

РАЗРАБОТКА ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ФОРМИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СХЕМ СТАБИЛИЗАЦИИ КАЧЕСТВА ПОЛЕЗНОГО ИСКОПАЕМОГО

М. Зарубин^{1*}, Л. Стаценко², В. Зарубина³, Е. Фионин⁴

¹Кафедра автоматизации, информационных систем и безопасности, Рудненский индустриальный институт, Рудный, Казахстан

²Институт горного дела и энергоресурсов, Университет Аделаиды, Аделаида, Австралия

³Кафедра экономики и менеджмента, Рудненский индустриальный институт, Рудный, Казахстан

⁴Кафедра металлургии и горного дела, Рудненский индустриальный институт, Рудный, Казахстан

*Ответственный автор: e-mail zarubin_mu@mail.ru, тел. +77054500272

DEVELOPING INFORMATION SYSTEMS OF OPERATION SCHEDULES TO STABILIZE THE GRADE OF A MINERAL

M. Zarubin^{1*}, L. Statsenko², V. Zarubina³, E. Fionin⁴

¹Department of Automatisation, Information System and Safety, Rudny Industrial Institute, Rudny, Kazakhstan

²Institute for Mining and Energy Resources, University of Adelaide, Adelaide, Australia

³Department of Economic and Management, Rudny Industrial Institute, Rudny, Kazakhstan

⁴Department of Metallurgy and Mining, Rudny Industrial Institute, Rudny, Kazakhstan

*Corresponding author: e-mail zarubin_mu@mail.ru, tel. +77054500272

ABSTRACT

Purpose. To develop information technology making it possible to obtain ore flow with the required grade parameters in the context of open-pit mining owing to the implementation of methods and algorithms optimizing operation schedules for ore mass mining and moving.

Methods. The process involved both traditional (i.e. analysis of scientific and patent sources; analytical methods to study parameters of ore flow; analysis of experience and operations of open pits; and passive experiment as well as statistic processing of data) and new forms of scientific research (i.e. simulation modeling with the help of the developed program models).

Findings. Results of the studies made it possible to solve a significant scientific problem concerning stabilization of ore grades in an open pit; to develop new mathematical models concerning the effect of operational parameters of production units, intraopen-pit stabilization warehouses, and traffic flows; to develop new algorithms on the basis of mathematical models; and to implement program packages to optimize operations of stope sites, stope-to-stope traffic flows, and stabilization warehouses.

Originality. The carried-out studies have helped solve significant scientific problem concerning ore grade stabilization in an open pit; new mathematical models concerning the effect of operational parameters of production units, intraopen-pit stabilization warehouses, and traffic flows have been developed; new algorithms on the basis of mathematical models have been obtained; and program packages to optimize operations of stope sites, stope-to-stope traffic flows, and stabilization warehouses have been implemented. The information system use made it possible to improve the accuracy of determination of boundaries between selective mining and complete mining, to optimize both design and parameters of warehouses, and to systemize determination of a mineral disposal by means of transport means.

Practical implications. The program support helps improve the grade of ore flow delivered to preparation complex from open pits at the expense of optimization of operation schedule and technological development in the context of formation of blending piles. That makes it possible to achieve economic effect owing to the extraction of the commercial mineral and decrease in expenditures connected with preparation stage.

Keywords: information system, stabilization of a mineral, selective mining, organization of cargo flows, stabilization warehouse

1. ВВЕДЕНИЕ

Колебания качества руды создают значительные трудности в переработке руды, ухудшая показатели обогащения. Поэтому получение рудопотока на входе обогатительного комплекса с требуемыми параметрами является важной актуальной задачей для любого ГОКа.

Высокие требования к качеству принимаемых управленческих решений в горнорудном производстве определяют остроту необходимости в создании рабочих методов и алгоритмов получения требуемых параметров рудопотока, основанных на информационных технологиях и, соответственно, актуальность проводимых исследований.

На текущем этапе развитие методов и алгоритмов получения рудопотока с требуемыми параметрами для отечественной горнодобывающей промышленности недостаточно. Основными ограничениями их применения являются недостаточная точность моделей по обоснованию точных границ валовой и селективной выемки, конструкции современных складов, не обеспечивающие требуемого параметра усреднения, и бессистемная разгрузка автотранспорта. Использование информационной системы (ИС) позволяет повысить точность определения границ селективной и валовой выемки, оптимизировать конструкции и параметры складов и систематизировать порядок отсыпки полезного ископаемого транспортом. Потенциальными потребителями полученных результатов могут быть как отечественные горнодобывающие предприятия, так и зарубежные ГОКи.

2. АНАЛИЗ ЭТАПОВ ВНУТРИКАРЬЕРНОЙ СТАБИЛИЗАЦИИ КАЧЕСТВА ПОЛЕЗНОГО ИСКОПАЕМОГО

Проблемы внутрикарьерной стабилизации качества руд широко исследованы в фундаментальных и прикладных трудах известных ученых и специалистов. В зарубежной литературе эти вопросы получили освещение в работах (Gy, 1981; Petersen, 2004; Robinson, 2004; Kumral, 2005; Beretta, Costa, & Koppe, 2010; Muller, 2010; Huang & Chen, 2011) и др. В русскоязычной научной литературе – представлены в работах (Bastan, Azbel', & Klyuchkin, 1979; Galiev, 1997; Mosinets & Rubtsov, 2001; Vashlaev & Selivanov, 2004; Vasil'yev, 2007; Tsekhovoy, Zhusupov, & Statsenko, 2009; Shevelev, 2014) и др.

Вопросам оптимизации грузопотоков с целью стабилизации качества рудопотока посвящены работы (Dovzhenok, 2002; Shemetov & Kolomnikov, 2002; Yakubovskiy & Yakubovskiy, 2010; Yakovlev, Tarasov, & Zhuravlev, 2011) и др.

В результате проведенного анализа авторами исследования выявлены этапы, на которых возможна стабилизация качества полезного ископаемого в карьере:

- стабилизация качества на рабочей площадке карьера;
- внутризобойная стабилизация качества;
- стабилизация на этапе формирования схем рудопотока между забоем и усреднительным складом;
- стабилизация на усреднительных внутрикарьерных складах (Рис. 1).



Рисунок 1. Этапы стабилизации качества полезного ископаемого в карьере: * корректировка выполняется в случае невозможности достижения требуемого уровня стабилизации качества на этапе “Усреднительный склад”; ** корректировка выполняется в случае невозможности достижения требуемого уровня стабилизации качества на этапах “Усреднительный склад” и “Автотранспорт”

Буровзрывные и выемочно-погрузочные работы являются первыми технологическими процессами, на которых выполняются операции по снижению разубоживания, потерь полезного ископаемого и стабилизации качества добываемой руды.

