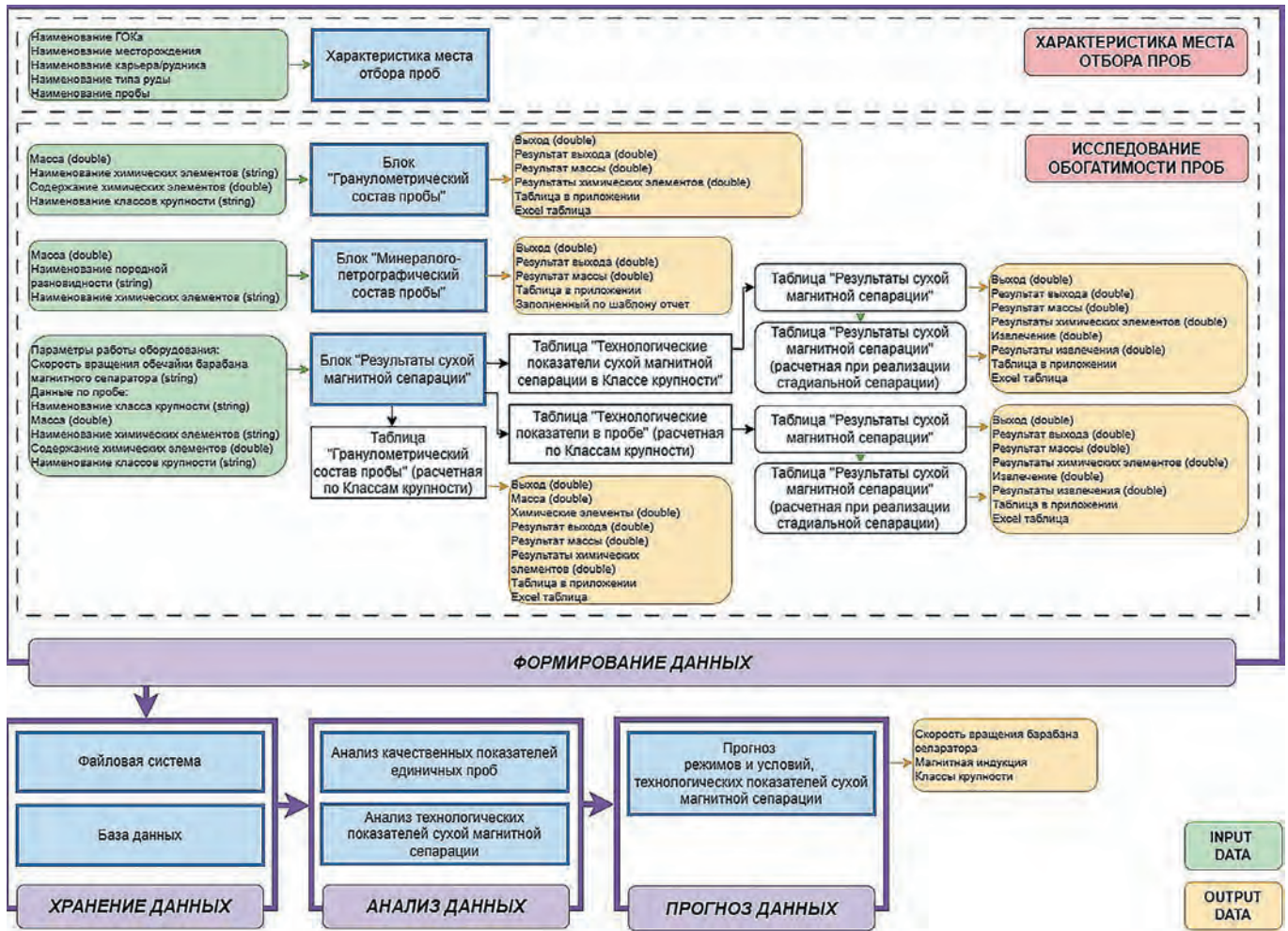


Рис. 2 Структурная схема программного обеспечения

Fig. 2 A structural flowchart of the software

спечения «Анализ данных» и «Прогноз данных» и формирование в последующем связей между минералогическим, гранулометрическим и химическим составом, режимами и условиями реализации процесса сухой магнитной сепарации (напряженности магнитного поля, скорости вращения обечайки барабана магнитного сепаратора, крупности питания сухой магнитной сепарации).

