

УДК 622.7:681.5

Загирный Вячеслав Анатольевич

аспирант,
кафедра разработки месторождений
открытым способом,
Уральский государственный
горный университет,
620144, г. Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30;
руководитель проектов,
ООО «ЕвразТехника ИС»,
624351, г. Качканар, ул. Крылова, 6
e-mail: VZagirny@mail.ru

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПОДХОДОВ К УПРАВЛЕНИЮ КАЧЕСТВОМ РУДОПОТОКОВ В УСЛОВИЯХ АО «ЕВРАЗ КГОК» НА ОСНОВЕ ГЕОМЕТАЛЛУРГИИ

Аннотация:

В статье представлен инновационный геометаллургический подход к управлению качеством рудопотоков на примере ЕВРАЗ Качканарского горно-обогатительного комбината (КГОК). Исследование направлено на решение актуальной проблемы обеспечения стабильности качественных характеристик минерального сырья в условиях высокой вариативности руд.

Разработана комплексная интегрированная система управления производством, включающая пять взаимосвязанных компонентов: автоматизированное планирование горных работ, центр управления производством, оперативное управление железнодорожным транспортом и автосамосвалами, систему прослеживаемости качественных показателей на дробильно-обогатительной фабрике.

Ключевым результатом является создание трехмерной блочной модели перегрузочных пунктов, позволяющей в режиме реального времени определять качественные характеристики рудного материала с учетом координат разгрузки и черпания и обеспечить прослеживаемость качественных показателей руды, поступающей на дробильную фабрику. Опытное внедрение системы подтверждает ее эффективность, что выразилось в снижении потерь железа в хвостах и повышении стабильности технологических процессов.

Научная новизна заключается в разработке методологии сквозного управления качеством рудопотоков на основе цифровых технологий, которая может быть адаптирована для различных горнодобывающих предприятий.

Ключевые слова: геометаллургия, рудопотоки, качество руды, цифровая трансформация, блочное моделирование, управление производством, автоматизация, прослеживаемость, информационные системы.

DOI: 10.25635/2313-1586.2025.04.044

Zagirnyi Vyacheslav A.

Postgraduate Student
of the Open-pit Mining Department,
Ural State Mining University,
620144 Ekaterinburg, 30 Kuibysheva Str.;
Project Manager,
«Evraztechnika IS» LLC,
624351 Kachkanar, 6 Krylova str.
e-mail: VZagirny@mail.ru

IMPROVEMENT OF APPROACHES TO QUALITY MANAGEMENT OF ORE FLOWS IN THE CONDITIONS OF JSC EVRAZ KGOK, GEOMETALLURGY

Abstract

The article presents an innovative geometallurgical approach to ore flow quality management using the example of EVRAZ Kachkanar Mining and Processing Plant (KGOK). The study aims to address the critical problem of ensuring the stability of mineral raw materials' quality characteristics under conditions of high ore variability.

A comprehensive integrated production management system has been developed, including five interconnected components: automated mining operations planning, production management center, operational management of truck and railway transport, and a traceability system for quality indicators at the crushing and processing plant.

The key result is the creation of a three-dimensional block model of transshipment points, enabling real-time determination of ore material quality characteristics, taking into account unloading and excavation coordinates, and ensuring traceability of ore quality indicators entering the crushing plant. Pilot implementation of the system confirms its effectiveness, manifested in reducing iron losses in tailings and improving the stability of technological processes.

The scientific novelty lies in developing a methodology for end-to-end ore flow quality management based on digital technologies, which can be adapted for various mining enterprises.

Key words: geometallurgy, ore flows, ore quality, digital transformation, block modeling, production management, automation, traceability, information systems.

Введение

Эффективное управление качеством рудопотоков является критически важным фактором обеспечения стабильной работы горно-обогатительных предприятий. Высокая вариативность качественных характеристик исходного сырья приводит к снижению производительности обогатительных фабрик, увеличению потерь полезных компонентов в хвостах и ухудшению технико-экономических показателей производства в целом.

Анализ текущего состояния производственных систем выявил следующие ключевые проблемы традиционного подхода к планированию и управлению качеством рудопотоков:

1. Разнородность и несогласованность данных о качестве руд. Информация о качественных характеристиках сырья на добычных и обогатительных переделах поступает с различной дискретностью и атомарностью, что затрудняет формирование целостного представления о материальных потоках.

2. Фрагментарность программного обеспечения. Использование разнородного программного обеспечения на различных этапах производственного цикла создает технологические барьеры для интеграции информационных потоков и снижает оперативность обмена данными.

3. Изолированность информационных систем управления. Системы автоматизации, контроля и управления на добывающих и обогатительных переделах функционируют разрозненно, без должного уровня интеграции и синхронизации, что препятствует формированию единого информационного пространства.