Реализация технологических схем стабилизации качества полезного ископаемого включает обоснование параметров сетки скважин, зарядов и схемы коммутации для обеспечения минимальных сдвиговых деформаций контактов полезного ископаемого и вскрыши в скальных горных породах.

Технологические схемы стабилизации качества полезного ископаемого при выемочно-погрузочных работах учитывают положение границ валовой и селективной выемки при отработке контактов залежи в рыхлой и скальной горной массе, предусматривают использование валовой, простой и сложной селективной выемки, штабелирование горной массы в забое экскаватора.

Основные виды карьерного транспорта – железнодорожный карьерный транспорт, автомобильный карьерный транспорт и конвейерный транспорт, применяемые самостоятельно и в различных комбинациях. Реже на карьерах используются канатный, гидравлический карьерный транспорт, скреперные средства доставки. На железорудных карьерах северного Казахстана получили наибольшее распространение автомобильные, железнодорожные и комбинированные автомобильно-железнодорожные транспортные схемы.

Усреднение при транспортировании от забоя до усреднительного склада возможно за счет перераспределения рудопотока в зависимости от требований стабилизации качества полезного ископаемого. Решение данной проблемы возможно за счет использования прогнозных и имитационных моделей, методами линейного и динамического программирования.

Усреднение на внутрикарьерных складах является четвертым основным этапом внутрикарьерной стабилизации качества полезного ископаемого. Согласно выполненной обобщенной классификации склады железных руд в большинстве случаев проектированы по следующим принципам, обусловленным технологическими критериями эффективности горных работ и усреднения в карьерах: по основному назначению – склады-смесители и склады-сортовые аккумуляторы; по функциям – усреднительные и перегрузочные; по сроку службы – стационарные; по потоку руды, проходящему через склад – периодического действия; по месту расположения – внутрикарьерные и поверхностные; в специальной трапецевидной выемке (в приямке); насыпного типа; по способу транспортирования руды на склад и со склада – с автомобильно-железнодорожным транспортом; по техническим средствам отсыпки штабеля – бульдозерные; по используемым техническим средствам разгрузки штабеля – экскаваторные; с наклонно-слоевой структурой формирования штабеля (параллельными наклонными слоями); с продольной отсыпкой (параллельно длинной оси штабеля); с поступательной схемой формирования слоев; с поперечным направлением отгрузки (перпендикулярно к оси

штабеля); работающие в режиме обеспечения наибольшего коэффициента усреднения качества руды; с разгрузкой прибывающих машин на всем фронте формирования штабеля в различных зонах, в зависимости от качества доставленной руды, причем качественные требования по каждой зоне меняются после отсыпки в ней слоя заданной толщины; со случайным поступлением автосамосвалов на склад; с разгрузкой автосамосвалов согласно схеме; с односторонним погрузочным фронтом; с одним погрузочным пунктом.

На территории месторождений северного Казахстана получили распространение внутрикарьерные склады насыпного типа с автомобильно-железнодорожным транспортированием, экскаваторные, с использованием бульдозеров для сталкивания горной массы в штабель наклонно-слоевой структуры формирования штабеля. Использование складов другого типа или затруднительно во внутрикарьерном пространстве или экономически не оправдано.

Поэтому при решении задач усреднения во внутрикарьерных складах выбор оптимальных технологических схем целесообразно свести к оптимизации технологии формирования и отработки складов данного типа. На основании анализа открытых литературных источников, можно заключить, что определяющими параметрами эффективности усреднения на складах указанного типа являются:

- геометрические размеры штабеля – высота, ширина и длина;

- технология формирования и порядок отработки усреднительного штабеля, которая включает режим поступления автосамосвалов на склад и их параметры, порядок разгрузки автосамосвалов, технологию отсыпки слоев штабеля и порядок отработки штабеля.

3. АНАЛИЗ КАЧЕСТВЕННОГО СОСТАВА РУД ЧЕРНЫХ МЕТАЛЛОВ СЕВЕРНОГО КАЗАХСТАНА

Костанайская область – основной железорудный район Казахстана, на ее территории сосредоточено 93% всех запасов железных руд Республики. В связи с этим анализ решено производить только по данным месторождений Северного Казахстана. В северном регионе РК находятся в эксплуатации карьеры: Качарский, Сарбайский, Куржункульский, Соколовский, Лисаковский, и строится Южно-Сарбайский. Известен ряд перспективных месторождений, например, Сорское, Шагыркульское, Адаевское и др.

На Сарбайском месторождении рудные тела на 96% сложены магнетитовыми рудами. Структура магнетитовых руд варьирует от тонко- до крупнозернистой. К главным рудным минералам относятся магнетит, пирит, пироксен, гранат, актинолит, эпидот, кальцит, альбит.

Среднее содержание железа в руде 45.9% (колебания в диапазоне 19 – 55%), серы – 4.05% (колебания в диапазоне 0.5 – 10%), фосфора – 0.14%. Забалансовые запасы руды составляют 100.3 млн т с содержанием железа 28.2%.

При вовлечении в разработку Южного участка Сарбайского и Южно-Сарбайского месторождения

запасы по Сарбайскому месторождению превысят 382 млн т, что обеспечит работу карьеров с годовой производительностью 10 млн т руды на 38 лет.

На Качарском месторождении выделено 39 рудных тел на трех участках – Северном, Южном и Северо-Восточном, мощностью – от 8 до 171 м. В настоящее время вовлечен в разработку карьером первой очереди только Северный участок.

Рудные тела сложены практически полностью первичными магнетитовыми рудами, среди которых выделяются сплошные, вкрапленные, прожилковые. Сплошные руды составляют 40% от общего объема руд. Главными минералами руд являются магнетит, альбит, скаполит, пироксен. Среднее содержание железа в рудах Северного и Южного участков составляет 39.04% (колебания в диапазоне 16 – 55%), серы – 0.53% (колебания в диапазоне 0.1 – 0.7%), фосфора 0.22%.

Запасы руд Качарского месторождения утверждены ГКЗ СССР в 1985 г. Общие геологические запасы по всем трем участкам равны 3957.4 млн т. В настоящее время обеспеченность запасами в границах открытой разработки более 50 лет.

Куржункульское месторождение железных руд считается очень сложным. В рудной зоне выделяются 4 этажа, 9 рудных участков, 292 рудных тела. Месторождение до глубины 380 м будет отрабатываться открытым способом.

Руды представлены магнетитовыми разностями. По текстуре выделяются сплошные однородные и полосчатые, полосчато-вкрапленные, прожилково-брекчиевидные руды. Структура руд преимущественно мелкозернистая. Главные рудные минералы – магнетит и пирит. Содержание железа общего в рудах – от 20 до 64.7%, среднее – 42.53%. Доля магнетитового железа в вещественном составе – 86.5% от общего железа. Содержание серы в руде колеблется от 0.5 до 5.3%, среднее – 2.2%. Среднее содержание фосфора – 0.04%.