На рис. 3, на примере блока «Результаты сухой магнитной сепарации», представлена схема, иллюстрирующая взаимодействие между классами (управления, расчета, хранения) и потоками данных/команд в программе. Необходимо отметить, что для упрощения представления схемы элементы, характерные для диаграммы классов (имя класса, атрибуты класса и операции класса), описаны для объектов Вспомогательного класса. Остальные объекты на схеме характеризуются только именем класса.

Класс управления отвечает за последовательность команд и их выполнение зависимыми классами, а также за получение/передачу между ними данных. Класс расчета осуществляет расчет технологических показателей сухой магнитной сепарации по формулам («Результат масс», «Выход», «Результат выходов», «Извлечение», «Результат химических элементов»), принимает исходные данные (ссылки на объекты), получает/изменяет ранее сформированное пользователем содержимое объектов. Класс хранения обеспечивает хранение/передачу данных, а также их

преобразование в необходимые для последующей работы форматы. Вспомогательный класс используется для систематизации формата хранения данных на программном уровне.

Тестирование работоспособности разрабатываемого программного обеспечения, в том числе проверка удобства взаимодействия программного интерфейса с пользователем, проведено на результатах исследований обогатимости железных руд месторождений Оленегорского рудного поля: Оленегорского, Комсомольского, 15 лет Октября, Кировогорского и Печегубского. В результате сформирована база данных, включающая:

- 14 вариантов классов крупности материала, поступающего на сухую магнитную сепарацию (исходная крупность -25+0 мм и классифицированная классу по 10 мм и 5 мм, исходная крупность -80+0 мм и классифицированная классу по 50, 25, 10, 5 и 2 мм, исходная крупность -150+0 мм и классифицированная классу по 100, 80, 50, 25, 10, 5 и 2 мм, исходная крупность -350+0 мм и классифицированная классу по 200, 150, 100, 80, 50, 25, 10, 5 и 2 мм);
- 13 вариантов режимов сухой магнитной сепарации (магнитная индукция $B = 0,16$ Тл и скорость вращения барабана магнитного сепаратора $V = 35$ Гц (45 Гц / 55 Гц), $B = 0,32$ Тл и $V = 35$ Гц (45 Гц / 55 Гц), $B = 0,45$ Тл и $V = 35$ Гц (45 Гц / 55 Гц), $B = 0,75$ Тл и $V = 35$ Гц (45 Гц / 55 Гц), стадийная СМС (последовательное увеличение B от 0,16 Тл до 0,75 Тл при $V = 35$ Гц).