4. Отсутствие механизмов оперативного реагирования. Изолированность информационных систем исключает возможность своевременного реагирования на изменения, происходящие на смежных переделах.

Указанные проблемы приводят к невозможности обеспечения прослеживаемости и управления стабильностью качественных показателей сырья, поступающего на дробильно-обогатительную фабрику (ДОФ), что негативно отражается на производительности и экономической эффективности производства.

Для повышения стабильности качественных показателей руды и снижения вариативности на ЕВРАЗ КГОКе реализуется концепция геометаллургии, под которой понимается оптимизация шихтования путем сквозного управления технологической цепочкой «рудуправление – автомобильный транспорт – железнодорожный транспорт – дробильно-обогатительная фабрика» для получения экономических эффектов за счет снижения потерь в хвостах магнитной сепарации и повышения производительности секций цеха обогащения.

Теория, материалы и методы исследования

Применение цифровых решений обеспечивает базу для формирования многокомпонентных производственных систем интеграционного типа.

В современных условиях эволюция цифровой сферы, включающая промышленные IoT-решения (IIoT), аналитические платформы для работы с большими объемами информации (Big Data) и инструменты машинного интеллекта, формирует принципиально новые перспективы для создания многоуровневых интеграционных моделей в горнодобывающей и перерабатывающей отраслях [2 – 4].

Возможности, предоставляемые актуальными технологическими решениями [1, 10], следующие:

1. Организация постоянного анализа качественных параметров рудного материала на каждом производственном этапе.

2. Установление многоуровневых взаимосвязей между геологическим строением рудных залежей и эффективностью технологических процессов переработки.

3. Применение прогнозных моделей для предвидения трансформации показателей переработки при вариации свойств сырьевого материала и настроек технологического оснащения.

4. Формирование систем поддержки управленческих решений для динамичного реагирования на вариативность качественных характеристик поступающего сырья.

Геометаллургический подход к управлению качеством рудопотоков на ЕВРАЗ КГОКе

ЕВРАЗ КГОК – крупнейший производитель железорудного сырья в России, где добыча руды ведется открытым способом в пяти карьерах. Горная масса транспортируется из забоя автосамосвалами грузоподъемностью 130 – 240 т на перегрузочные пункты, откуда железнодорожным транспортом доставляется на ДОФ (рис. 1). Содержание железа в рудах месторождения колеблется в пределах 14 –16 %, пятиокиси ванадия – 0,12 - 0,14 %. Качественные характеристики руды в карьерах имеют значительную вариативность, что определяет критическую важность усреднения качественных показателей сырья, поступающего на фабрику.