По состоянию на 01.01.12 г. остаток запасов в контуре карьера составляет 58 млн т со средним содержанием железа 41.42% (Zarubin, Fionin, & Danilets, 2013).

Стабилизация качества руд Сарбайского и Южно-Сарбайского, Качарского и Куржункульского месторождений должна проводиться по содержанию в руде железа, как полезного компонента и серы, как вредного компонента. Содержание фосфора в рудах незначительно и стабилизации не требует. Необходимость стабилизации обусловлена большим количеством контактов рудных тел и существенными колебаниями содержания, как полезного компонента, так и вредной примеси в разных рудных телах и участках тел.

4. РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ВНУТРИКАРЬЕРНОГО УСРЕДНЕНИЯ

4.1. Разработка моделей усреднения при селективной выемке

Анализ математических моделей, представленных в данных работах, показал, что усреднение и стабилизация качества полезного ископаемого в

рабочих забоях является сложным и многовариантным процессом.

Во-первых, анализ условий усреднения в забоях позволил сделать заключение о сложности осуществления самого процесса усреднения путем дозирования и смешивания, как это должно осуществляться в классическом виде. Это обусловлено сложностью дозирования объемов смешиваемых сортов руд с помощью ковша экскаватора, поскольку практически невозможно контролировать точный объем полезного ископаемого, находящийся в ковше при каждом цикле. Кроме того, сама задача стабилизации качества в забое способна дополнительно значительно снизить производительность экскаватора, которая по данным статистического учета только при одной селективной выемки снижается на 10 – 25% при простой селективной выемке и на 30 – 35% при сложной селективной выемке.

Недостатком усреднения непосредственно в забое является плохая прогнозируемость среднего содержания полезного ископаемого и показателей стабилизации качества из-за нестабильности объема полезного ископаемого в каждом цикле экскавации, отсутствие условий в забое для осуществления необходимой последовательности отсыпки разных сортов полезного ископаемого в штабель и самой инструкции о последовательности операций по смешиванию разных сортов полезного ископаемого, поскольку для этого необходимо в реальном времени рассчитывать значение среднего содержания и показатели стабилизации качества полезного ископаемого в штабеле после отсыпки очередного ковша с учетом дальнейшего смешивания полезного ископаемого при погрузке в транспорт.

Следует отметить, что такие показатели стабилизации качества как:

- $\bar{\alpha}$ – среднее содержание усредняемого компонента;
- σ_a – среднеквадратичное отклонение содержания усредняемого компонента от среднего содержания;
- v_a – коэффициент вариации содержания усредняемого компонента;
- K'_y – коэффициенты усреднения,

предполагают именно целенаправленное смешивание разных по качеству объемов полезного ископаемого с целью получения требуемого качества. Но функции забоя у выемочного оборудования другие, а именно обеспечение отработки горной массы с максимальной производительностью. Таким образом, процессы усреднения в забое в принципе возможны, но само создание штабеля из разных сортов полезного ископаемого и повторная его отработка являются классической переэкскавацией горной массы с рабочими циклами большой продолжительности, поэтому эта операция должна быть по возможности исключена.

Надежность результатов усреднения полезного ископаемого и достижение требуемых показателей стабилизации качества можно гарантированно достичь в следующих за забоем технологических звеньях, которые в большей степени приспособлены для выполнения задачи дозирования и смешивания полезного ископаемого.

Во-вторых, в условиях забоя на месторождениях Республики Казахстан задача стабилизация качества полезного ископаемого практически сводится к снижению потерь и разубоживания полезного ископаемого.

Снижение потерь необходимо для выполнения плановых объемов добычи полезного ископаемого. Снижение разубоживания означает сохранение качества полезного ископаемого, которое в принятых моделях технологических процессов, обеспечивает требуемое качество полезного ископаемого в следующих технологических звеньях.

Анализ математических моделей, применяемых для определения потерь и разубоживания полезного ископаемого показал, что методы оценки потерь при отработке уступа с полезным ископаемым дают корректную оценку значения потерь полезного ископаемого.

При анализе методов и моделей оценки разубоживания полезного ископаемого было установлено, что наибольшее распространение получил метод для оценки разубоживания через коэффициент объемного разубоживания, который определяется по формуле:

$$\rho = \frac{\Delta V}{MH_y + \Delta V - \Delta P}, \quad (1)$$

где:

ΔV – объем породы, попадающей в полезное ископаемое, м³;

M – мощность залежи, м;

H_y – высота уступа, м;

ΔP – потери полезного ископаемого, м³.

Выявлено, что данный метод не соответствует реальным условиям отработки полезного ископаемого в приконтактной зоне.

Объем вскрыши породы, попадающей в полезное ископаемое необходимо относить не к полезному ископаемому на всей горизонтальной мощности залежи, а к объему полезного ископаемого, при отработке нормальной заходки в приконтактной зоне. В этом случае формула (1) для расчета разубоживания должна быть такой:

$$\rho = \frac{\Delta V}{A_{н.з}H_y + \Delta V - \Delta P}, \quad (2)$$

где:

$A_{н.з}$ – ширина нормальной заходки, м.

Следствием проведенного анализа методов оценки является необходимость выделения при отработке каждого контакта залежи зон валовой и селективной выемки. По данному вопросу в рамках исследований подготовлена статья.

В соответствии с календарным планом выполнен анализ методов и математических моделей по стабилизации качества полезного ископаемого при выполнении буровзрывных работ путем минимизации сдвиговых деформаций контактов во взорванной горной массе. Изученные модели позволяют прогнозировать с необходимой степенью надежности зависимости горизонтальных смещений контактов по высоте уступа с учетом запроектированного коэффициента разрыхления горной массы. Приведенные методы и зависимости позволят дать более точную

оценку качественных показателей полезного ископаемого на разных участках развала. Но определенные параметры деформаций контактов требуют уточнения с учетом специфических условий конкретных месторождений.

В обобщенном варианте принято, что входными параметрами любого из модулей в общем виде являются задаваемые векторы X , Y и Z , по которым возможно вычисление векторов выходных параметров X^* , Y^* и Z^* (Рис. 2). Если полученный результат удовлетворяет плановым показателям, то решение считается найденным и передается в информационную систему и может использоваться другими модулями, в противном случае, входные параметры корректируются, и процесс моделирования повторяется.

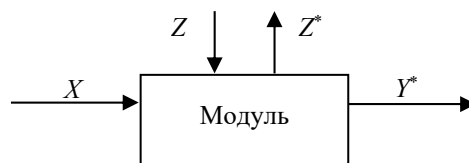


Рисунок 2. Параметрическая модель усреднительного склада: X – вектор параметров рудопотока на входе системы (задаваемые); Z – вектор внутренних параметров системы (задаваемые); Z^* – вектор внутренних параметров системы (требуемые); Y^* – вектор параметров рудопотока на выходе системы (требуемые)

Для модели забоя входными параметрами выбраны: геометрия расположения блоков в забое, процентное содержание полезного ископаемого и примесей в блоках, параметры экскаватора.