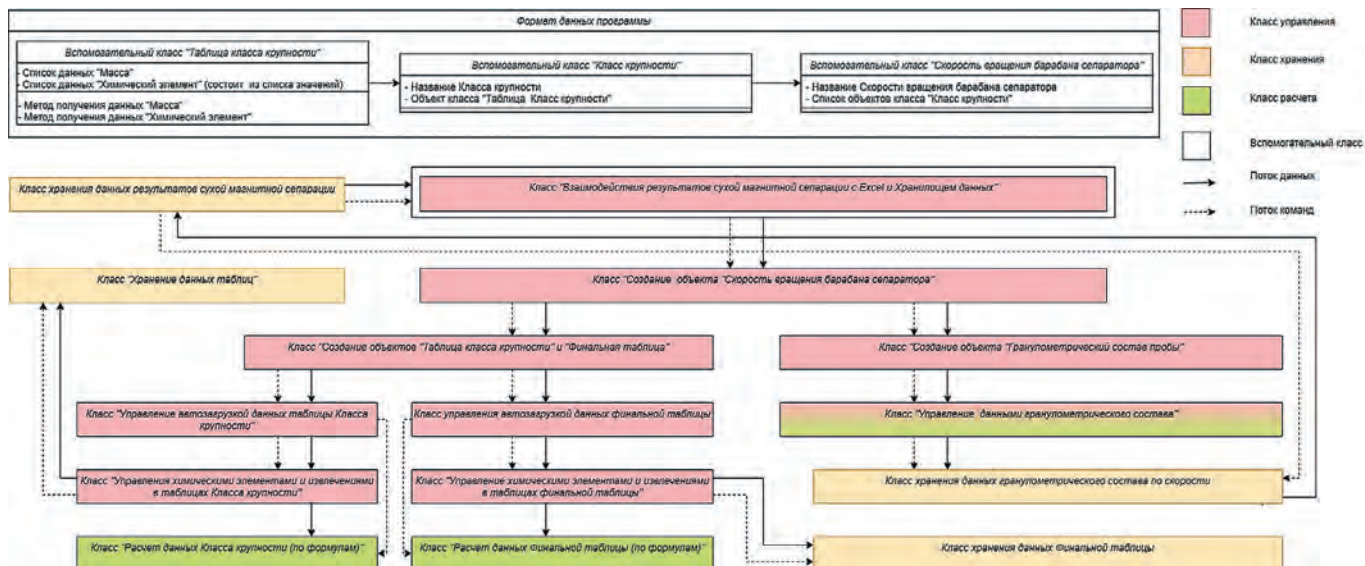


Рис. 3
Блок-схема взаимодействия между классами (на примере блока «Результаты сухой магнитной сепарации»)

Fig. 3
A block diagram of interaction between the classes (exemplified by the 'Results of dry magnetic separation' module)

Заключение

Представленное в данной работе программное обеспечение, направленное на сопровождение исследований обогатимости железных руд, решает задачу загрузки, первичной обработки, систематизации технологических показателей сухой магнитной сепарации с учетом характеристик руды (минералого-петрографического, химического и гранулометрического составов), принятых режимов и условий процесса разделения, а также хранение результатов. База данных создаст основу для:

- реализации оценки корректности формирования проб и проводимых расчетов;
- установления связей между минералого-петрографическим, гранулометрическим и химическим составом, режимами и условиями реализации процесса сухой магнитной сепарации (напряженности магнитного поля, скорости вращения обечайки барабана магнитного сепаратора, крупности питания сухой магнитной сепарации);
- прогнозирования технологических показателей сухой магнитной сепарации.

Первыми исходными данными разрабатываемого программного обеспечения являются лабораторные, укрупненно-лабораторные исследования обогатимости железных руд пяти месторождений Оленегорского рудного поля: Оленегорского, Комсомольского, 15 лет Октября, Кирово-

горского, Печегубского, для которых подтверждена эффективность реализации сухой магнитной сепарации. Для этих месторождений сформирована база данных, включающая различные варианты гранулометрических характеристик материала, поступающего на сепарацию, режимов и условий реализации процесса разделения. Вариация гранулометрических характеристик материала, поступающего на сепарацию, обусловлена наличием/отсутствием процессов предварительной классификации. Диапазон значений в классах крупности классифицированного материала определялся модулем крупности: в одном случае он превышал 2,5 ед., в другом – принимался менее 2,5 ед. Исследованные режимы разделения включали: сепарацию при одном значении магнитной индукции на поверхности обечайки барабана магнитного сепаратора и различных скоростях его вращения, и стадийную сепарацию, реализующую последовательное выделение магнитного продукта при различных значениях магнитной индукции.

В перспективе для унификации данных минералого-петрографического анализа планируется разработка программного модуля, включающего основные, подразумевающие выбор из предварительно сформированного описания, и уникальные, характеризующие особенности конкретной пробы руды.

Список литературы / References

1. Лукичев С.В., Жиров Д.В., Чуркин О.Е. Состояние и перспективы развития минерально-сырьевого комплекса Мурманской области. *Горный журнал*. 2019;(6):19–24. <https://doi.org/10.17580/gzh.2019.06.01>
Lukichev S.V., Zhirov D.V., Churkin O.E. Mineral reserves and mineral resources of the Murmansk Region: Current conditions and prospects. *Gornyi Zhurnal*. 2019;(6):19–24. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/gzh.2019.06.01>
2. Чуркин О.Е., Гилярова А.А. Методические подходы к оценке инвестиционной привлекательности перспективных рудных месторождений Мурманской области. *Фундаментальные исследования*. 2020;(11):205–210. <https://doi.org/10.17513/fr.42899>
Churkin O.E., Gilyarova A.A. Methodological approaches to assessing the investment attractiveness of promising ore deposits in the Murmansk region. *Fundamental Research*. 2020;(11):205–210. (In Russ.) <https://doi.org/10.17513/fr.42899>