Производственная цепочка ЕВРАЗ КГОК

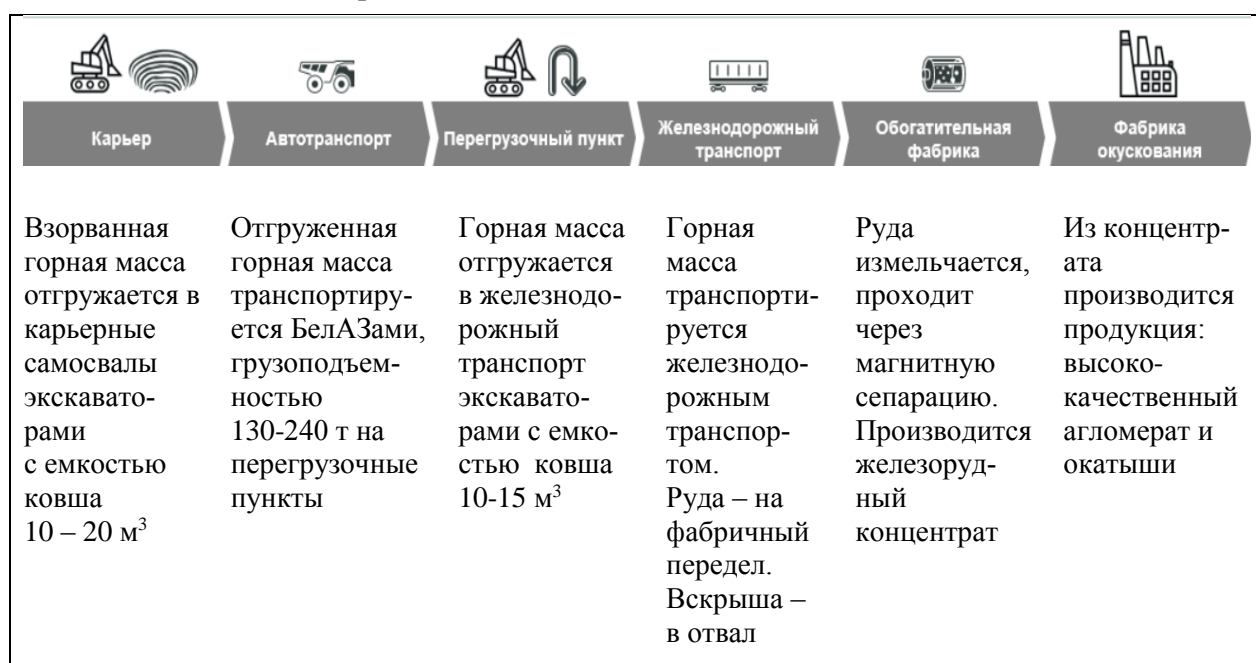


Рис. 1. Производственная цепочка ЕВРАЗ КГОКа

Понятие геометаллургии на ЕВРАЗ КГОКе предусматривает единый подход к управлению качественными показателями рудопотоков на всех этапах производственно-технологической цепи. В рамках данного направления осуществляется выполнение совокупности взаимосвязанных задач (рис. 2):

- автоматизация системы календарного планирования горных работ на горизонте недельно-сменного графика (НСГ);
- создание организационной структуры «Центра управления производством» (ЦУП);
- оперативное управление парком автосамосвалов посредством модуля оперативного управления (МОУ);
- диспетчеризация и оперативное управление тяговыми агрегатами (ТА);
- обеспечение прослеживаемости качественных характеристик рудного сырья на ДОФ.

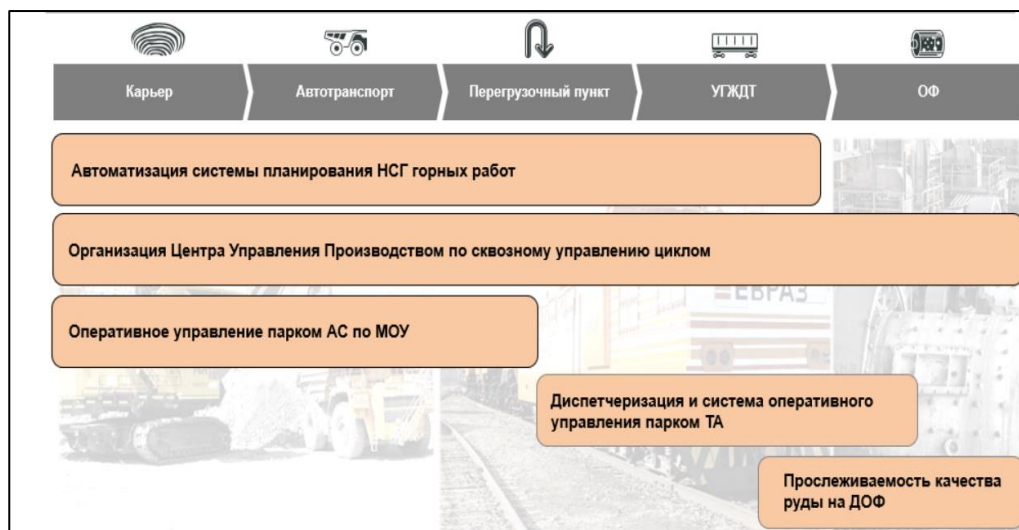


Рис. 2. Проекты, реализуемые на ЕВРАЗ КГОКе

Далее представлено детализированное описание пяти проектов, реализуемых для решения указанных задач.

1. Автоматизация системы календарного планирования горных работ на горизонте недельно-сменного графика (НСГ)

Проект завершен и внедрен в промышленную эксплуатацию. Разработано программное обеспечение для оперативного, эффективного и эргономичного планирования работы экскаваторного парка на карьерных разработках. Возможности программного обеспечения позволяют на этапе планирования определять оптимальную пространственную схему размещения горнотранспортного оборудования и рациональную последовательность отработки горных уступов (рис. 3).

Рабочие задачи программного обеспечения: разработка способов размещения горнотранспортного оборудования с учетом всей совокупности ограничивающих условий, а также определение оптимальной очередности ведения горных работ.

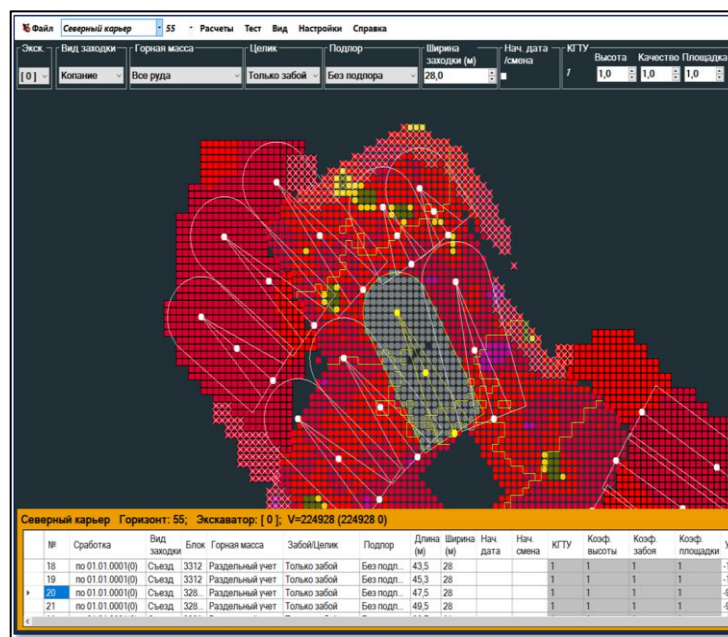


Рис. 3. Графический редактор экскаваторных заходок системы календарного планирования НСГ