Выходным параметром будет поток единичных объемов руд в автотранспорте и их параметры: процент полезного ископаемого и вредных примесей.

Управляющими параметрами выбраны схема экскавации и схема отсыпки в кузов автосамосвала.

4.2. Разработка методов и моделей организации грузопотоков

Анализ методов организации рудопотоков в карьерах при использовании схем с автомобильным, железнодорожным транспортом и смешанных схем с автомобильно-железнодорожным транспортом, предложенных (Galiev, 1997; Dovzhenok, 2002; Shemetov & Kolomnikov, 2002; Yakubovskiy & Yakubovskiy, 2010; Yakovlev, Tarasov, & Zhuravlev, 2011), позволил выделить схемы: с замкнутым циклом движения, с открытым циклом движения и комбинированные схемы.

Для решения задач по определению оптимальных схем рудопотоков применяют задачи линейного программирования и задачи динамического программирования. Проведен анализ методов моделирования на основе линейного и динамического программирования. Основным недостатком первых является невозможности реализации целевой функции с вектором параметров ее значений.

Применительно для месторождений железных руд северного Казахстана при формировании схем рудопотоков, основанных на применении автомобильного и железнодорожного транспорта, наиболее опти-

мальным является использование аппарата динамического программирования.

Для модуля “Транспорт” входными параметрами являются: номер забоя, производительность забоя и процентное содержание полезного ископаемого и вредных примесей в рудопотоке из забоя, требуемые параметры по содержанию полезного ископаемого и вредных примесей для каждого из усреднительных складов, затраты на транспортировку единичного объема рудной массы с i -ого забоя на j -склад.

Выходным параметром является содержание полезного ископаемого и вредных примесей в рудопотоке, поступающих на каждый из складов.

Задаваемыми параметрами является планируемая последовательность во времени по перевозке единичных объемов руды из i -ого забоя на j -склад.

4.3. Разработка методов и моделей организации и работы усреднительных складов

Анализ методов и моделей процесса стабилизации качества полезного ископаемого на усреднительных складах, предложенных Робинсоном, Жи, Кумралом, Вонгсином, Хуангом, Новожиловым, Ломоносовым, Цеховым, Зарайским, Грачевым и др., позволил условно разделить модели на два класса: модели, основанные на методах математической статистики и модели, учитывающие геометрию, технологию формирования и отгрузки штабелей.

Выявлено, что основным недостатком моделей первого типа является отсутствие учета физической природы процесса, исключение из рассмотрения пространственного размещения отдельных порций руды

внутри усреднительного штабеля. Кроме того, такие модели, в большинстве своем, основаны на эмпирических зависимостях, поэтому закономерности, используемые при их построении, нельзя с большой долей уверенности применять для предприятий, добывающих другие виды полезных ископаемых. П.П. Бастан заметил, что “...процессы перемешивания трудно поддаются аналитическому описанию, поэтому эффективность усреднения путем перемешивания следует оценивать экспериментально...” (Bastan, Azbel', & Klyuchkin, 1979).

Модели второго типа более универсальны и могут быть взяты за основу при описании процесса усреднения на складах в разрабатываемой системе.

Кроме того, сделан вывод, что приведенные модели рассматривают задачу организации усреднения на складах изолированно от целостной концепции управления качеством руды в карьере. Отсутствуют работы, описывающие процесс усреднения на внутрикарьерных складах во взаимосвязи с другими процессами карьера и обогащательной фабрики.

Таким образом, наиболее приемлемым методом описания процесса усреднения на складах для условий разработки железных руд в карьерах Северного Казахстана является представление штабеля руды в виде массива, характеризующего элементарные объемы руды.

Описание моделей по параметрам “вход – выход” для забоев, карьерного транспорта и усреднительных складов, применительно к стабилизации качества полезного ископаемого предложено в Таблице 1.

Таблица 1. Входные и выходные параметры моделей процесса усреднения в железорудных карьерах

Рабочая площадка	Забой	Автотранспорт	Усреднительный склад
Векторы входных параметров			
– оперативные планы горных работ в карьере; – модель месторождения	– количество добычных забоев; – данные геологической эксплуатационной разведки; – маркшейдерские данные; – оперативные планы горных работ в карьере; – максимальная производительность добычного оборудования	– количество добычных забоев; – количество усреднительных складов в карьере; – реальная производительность добычного оборудования; – емкость единицы транспортного средства; – процентное содержание полезного ископаемого в отгружаемых объемах; – расстояние от забоя до склада	– параметры транспорта; – процентное содержание полезного ископаемого и вредных примесей в отгружаемых объемах; – геометрические параметры склада (объем, длина, ширина, высота); – текущий объем и процентное содержание руды на складе; – объем руды и процентное содержание в n -ной зоне разгрузки склада
Векторы выходных параметров модуля			
– параметры развалов; – недельно-суточные планы; – параметры заходки экскаватора; – оптимальное расположение забоев в карьере; – параметры буровзрывных работ	– скорректированные недельно-суточные планы горных работ; – реальная производительность добычного оборудования; – номера добычных забоев; – объем и процентное содержание полезного ископаемого и вредных примесей в отгружаемых объемах	– текущий объем и процентное содержание параметров руды на складе; – номер склада для разгрузки автосамосвала	– номер зоны склада для разгрузки автосамосвала; – направление отсыпки и отгрузки штабеля № – среднее содержание полезного ископаемого и вредных примесей в отгружаемых со склада объемах; – колебания процентного содержания полезного ископаемого и вредных примесей в отгружаемых объемах

Для модуля “Усреднительный склад” входными параметрами является последовательность единичных объемов руд, доставляемых автотранспортом на склад, процентное содержание полезного ископаемого и вредных примесей в данных объемах.

Выходными параметрами являются процентное содержание полезного ископаемого и вредных примесей в штабеле склада. Управляющими параметрами является геометрический размер склада и зона разгрузки i -ого автосамосвала.

4.4. Разработка алгоритмов стабилизации качества полезного ископаемого для объекта исследования

В рамках представленной работы выполнены исследования процесса разгрузки транспорта с учетом теории устойчивости штабеля не связанных пород. Результаты исследований позволяют повысить качество смешивания разнотипного полезного ископаемого при разгрузке транспорта.

Технологические разработки этого раздела отчета связаны с разработкой новых паспортов экскаваторных забоев с указанием рациональной последовательности выполнения процесса черпания в забое и порядка формирования штабеля полезного ископаемого в кузове транспорта.