3. Лель Ю.И., Сандригайло И.Н., Терехин Е.Ю., Ворошилов Г.А. Горно-геологические и горнотехнические условия разработки глубоких карьеров. *Известия Уральского государственной горно-геологической академии*. 2000;(11):77–85. Lel Yu.I., Sandrigailo I.N., Terekhin E.Yu., Voroshilov G.A. Mining, geological and engineering conditions of deep open pit mining. *Izvestiya Uralskoi Gosudarstvennoi Gorno-Geologicheskoi Akademii*. 2000;(11):77–85. (In Russ.)
4. Варичев А.В., Угаров А.А., Эфендиев Н.Т., Кретов С.И., Лавриненко А.А., Солодухин А.А., Пузаков П.В. Инновационные решения в производстве железорудного сырья на Михайловском ГОКе. *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. 2017;(5):141–153. <https://doi.org/10.15372/FTPRPI20170516>
Varichev A.V., Ugarov A.A., Efendiev N.T., Kretov S.I., Puzakov P.V., Lavrinenko A.A., Solodukhin A.A. Innovative solutions in iron ore production at mikhailovsky mining and processing plant. *Journal of Mining Science*. 2017;53(5):925–937. <https://doi.org/10.1134/S1062739117052969>
5. Кармазин В.В. Оценка потенциальной обогатимости железорудного сырья на основе параметров раскрытия минералов. *Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации*. 2017;(12):11–18. Karmazin V.V. The Evaluation of the potential washability of the iron ore raw materials on the basis of the mineral breaking down parameters. *Ferrous Metallurgy. Bulletin of Scientific, Technical and Economic Information*. 2017;(12):11–18. (In Russ.)
6. Bhoja S.K., Tripathy S.K., Murthy Y.R., Ghosh T.K., Kumar C.R., Chakraborty D.P. Influence of mineralogy on the dry magnetic separation of ferruginous manganese ore – A comparative study. *Minerals*. 2021;11(2):150. <https://doi.org/10.3390/min11020150>
7. Ермолович Е.А. Технология переработки отходов обогащения железных руд как способ борьбы с источником негативного экологического воздействия. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2009;(S12):375–379. Yermolovich E.A. Technology of processing of iron ores enrichment waste, as the way of struggle against the source of negative ecological influence. *Mining Information and Analytical Bulletin*. 2009;(S12):375–379. (In Russ.)
8. Xiong D., Lu L., Holmes R.J. Developments in the physical separation of iron ore: magnetic separation. In: Lu L. (ed.) *Iron Ore. Mineralogy, Processing and Environmental Sustainability*. Elsevier Ltd.; 2015, pp. 283–307. <https://doi.org/10.1016/B978-1-78242-156-6.00009-5>
9. Ezhov A.M., Shvaljov Y.B. Dry magnetic separation of iron ore of the bakchar deposit. *Procedia Chemistry*. 2015;15:160–166. <https://doi.org/10.1016/j.proche.2015.10.026>
10. Liu J., Xue Z., Dong Z., Yang X., Fu Y., Man X., Lu D. Multiphysics modeling simulation and optimization of aerodynamic drum magnetic separator. *Minerals*. 2021;11(7):680. <https://doi.org/10.3390/min11070680>
11. Zong Q.X., Fu L.Z., Bo L. Variables and applications on dry magnetic separator. *E3S Web of Conferences*. 2018;53:02019. <https://doi.org/10.1051/E3SCONF/20185302019>
12. Mohanty S., Nayak B., Bhattacharyya K.K. High intensity magnetic separation of iron ore slime and its limitations. In: *Proceedings of the 11th International Seminar on Mineral Processing Technology, 15–17 December 2010, Jamshedpur, India*, pp. 173–178.
13. Baawuah E., Kelsey C., Addai-Mensah J., Skinner W. A novel pneumatic planar magnetic separator for magnetite beneficiation: A focus on flowsheet configuration. *Minerals*. 2020;10(9):759. <https://doi.org/10.3390/min10090759>
14. Четверик М.С., Бабий Е.В., Бубнова Е.А., Терещенко В.В. Основные направления рационального природопользования при открытой добыче полезных ископаемых. *Горный вестник*. 2013;(96):58–62. Режим доступа: http://nbuv.gov.ua/UJRN/girvi_2013_96_17 (дата обращения: 02.10.2024).
Chetverik M.S., Babii E.V., Bubnova E.A., Tereshchenko V.V. The main trends of rational nature management in open-pit mining. *Gornyi Vestnik*. 2013;(96):58–62. (In Russ.) Available at: http://nbuv.gov.ua/UJRN/girvi_2013_96_17 (accessed: 02.10.2024)
15. Четверик М.С., Бабий Е.В., Левицкий А.П. Технология предобогащения в карьерах как перспективное направление добычи магнитных и окисленных руд. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2011;(1):99–105. Режим доступа: https://giab-online.ru/files/Data/2011/1/Chetverik_1_2011.pdf (дата обращения: 02.10.2024).
Chetverik M.S., Babii E.V., Levitskiy A.P. A technology of preconcentration in the open-pits as an upcoming trend of mining the magnetic and oxidized ores. *Mining Information and Analytical Bulletin*. 2011;(1):99–105. (In Russ.) Available at: https://giab-online.ru/files/Data/2011/1/Chetverik_1_2011.pdf (accessed: 02.10.2024).
16. Shibaeva D.N., Kompanchenko A.A., Tereshchenko S.V. Analysis of the effect of dry magnetic separation on the process of ferruginous quartzites disintegration. *Minerals*. 2021;11(8):797. <https://doi.org/10.3390/min11080797>
17. Тишков С.В., Волков А.Д., Кулаков К.А., Щипцов В.В. Совершенствование методов эколого-экономической оценки процессов добычи и переработки железной руды корпораций арктической зоны России на основе математического моделирования. *Горная промышленность*. 2022;(2):112–119. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2022-2-112-119>
Tishkov S.V., Volkov A.D., Kulakov K.A., Shchiptsov V.V. Improvement of environmental and economic assessment methods of mining and processing of iron ore by corporations of the Arctic zone of the Russian Federation based on mathematical modeling. *Russian Mining Industry*. 2022;(2):112–119. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2022-2-112-119>
18. Соколов Ю.И. Арктика: к проблеме накопленного экологического ущерба. *Арктика: экология и экономика*. 2013;(2):18–27. Режим доступа: <http://arctica-ac.ru/article/317/> (дата обращения: 02.10.2024).
Sokolov, Y.I. Arctic: Problem of the accumulated environmental damage. *Arctic: Ecology and Economy*. 2013;(2):18–27. (In Russ.) Available at: <http://arctica-ac.ru/article/317/> (accessed: 02.10.2024).
19. Терещенко С.В., Марчевская В.В., Шибаева Д.Н., Аминов В.Н. Ресурсосберегающая технология обогащения апатит-нефелиновых руд Хибинского массива. *Обогащение руд*. 2018;(3):32–38. <https://doi.org/10.17580/or.2018.03.06>
Tereshchenko S.V., Marchevskaya V.V., Shibaeva D.N., Aminov V.N. Resource-saving dressing technology for apatite-nepheline ores of the Khibiny massif. *Obogashchenie Rud*. 2018;(3):32–38. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/or.2018.03.06>