2. Организация Центра управления производством (ЦУП)

Создана организационная структура ЦУП для сквозного управления технологическими процессами. Сформировано единое информационное пространство для диспетчерского персонала с целью обеспечения оперативного информационного обмена и повышения качества управленческих решений (рис. 4). Проведена реорганизация структуры производственного подразделения комбината.



Рис. 4. Центр управления производством ЕВРАЗ КГОК

3. Оперативное управление парком автосамосвалов через модуль оперативного управления (МОУ)

Выполнение данного направления представляет собой совокупность взаимосвязанных задач, направленных на повышение прослеживаемости рудопотоков и оперативное регулирование качественных показателей минерального сырья.

На основе геологической информации система определяет вещественный состав и качественные характеристики горной массы в зоне работы каждого экскаваторного комплекса (рис. 5). Система диспетчеризации отображает машинисту экскаватора границы сменного задания, определяющие пространственные пределы зоны черпания. Высокоточное определение местоположения экскаваторного оборудования обеспечивает определение качественных показателей горной массы в ковше и, соответственно, в кузове каждого загружаемого автосамосвала.

Модель оптимизации осуществляет распределение автосамосвалов и формирование транспортных путей таким образом, чтобы минимизировать отклонение качественных показателей на перегрузочных складах от целевых значений (рис. 6). Высокоточное определение местоположения автосамосвалов позволяет фиксировать координаты точек разгрузки и формировать блочную модель перегрузочного склада.

На начальном этапе реализации была разработана и внедрена двумерная блочная модель перегрузочного пункта, обеспечивающая расчет усредненных качественных характеристик рудного материала по всем участкам перегрузочных пунктов (рис. 7).

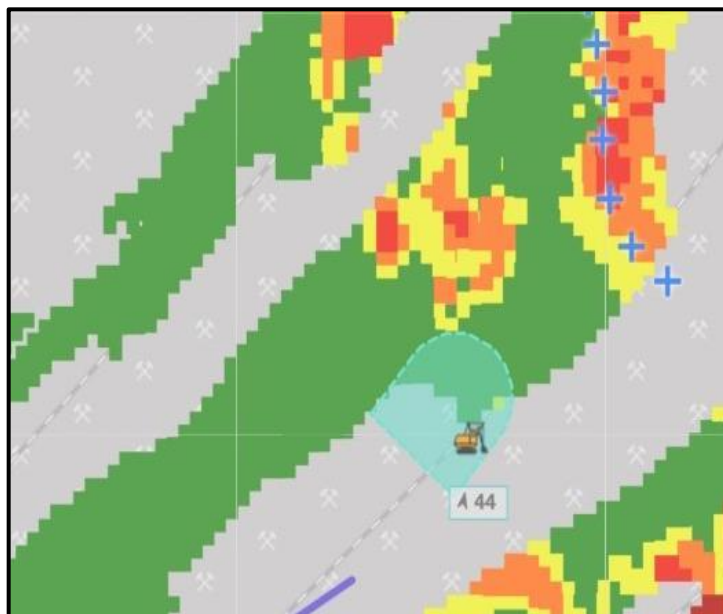


Рис. 5. Визуализация блочной модели и контура сменного задания на панели машиниста экскаватора