На основе новых технологических схем выемки и погрузки разнотипного полезного ископаемого из сложных забоев разработаны математические модели и алгоритмы усреднения руд в забоях. Результаты расчетов по новым математическим моделям показывают эффективность новых технологически схем стабилизации качества полезного ископаемого по критериям:

- производительность уступных комплексов оборудования;
- показатели стабилизации качества полезного ископаемого.

Проведено исследование и разработан алгоритм управления рудопотоком с использованием открытой транспортной схемы. В работе решена задача динамического программирования по многокритериальной оптимизации рудопотока с учетом как параметров усреднения, так и экономических показателей.

Разработан алгоритм работы по формированию и заполнению усреднительного склада. В словесной форме алгоритм загрузки усреднительного штабеля модели M1 следующий:

1. Рассчитывается требуемый объем склада для размещения руды массой $Q_{шт} = \sum_{i=1}^N Q_i$, где N – количество рудных блоков различного качества, доставленных из работавших за моделируемый период забоев; Q_i – масса руды, доставленной на склад из i -того забоя за моделируемый период, т.

2. Рассчитывается площадь поперечного сечения штабеля.

3. Рассчитывается объем перевозимой одним автосамосвалом руды.

4. Рассчитывается площадь поперечного сечения слоя руды, отсыпаемого одним автосамосвалом.

5. Рассчитывается количество слоев в штабеле.

6. Определяется количество автосамосвалов, необходимых для загрузки штабеля.

7. Формируется “штабель” – трехмерный массив, размерностью $L_{шт} \times 200 \times 70$ (согласно условиям формирования штабеля – $b = 20$ м, $h = 7$ м и выбранному режиму).

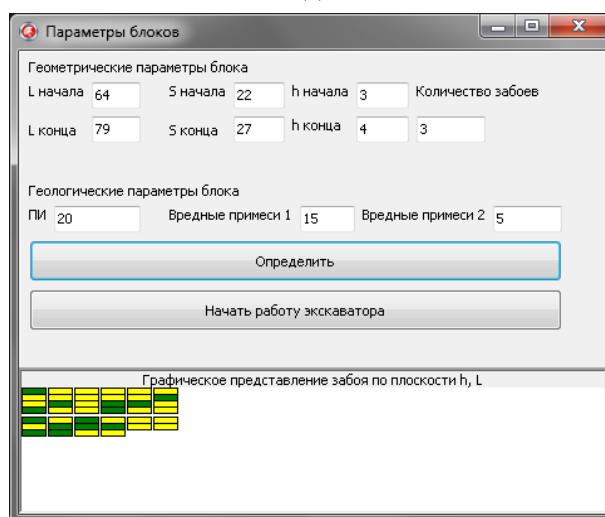
8. Заполняются значениями “–1” элементы массива, представляющие в массиве откос уступа по данному алгоритму.

9. Организуется цикл по количеству автосамосвалов, необходимых для заполнения склада рудой, добытой экскаваторами за моделируемый период.

4.5. Программная реализация математических моделей и алгоритмов стабилизации качества полезного ископаемого

Разработаны в модули программного обеспечения: “Валовая выемка”, “Автотранспорт” и “Усреднительный склад”. На модули “Валовая выемка” и “Усреднительный склад” получены свидетельства о государственной регистрации авторских и смежных прав Министерства Юстиции Республики Казахстан (Рис. 3, 4).

(а)



(б)

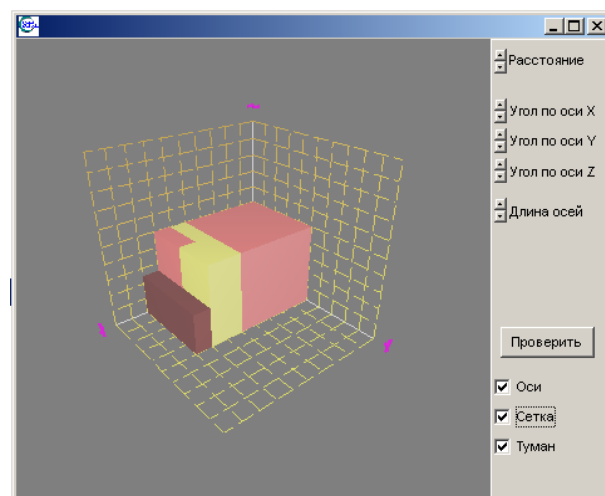


Рисунок 3. Модуль “Валовая выемка”: (а) форма задания параметров блоков забоя; (б) 3D представление забоя

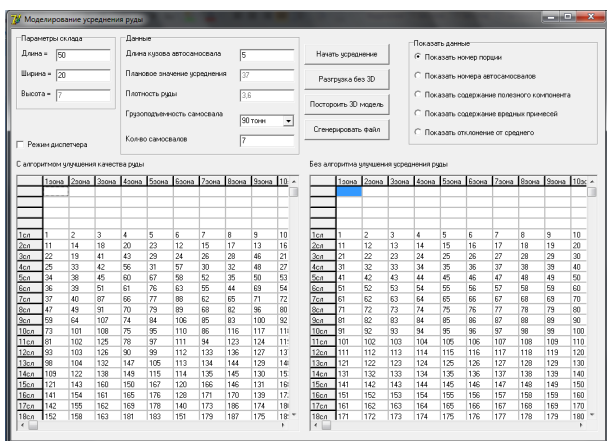


Рисунок 4. Модуль “Усреднительный склад”, версия 1.0

Для оценки адекватности модулей “Трехмерный редактор забоя – Развал” и “Экскавация”, формирующих данные об объеме руды и содержании полезного ископаемого в кузове автосамосвала при выемочно-погрузочных работах (ВПР), проведено моделирование на реальных данных АО “Соколовско-Сарбайское Горно-производственное Объединение”. Полученные результаты при формировании блоков размером до 3 м, совпадают с реальными с точностью порядка 70 – 80%. Деление развала на более мелкие фрагменты оказывается малоэффективным из-за неточностей определения границ различных зон геологом, а также перемешиванием зон при взрывных работах.

Решение задачи оптимизации рудопотока карьера по критериям стабилизации содержания полезного ископаемого, минимизации содержания вредных примесей и минимизации расстояния транспортирования возможно в двух режимах:

– в режиме реального времени по данным оперативных измерений содержания полезного ископаемого и, возможно, вредных примесей (по показаниям

датчиков, как содержания железа, так и массы перевозимого полезного ископаемого);

– в режиме полной информации по автосамосвалам на весь исследуемый период (режим прогнозирования содержания полезного ископаемого и вредных примесей в кузове автосамосвала по данным забоев и работы модуля “Экскавация”).

Решение первой задачи предложено путем расчета вариантов движения автосамосвала на все усреднительные склады с расчетом весовых коэффициентов каждого из оптимизируемых параметров.