20. Терещенко С.В., Шибаева Д.Н., Бычков С.А., Мотова М.К. *Способ сухой магнитной сепарации магнетитсодержащих руд*: Патент №2777313 С1 Российская Федерация, № 2021119152, заявл. 29.06.2021, опубл. 02.08.2022.
21. Шибаева Д.Н., Терещенко С.В., Асанович Д.А., Шумилов П.А. К вопросу о необходимости классификации горной массы, направляемой на сухую магнитную сепарацию. *Записки Горного института*. 2022;256:603–612. <https://doi.org/10.31897/PMI.2022.79>
Shibaeva D.N., Tereshchenko S.V., Asanovich D.A., Shumilov P.A. On the need to classify rock mass fed to dry magnetic separation. *Journal of Mining Institute*. 2022;256:603–612. <https://doi.org/10.31897/PMI.2022.79>
22. Машковцев Г.А. (ред.) *Новые минерально-сырьевые металлургические комплексы России: (краткий обзор)*. М.: ВИМС; 2007. 44 с.
23. Пожиленко В.И., Гавриленко Б.В., Жиров Д.В., Жабин С.В. *Геология рудных районов Мурманской области*. Апатиты: Изд-во Кольского научного центра РАН; 2002. 359 с. Режим доступа: <https://www.geokniga.org/books/766> (дата обращения: 02.10.2024).
24. Голиков Н.Н., Горяинов П.М., Иванюк Г.Ю., Яковенчук В.Н., Пахомовский Я.А. Золотоносность железистых кварцитов Оленегорского месторождения (Кольский полуостров, Россия). *Геология рудных месторождений*. 1999;41(2): 162–170.
Golikov N.N., Goryainov P.M., Ivanyuk G.Yu., Yakovenchuk V.N., Pakhomovskii Ya.A. Gold content in ferruginous quartzites of the Olenegorskoye deposit (Kola Peninsula, Russia). *Geologiya Rudnykh Mestorozhdenii*. 1999;41(2):162–170. (In Russ.)
25. Козлов Н.Е., Сорохтин Н.О., Глазнев В.Н., Козлова Н.Е., Иванов А.А., Кудряшов Н.М. и др. *Геология архея Балтийского щита*. СПб.: Наука; 2006. 345 с. Режим доступа: <https://www.geokniga.org/books/12507> (дата обращения: 02.10.2024).
26. Калашников А.О. *Структурно-вещественная упорядоченность геологических объектов как поисковый критерий эндогенных месторождений*: дис. ... канд. геол.-минер. наук. Воронеж; 2009. 189 с.
27. Богачевская Ж.Я., Богданова И.П., Гехт М.И., Глухоедов Н.В., Гордеева В.А., Григорьев В.М. и др. *Методические рекомендации по изучению вещественного состава и обогатимости железных руд*. М.: Уралмеханобр; 1971. 197 с.
28. Qin Y., Yao Z., Ruan J., Xu Z. Motion behavior model and multistage magnetic separation method for the removal of impurities from recycled waste plastics. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*. 2021;9(32):10920–10928. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.1c03580>
29. Павлишина Д.Н. *Управление качеством руд с использованием радиометрических методов контроля содержания полезных компонентов (на примере месторождения «Олений Ручей»)*: дис. ... канд. техн. наук. Апатиты; 2016. 143 с.