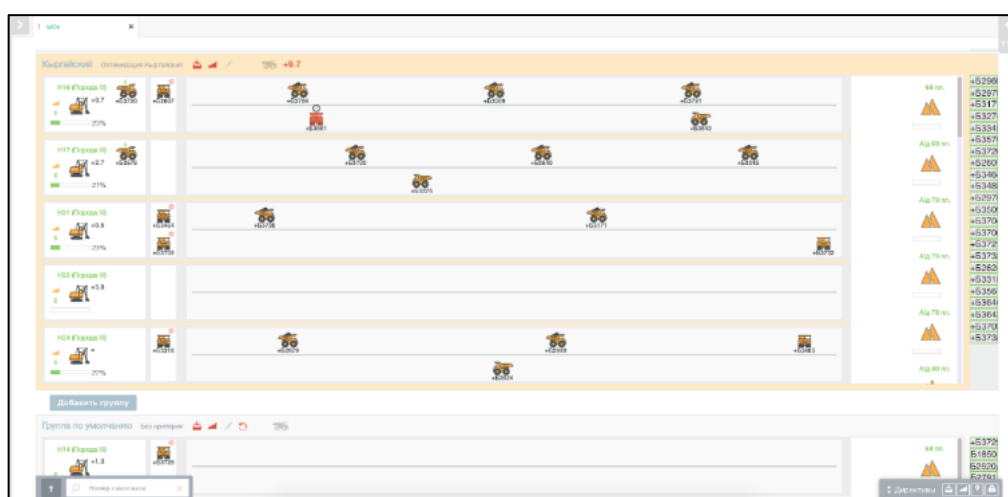


Рис. 6. Визуализация модуля оперативного управления самосвалами

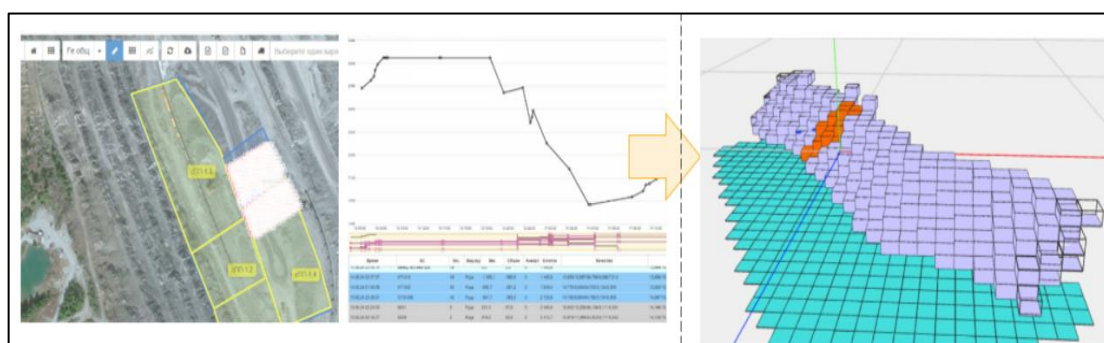


Рис. 7. Переход от двухмерной к трехмерной блочной модели перегрузочных пунктов

В настоящее время опытную эксплуатацию проходит трехмерная блочная модель, построенная на основе данных о координатах разгрузки автосамосвалов в различных зонах участка фронта разгрузки с учетом качественных показателей по черпаниям экскаватора на перегрузочном пункте (рис. 8).

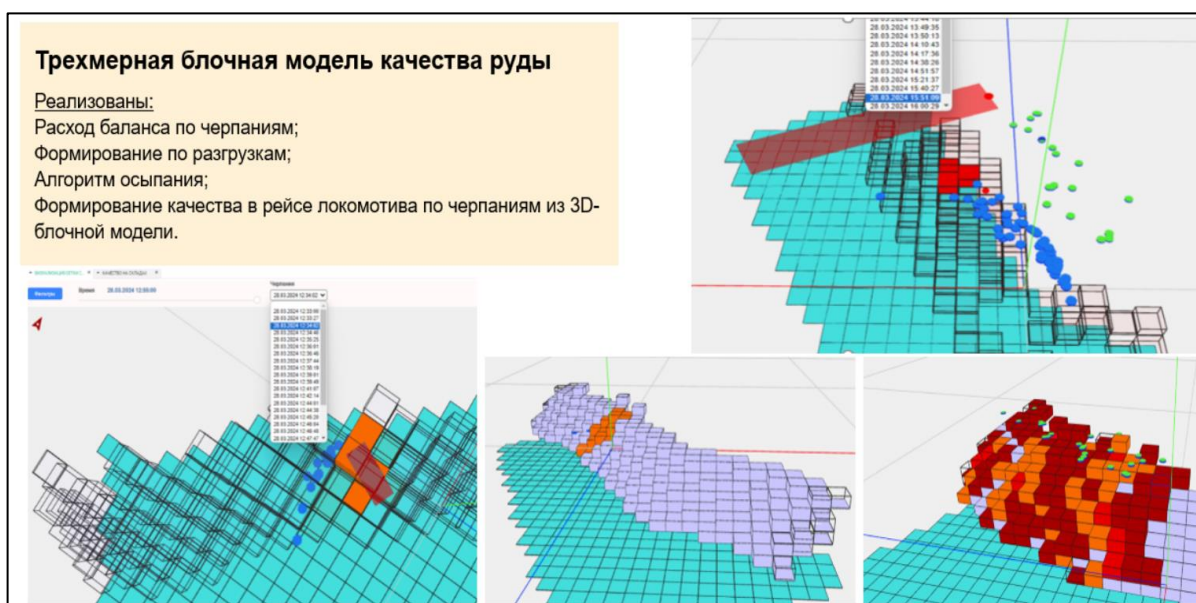


Рис. 8. Трехмерная блочная модель перегрузочного пункта

В рамках создания трехмерной блочной модели разработаны следующие возможности:

- формирование модели по операциям разгрузки;
- моделирование процессов осыпания горной массы;
- расчет баланса по операциям черпания;
- определение качественных показателей в рейсе локомотивосостава на основе черпаний из трехмерной блочной модели.