Исходные данные о поступлении руды на склад интерпретируются, как случайная последовательность пар чисел с индексами, расположенными в хронологическом порядке:

$$x = \{(\alpha_1, g_1), (\alpha_2, g_2), \dots, (\alpha_n, g_n)\}, \quad (3)$$

где:

α_i, g_i – качество и количество руды i -того элементарного объема.

Задача сведена к определению суммарного веса влияющих параметров для каждого из складов по каждому из автосамосвалов. Проведен анализ подходов к формированию суммарного веса и его влияния на решения по оптимизации. В данном проекте принято решение о том, что вес характеризует отклонение параметра от желаемого значения.

Разработан и программно реализован алгоритм поиска склада, для которого суммарный вес минимален – склад, разгрузка на котором данного автосамосвала будет характеризоваться оптимальным соотношением: минимальными издержками транспортирования и наилучшей стабилизацией качества.

Выявлено, что решение второй задачи возможно методами полного перебора и динамического программирования. Разработан и программно реализован алгоритм решения задачи методом сплошного перебора (упрощенная мнемосхема приведена на Рисунке 5).

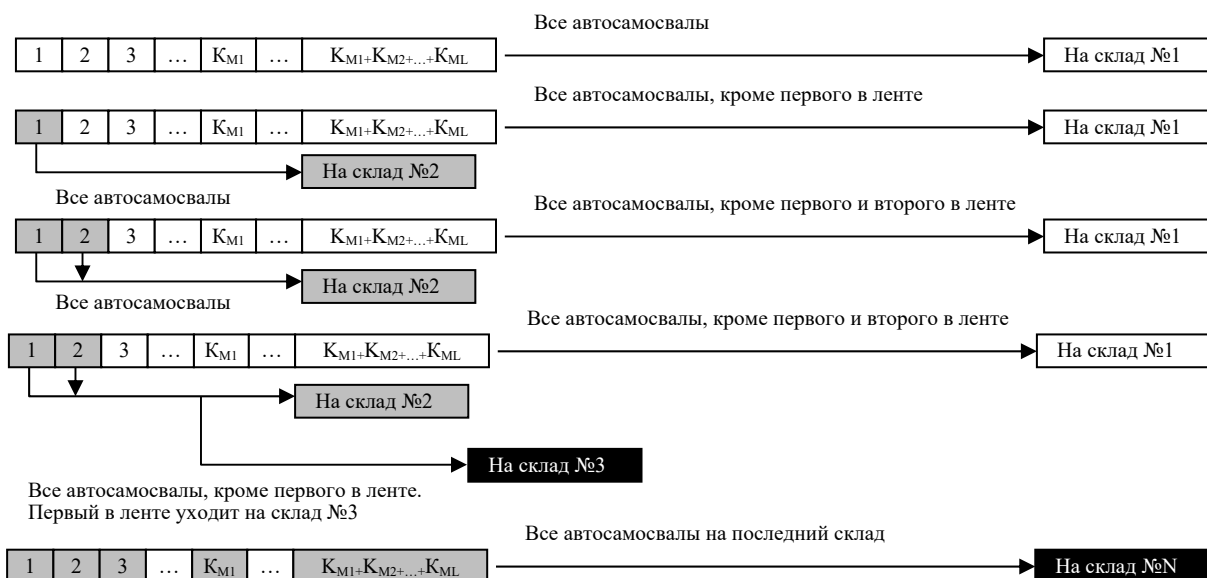


Рисунок 5. Мнемосхема алгоритма полного перебора возможных комбинаций распределения автосамосвалов по складам

Представление информации для переработанных алгоритмов модуля “Автотранспорт” реализовано в разработанной базе данных, реализованной в формате MS Access.

Для оценки адекватности и качества алгоритмов проведены эксперименты по моделированию работы автотранспорта с изменением входных параметров (по одному параметру – железу):

- с небольшим диапазоном колебаний качества железа – от 55 до 60%;
- с существенным диапазоном колебаний качества – от 10 до 60% (на основе реальных значений).

Результаты работы откомпилированного приложения Embarcadero RAD Studio XE представлены на Рисунках 6 и 7.

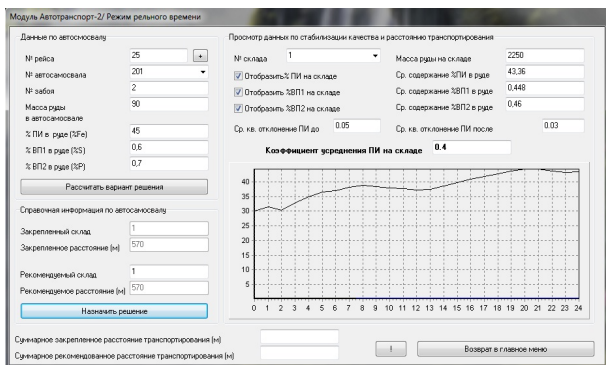


Рисунок 6. Результаты работы программы “Автотранспорт” в режиме реального времени с небольшим диапазоном колебаний качества железа

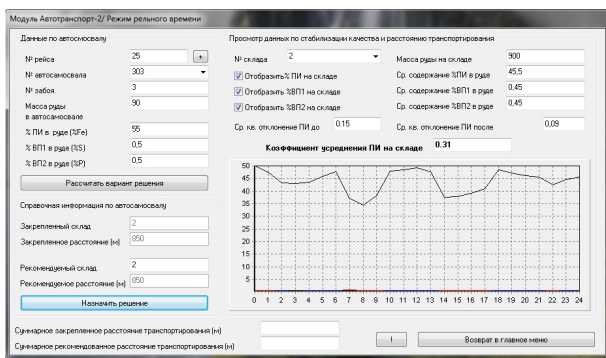


Рисунок 7. Результаты работы программы “Автотранспорт” в режиме реального времени с реальным диапазоном колебаний качества железа

По результатам работы сформирована заявка на государственную регистрацию прав на данный модуль.

Программный модуль “Автотранспорт” доказал возможности оптимизации в решении задачи стабилизации качества полезного ископаемого (по данным моделирования на данных АО “ССГПО” массивах для двух внутрикарьерных складов) и снижения низко- и среднечастотных колебаний на усреднительных складах. В этом случае исключаются длительные и значительные колебания среднего значения содержа-

ния от среднего планового в недельно-суточных планов добычи полезного ископаемого.

Вторым процессом, в результате которого происходит сглаживание высоко и среднечастотных колебаний качества полезного ископаемого является усреднение на внутрикарьерных усреднительных складах.

Для этого переработан модуль “Усреднительный склад”. Объектом управления в модуле “Усреднительный склад” является функция планирования и управления качеством руды на усреднительных складах карьеров. Данные по каждому автосамосвалу вводятся горным диспетчером или выбираются из модуля “Транспорт”. Ограничением для загрузки данных является условие заполненного склада. По результатам работы также сформирована заявка на государственную регистрацию авторских и смежных прав на данный модуль.