Информация об авторах

Шибаева Дарья Николаевна – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, Горный институт Кольского научного центра Российской академии наук, г. Апатиты, Российская Федерация; <https://orcid.org/0000-0002-3974-0140>; e-mail: shibaeva_goi@mail.ru

Асанович Данил Алексеевич – ведущий инженер, Горный институт Кольского научного центра Российской академии наук, г. Апатиты, Российская Федерация; e-mail: asanovichdnja1@mail.ru

Малодушев Кирилл Андреевич – программист 1-й категории, Горный институт Кольского научного центра Российской академии наук, г. Апатиты, Российская Федерация; e-mail: cheetos1616@mail.ru

Шамшура Данила Алексеевич – программист 2-й категории, Горный институт Кольского научного центра Российской академии наук, г. Апатиты, Российская Федерация; e-mail: nik.strelkovich@bk.ru

Information about the authors

Darya N. Shibaeva – Cand. Sci. (Eng.), Leading Research Associate, Mining Institute of the Kola Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Apatity, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0002-3974-0140>; e-mail: shibaeva_goi@mail.ru

Danil A. Asanovich – Lead Engineer, Mining Institute of the Kola Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Apatity, Russian Federation; e-mail: asanovichdnja1@mail.ru

Kirill A. Malodushev – Software Programmer, 1st Category, Mining Institute of the Kola Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Apatity, Russian Federation; e-mail: cheetos1616@mail.ru

Danila A. Shamshura – Software Programmer, 2nd Category, Mining Institute of the Kola Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Apatity, Russian Federation; e-mail: nik.strelkovich@bk.ru

Article info

Received: 14.10.2024

Revised: 25.11.2024

Accepted: 03.12.2024

Информация о статье

Поступила в редакцию: 14.10.2024

Поступила после рецензирования: 25.11.2024

Принята к публикации: 03.12.2024