На следующем этапе экскаваторный комплекс осуществляет погрузку усредненного рудного материала с фиксацией информации о качественных показателях каждого черпания в локомотивосостав для транспортировки на дробильную фабрику. Таким образом обеспечивается непрерывная прослеживаемость качественных характеристик рудного сырья на участке от забоя до перегрузочного пункта.

Текущее состояние

Система формирования блочных моделей перегрузочных пунктов находится в стадии опытно-промышленной эксплуатации.

4. Диспетчеризация и оперативное управление парком железнодорожного транспорта

Основные задачи программы:

- оснащение локомотивов системами высокоточного определения местоположения (рис. 9);
- построение карты рабочего времени (КРВ) локомотивосоставов;
- обеспечение прослеживаемости качественных и количественных показателей рудного материала от момента погрузки на перегрузочном пункте до разгрузки на дробильно-обогадательной фабрике.

Текущее состояние

Система находится в стадии опытно-промышленной эксплуатации.



Рис. 9. Оснащение локомотивов системами позиционирования

5. Система управления производственными процессами ЕВРАЗ КГОКа

представляет собой единую систему управления производственными процессами, обеспечивающую контроль и координацию выполнения производственных операций в режиме реального времени.

В рамках геометаллургической концепции выполнено два рабочих раздела.

Выполненные разделы:

- раздел ввода данных о разгрузках рудного материала;
- раздел отображения качественных показателей мелкодробленой руды в бункерах цеха обогащения.

Принцип работы системы

Информационное обеспечение системы осуществляется в смешанном режиме: часть данных (временные показатели погрузки, качественные характеристики) поступает в автоматическом режиме, часть информации вводится вручную работниками фабрики крупного дробления. Данное построение системы обеспечивает возможность прогнозирования качественных показателей мелкодробленой руды в бункере в режиме реального времени (рис. 10) на основании геологических данных, что позволяет осуществлять упреждающее управление качественными показателями рудного сырья на этапе обогащения.

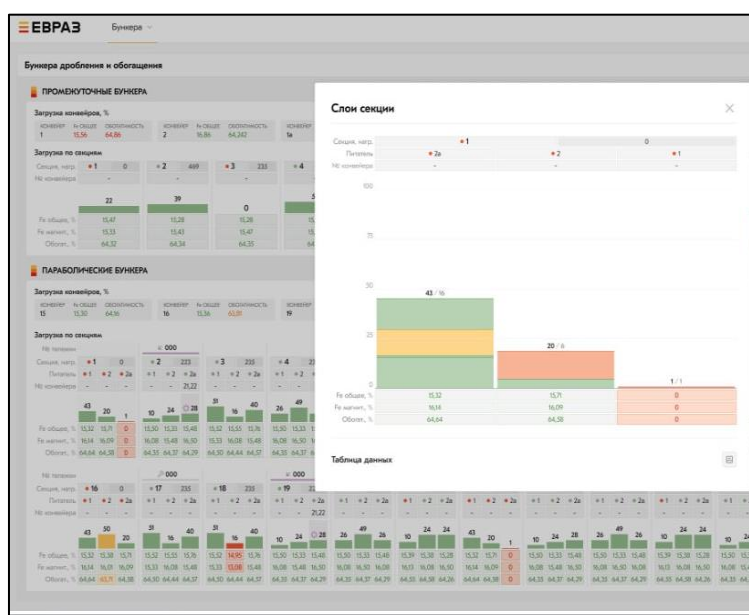


Рис. 10. Визуализация послойного наполнения бункера дробленой рудой с учетом геологических качественных показателей

Текущее состояние

Система находится в стадии опытно-промышленной эксплуатации.

Выполнение данной совокупности взаимосвязанных задач обеспечивает сквозную прослеживаемость качественных характеристик рудного сырья на всех этапах производственно-технологической цепи – от забоя до поступления на обогащение, что является основой для оптимизации технологических процессов и повышения эффективности производства.

Результаты

Практическая значимость и востребованность

Разработана и обоснована концепция геометаллургического подхода к управлению качеством рудопотоков, обеспечивающая единое информационное пространство и сквозную прослеживаемость качественных характеристик минерального сырья на всех этапах производственно-технологической цепи – от забоя до поступления на обогащение.

Создана интегрированная система управления производством, включающая пять взаимосвязанных компонентов:

- автоматизированную систему календарного планирования горных работ на основе НСГ;
- организационную структуру центра управления производством;
- средства оперативного управления автосамосвальным парком;
- систему диспетчеризации железнодорожного транспорта;
- систему прослеживаемости качественных показателей на ДОФ.