Форма модуля “Усреднительный склад”, версии 1.02, с результатами моделирования на данных АО “ССГПО” представлена на Рисунке 8.

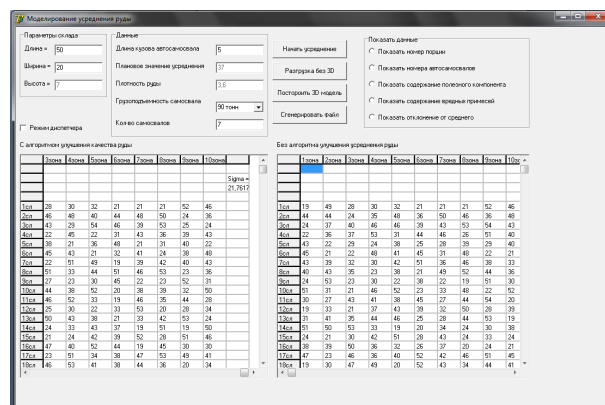


Рисунок 8. Результат усреднения на главной форме модуля “Усреднительный склад”, версия 1.02

На втором этапе переработки с целью повышения качества усреднения в модуле “Усреднительный склад” проработаны алгоритмы последовательного и хаотичного формирования и отсыпки складов. Полученный модуль обозначен как “Усреднительный склад”, версия 1.03.

На основе данных АО “ССГПО” проведены эксперименты по моделированию работы усреднительного склада с изменением его длины на исходных данных, с усреднением:

- 1) по одному параметру – железу:
 - с небольшим диапазоном колебаний качества – от 55 до 60%;
 - с существенным диапазоном колебаний качества – от 10 до 60%;
 - в диапазоне реальных параметров качества железной руды в карьерах – 19 – 55%;
- 2) по трем параметрам: железо, сера и фосфор.

На Рисунке 9 приведен скриншот результатов распределения автосамосвалов по зонам разгрузки (номера рейсов), а на Рисунке 10 – результаты распределения автосамосвалов по зонам разгрузки (процентное содержание полезного компонента).

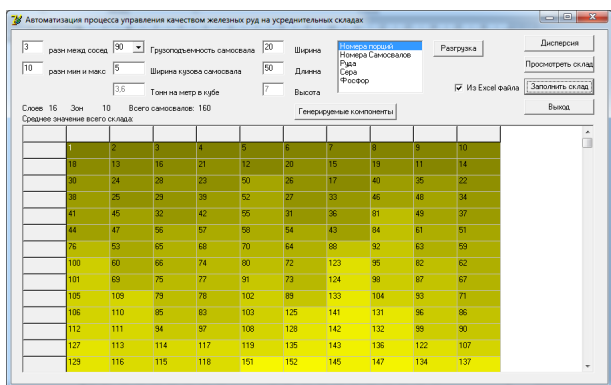


Рисунок 9. Модуль “Усреднительный склад”: результаты распределения автосамосвалов по зонам разгрузки (номера рейсов)

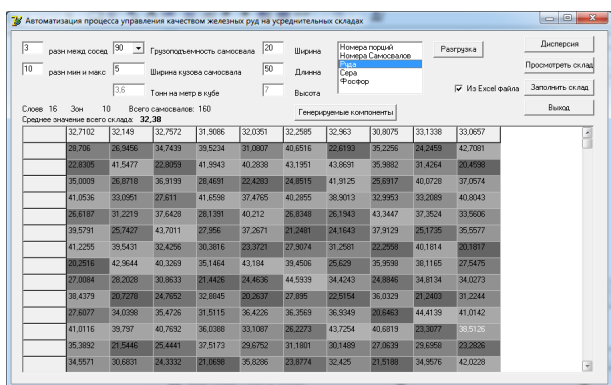


Рисунок 10. Модуль “Усреднительный склад-2”: результаты распределения автосамосвалов по зонам разгрузки (процентное содержание полезного компонента)

5. ВЫВОДЫ

В результате проведенного исследования разработаны модели, и алгоритмы формирования технологических схем стабилизации качества полезного ископаемого при открытой разработке месторождений. По полученным результатам разработан в Embarcadero RAD Studio XE программный продукт “ИС поддержки принятия решений при формировании эффективных технологических схем стабилизации качества полезного ископаемого”, состоящий из модулей “Трехмерный редактор забоя – Развал”, “Валовая выемка”, “Экскавация”, “Автотранспорт” и “Усреднительный склад”.

В результате проведенного исследования сделаны следующие выводы:

- разработанные модели, адекватны реальному процессу;
- модели, позволяют оптимизировать рудопоток карьера по параметрам стабилизации качества полезного ископаемого, как в режиме реального времени, так и в режиме прогнозирования содержания полезного компонента и вредных примесей по забоям карьера;
- коэффициент усреднения руды на складе находится в прямой зависимости от интенсивности и объема рудообмена; рост объемов, поставляемой на склад руды, уменьшает пульсации на складе и позволяет улучшить качество усреднения;

– работа системы в режиме предсказания позволяет получить более качественную оптимизацию процесса усреднения (при условии достоверности входных данных) по сравнению с режимом работы в реальном времени.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Выражаем глубокую признательность А.Ф. Цеховому, П.А. Цеховому, Д.Ш. Ахмедову и В.А. Галкину за содействие при проведении исследований и научные консультации.

Исследования выполнены в рамках государственного гранта Министерства образования и науки Республики Казахстан по теме “Разработка ИС поддержки принятия решений при формировании эффективных технологических схем стабилизации качества полезного ископаемого”, выполняемой по бюджетной программе 055 “Научная и/или научно-техническая деятельность” (№ госрегистрации 0112РКО2423).

Исследования выполнены на базе Рудненского индустриального института.