Реализована трехмерная блочная модель перегрузочных пунктов, позволяющая в режиме реального времени определять качественные показатели рудного материала с учетом координат разгрузки автосамосвалов и черпаний экскаваторов, что обеспечивает точное управление процессами усреднения руды.

Опытное внедрение системы на ЕВРАЗ КГОКе подтвердило практическую эффективность разработанного подхода. Достигнуты значительные экономические эффекты за счет снижения содержания Fe в хвостах, оптимизации режимов работы фабрики и обеспечения стабильности качественных характеристик поступающего сырья. По результатам опытно-промышленной эксплуатации (период сравнения: 12 месяцев) установлены следующие эффекты: содержание железа в хвостах магнитной сепарации снизилось с 6,35 до 6,26 % (снижение на 0,09 процентных пункта), что соответствует уменьшению потерь железа на 1,5 % в абсолютном выражении.

Сходимость прогнозируемых и фактических показателей качества рудного материала в системе управления производственными процессами подтверждает корректность применяемых математических моделей и алгоритмов, что открывает возможности для упреждающего управления качеством на этапе обогащения.

Установлена перспективность дальнейшего развития интегрированного геометаллургического моделирования в направлении совершенствования методов прогнозирования качества руд, развития алгоритмов интеграции информационных систем и создания специализированных цифровых платформ для горнодобывающей промышленности.

Заключение

В рамках проведенного исследования разработана и обоснована концепция геометаллургического управления качеством рудопотоков, трансформирующая подходы к организации производственных процессов в горнодобывающей отрасли.

Выявлены системные проблемы традиционных методов управления качеством минерального сырья: разобщенность информационных систем, фрагментарность программного обеспечения и отсутствие механизмов оперативного реагирования.

Разработана интегрированная методология сквозного геометаллургического

управления, включающая пять взаимосвязанных компонентов: систему недельно-сменного календарного планирования, центр управления производством, средства оперативного управления автотранспортом, систему диспетчеризации железнодорожного транспорта и систему прослеживаемости качественных показателей на ДОФ.

Ключевым научным результатом является разработка и интеграция с информационными системами переделов трехмерной блочной модели перегрузочных пунктов, обеспечивающей управление процессами усреднения руды в режиме реального времени с учетом координат разгрузки и черпания.

Промышленное внедрение на ЕВРАЗ КГОКе подтвердило практическую эффективность разработанного подхода. Анализ результатов опытно-промышленной эксплуатации (12 месяцев) выявил снижение содержания железа в хвостах магнитной сепарации с 6,35 до 6,26 %, что соответствует уменьшению потерь железа на 1,5 % в абсолютном выражении.

Список литературы

1. Корнилков С.В., Рыбников П.А., Рыбникова Л.С., 2025. Об основных направлениях взаимодополнения методов цифровизации и геоинформационного обеспечения горного производства. *Proceedings of Higher Educational Establishments: Geology and Exploration*, Т. 67, № 1, С. 76-85. DOI: <https://doi.org/10.32454/0016-7762-2025-67-1-76-85>
2. Соколов И.В., Корнилков С.В., Панжин А.А., 2023. Геоинформационные технологии сопровождения процессов горного производства. *Горная промышленность*, № S5, С. 41-46. DOI: <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-S5-41-46>
3. Мышлецов А.И., Авруцкая С.Г., 2023. Цифровые технологии и устойчивое развитие в горнодобывающей отрасли. *Успехи в химии и химической технологии*, № 1 (263), С. 1-5.
4. Мишулович П.М., Петров С.В., 2019. Методологические аспекты создания геолого-технологических моделей месторождений полезных ископаемых. *Вестник СПбГУ. Науки о Земле*, № 2, С. 1-10. DOI: <https://doi.org/10.21638/spbu07.2019.205>
5. Яковлев В.Л., Лаптев Ю.В., Яковлев А.М., 2015. Методика геометризации качественных характеристик Гусевгорского месторождения титаномагнетитовых руд. *Горный информационно-аналитический бюллетень*, № 11, С. 1-8. DOI:10.18454/2313-1586.2014.02.174
6. Лянгазов С.В., Загирный В.А., 2023. Развитие направления «Геометаллургия». *Горная промышленность*, № 3, С. 12-14.
7. Корнилков С.В., Наговицын О.В., Славиковская Ю.О., Яковлев А.М., Титов Р.С., Мусихина О.В., Лель Ю.И., Исаков С.В., Кантемиров В.Д., 2021. *Планирование открытых горных работ*. Москва: Ай Пи Ар Медиа, 256 с.
8. Rajabinasab B., Asghari O., 2019. Geometallurgical Domainining by Cluster Analysis: Iron Ore Deposit Case Study. *Natural Resources Research*, 28, P. 665–684. <https://doi.org/10.1007/s11053-018-9411-6>
9. Dominy S.C., O'Connor L., Parbhakar-Fox A., Glass H.J., Purevgerel S., 2018. Geometallurgy—A Route to More Resilient Mine Operations. *Minerals*, Vol. 8, № 12. – P. 1-15. DOI: 10.3390/min8120560.
10. Цифровое будущее горнорудного предприятия. *BCG Review*, 2020, Сентябрь. URL: <https://media-publications.bcg.com/BCG-Review-September-2020.pdf> (дата обращения 12.12.2025)
11. Загирный В.А., 2024. Сквозное управление качеством руды может стать одним из основных направлений цифровизации на Урале. *Цифровой промышленный Урал: Форум, Выставка «Рудник»*, Екатеринбург, октябрь. URL: <https://promvest.info/ru/post-relizyi-vyistavok/itogi-foruma-tsifrovoy-promyshlennyiy-ural/> (дата обращения 15.12.2025)

References

1. Kornilkov S.V., Rybnikov P.A., Rybnikova L.S., 2025. Ob osnovnykh napravleniyakh vzaimodopolneniya metodov tsifrovizatsii i geoinformatsionnogo obespecheniya gornogo proizvodstva [About the main directions of complementarity of methods of digitalization and geoinformation support of mining production]. Proceedings of Higher Educational Establishments: Geology and Exploration, Vol. 67, № 1, P. 76-85. DOI: <https://doi.org/10.32454/0016-7762-2025-67-1-76-85>
2. Sokolov I.V., Kornilkov S.V., Panzhin A.A., 2023. Geoinformatsionnye tekhnologii soprovozhdeniya protsessov gornogo proizvodstva [Geoinformation technologies for supporting mining production processes]. Gornaya promyshlennost', № S5, P. 41-46. DOI: <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-5S-41-46>
3. Myshletsov A.I., Avrutskaya S.G., 2023. Tsifrovye tekhnologii i ustoichivoe razvitie v gornodobyvayushchei otrasli [Digital technologies and sustainable development in the mining industry]. Uspekhi v khimii i khimicheskoi tekhnologii, № 1 (263), P. 1-5.
4. Mishulovich P.M., Petrov S.V., 2019. Metodologicheskie aspekty sozdaniya geologo-tekhnologicheskikh modelei mestorozhdenii poleznykh iskopaemykh [Methodological aspects of the construction of geological and technological models of mineral deposits]. Vestnik SPbGU. Nauki o Zemle, № 2, S. 1-10. DOI: <https://doi.org/10.21638/spbu07.2019.205>
5. Yakovlev V.L., Laptev Yu.V., Yakovlev A.M., 2015. Metodika geometrizatsii kachestvennykh kharakteristik Gusevogorskogo mestorozhdeniya titanomagnetitovykh rud [The method of geometrization of qualitative characteristics of the Gusevogorskoye deposit of titanium-magnetite ores]. Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten', № 11, P. 1-8. DOI: 10.18454/2313-1586.2014.02.174
6. Lyangazov S.V., Zagirnyi V.A., 2023. Razvitie napravleniya «Geometallurgiya» [Development of the "Geometry" direction]. Gornaya Promyshlennost', № 3, P. 12-14.
7. Kornilkov S.V., Nagovitsyn O.V., Slavikovskaya Yu.O., Yakovlev A.M., Titov R.S., Musikhina O.V., Lel' Yu.I., Isakov S.V., Kantemirov V.D., 2021. Planirovanie otkrytykh gornykh rabot [Planning of open-pit mining operations]. Moscow: Ai Pi Ar Media, 256 p.
8. Rajabinasab B., Asghari O., 2019. Geometallurgical Domaining by Cluster Analysis: Iron Ore Deposit Case Study. Natural Resources Research, 28, P. 665–684. <https://doi.org/10.1007/s11053-018-9411-6>
9. Dominy S.C., O'Connor L., Parbhakar-Fox A., Glass H.J., Purevgerel S., 2018. Geometallurgy—A Route to More Resilient Mine Operations. Minerals, Vol. 8, № 12. – P. 1-15. DOI: 10.3390/min8120560.
10. Tsifrovoe budushchee gornorudnogo predpriyatiya [The digital future of the mining enterprise]. BCG Review, 2020, Sentyabr'. URL: <https://media-publications.bcg.com/BCG-Review-September-2020.pdf> (data obrashcheniya 12.12.2025)
11. Zagirnyi V.A., 2024. Skvoznoe upravlenie kachestvom rudy mozhет stat' odnim iz osnovnykh napravlenii tsifrovizatsii na Urale [End-to-end ore quality management can become one of the main directions of digitalization in the Urals]. Tsifrovoi promyshlennyyi Ural: Forum, Vystavka «Rudnik», Ekaterinburg, oktyabr'. URL: <https://promvest.info/ru/post-relizyivystavok/itogi-foruma-tsifrovoy-promyshlennyyi-ural/> (data obrashcheniya 15.12.2025)