REFERENCES

- Bastan, P.P., Azbel', I.I., & Klyuchkin, E.I. (1979). *Teoriya i praktika usredneniya rud*. Moskva: Nedra.
- Beretta, F.S., Costa, J.F.C.L., & Koppe, J.C. (2010). Reducing Coal Quality Attributes Variability Using Properly Designed Blending Piles Helped by Geostatistical Simulation. *International Journal of Coal Geology*, 84(2), 83-93. <https://doi.org/10.1016/j.coal.2010.08.007>
- Dovzhenok, A.S. (2002). *Razvitie teorii i metodov upravleniya avtotransportnoy sistemoy gornodobyvayushchego predpriyatiya*. Ph.D. Chelyabinsk: NTTs-NIIOGR.
- Galiev, S.Zh. (1997). *Optimizatsiya parametrov gorno-transportnykh sistem kar'yerov na osnove imitatsionnogo modelirovaniya*. Ph.D. Almaty: IGD MN AN Respubliki Kazakhstan.
- Gy, P.M. (1981). A New Theory of Bed-Blending Derived from the Theory of Sampling – Development and Full-Scale Experimental Check. *International Journal of Mineral Processing*, 8(3), 201-238. [https://doi.org/10.1016/0301-7516\(81\)90013-2](https://doi.org/10.1016/0301-7516(81)90013-2)
- Huang, Q., & Chen, J. (2011). Research on Dynamic Mine Ore Blending Optimization Based on Particle Swarm Optimization in Mining Enterprises. *Computer Engineering*, (8), 50-61.
- Kumral, M. (2005). Quadratic Programming for the Multi-Variable Pre-Homogenization and Blending Problem. *Journal of South African Institute of Mining and Metallurgy*, (105), 322-324.
- Mosinet, V.N., & Rubtsov, S.K. (2001). Tekhnologiya Vzryvaniya Rudnykh Ustupov s Sokhraneniem Geologicheskoy Struktury. *Gornyy Zhurnal*, (12), 33-37.
- Muller, K. (2010). Stacking, Blending and Reclaiming Effects. *Mechanical Technology*, (11), 14-18.
- Petersen, I.F. (2004). Blending in Circular and Longitudinal Mixing Piles. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 74(1), 135-141. <https://doi.org/10.1016/j.chemolab.2004.03.018>
- Robinson, G.K. (2004). How Much Would a Blending Stockpile Reduce Variation? *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 74(1), 121-133. <https://doi.org/10.1016/j.chemolab.2004.03.010>
- Shemetov, P.A., & Kolomnikov, S.S. (2002). Razvitie vyemchno-transportnogo kompleksa kar'yera “Muruntau”. *Gornyy Zhurnal*, (spetsial'nyy vypusk), 98-100.

- Shevelev, V.A. (2014). Opredelenie parametrov priustupnykh buferno-usrednitel'nykh skladov s uchetom parametrov tekhnologicheskogo oborudovaniya. *Gornyy Informatsionno-Analiticheskiy Byulleten'*, (3), 413-416.
- Tarasov, P.I. (2013). Obosnovanie putey razvitiya transportnykh sredstv dlya osvoeniya severnykh territoriy Rossii. *IGD UrO RAN*, 137-151.
- Tsekhovoy, A.F., Zhusupov, K.K., & Statsenko, L.G. (2009). Planirovanie i operativnoe upravlenie na otkrytykh gornykh rabotakh s uchetom strategii razvitiya otraslevogo kompleksa. *Gornyy Zhurnal*, (11), 42-45.
- Vashlaev, I.I., & Selivanov, A.V. (2004). Opredelenie minimal'nogo ob'ema rudy v usrednitel'nom sklade v zavisimosti ot velichiny dopustimogo otkloneniya parametra kachestva. *Gornyy Informatsionno-Analiticheskiy Byulleten'*, (11), 190-192.
- Vasil'yev, S.B. (2007). Matematicheskaya model' usredneniya uglya metodom prodol'nogo sdviga. *Gornyy Zhurnal*, (3), 82-85.
- Yakovlev, V.L., Tarasov, P.I., & Zhuravlev, A.G. (2011). *Istoriya i perspektivy trolleyvoznogo transporta. Novye spetsializirovannye vidy transporta dlya gornykh rabot*. Ekaterinburg: UrO RAN.
- Yakubovskiy, M.M., & Yakubovskiy, M.M. (2010). Sovremennyy peregruzochnyy punkt pri kombinirovannom avtomobil'no-zheleznodorozhnom transporte. *Zapiski Gornogo Instituta*, (186), 90-93.
- Zarubin, M.Yu., Fionin, E.A., & Danilets, E.V. (2013). Analiz vliyaniya tekhnologicheskikh skhem vyemki gornoj massy na pokazateli kachestva pri otkrytoy razrabotke mestorozhdeniy poleznogo iskopaemogo. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta imeni G.I. Nosova*, 3(43), 5-9.
- Zarubin, M.Yu., & Zarubina, V.R. (2014). Optimizatsiya rudopotoka kar'yera: modul' "Transport". In *Nauka, obrabotkanie i proizvodstvo – vedushchie faktory strategii "Kazakhstan-2050"*. Karaganda: Karagandinskiy gosudarstvennyy tekhnicheskii universitet.

ABSTRACT (IN RUSSIAN)

Цель. Разработка информационной технологии, позволяющей получить рудопоток с требуемыми параметрами качества при открытой разработке месторождений полезных ископаемых за счет реализации методов и алгоритмов оптимизации технологических схем выемки и перемещения рудной массы.

Методика. При выполнении использованы как традиционные (анализ научно-патентной литературы, аналитические методы исследования параметров рудопотока, анализ опыта и эксплуатации карьеров, проведение пассивного эксперимента и статистической обработки данных), так и новые формы научного исследования (имитационное моделирование при помощи разработанных программных моделей).

Результаты. В результате проведенного исследования разработаны модели и алгоритмы формирования технологических схем стабилизации качества полезного ископаемого при открытой разработке месторождений. По полученным результатам разработан в Embarcadero RAD Studio XE программный продукт "ИС поддержки принятия решений при формировании эффективных технологических схем стабилизации качества полезного ископаемого", состоящий из модулей "Трехмерный редактор забоя – Развал", "Валовая выемка", "Экскавация", "Автотранспорт" и "Усреднительный склад".

Научная новизна. В результате проведенного исследования решена важная научная задача по стабилизации качества руд в карьере, получены новые математические модели влияния параметров работы добычных участков, внутрикарьерных усреднительных складов и транспортных потоков; на основе математических моделей разработаны новые алгоритмы и реализованы программные пакеты для оптимизации работы забойных участков, межзабойных грузопотоков и работы усреднительных складов. Использование информационной системы позволило повысить точность определения границ селективной и валовой выемки, оптимизировать конструкции и параметры складов, а также систематизировать порядок отсыпки полезного ископаемого транспортом.

Практическая значимость. Программное обеспечение позволяет обеспечить повышение качества получаемого на обогатительный комплекс с карьеров рудопотока за счет оптимизации технологической схемы выемки и совершенствования технологии формирования усреднительных штабелей. Это позволяет добиться экономического эффекта за счет улучшения извлечения полезного компонента и уменьшения затрат на обогатительный передел.

Ключевые слова: информационная система (ИС), стабилизация качества полезного ископаемого, селективная выемка, организация грузопотоков, усреднительный склад

ABSTRACT (IN UKRAINIAN)

Мета. Розробка інформаційної технології, що дозволяє отримати рудопотік з необхідними параметрами якості при відкритій розробці родовищ корисних копалин за рахунок реалізації методів та алгоритмів оптимізації технологічних схем виїмки і переміщення рудної маси.

Методика. При виконанні використані як традиційні (аналіз науково-патентної літератури, аналітичні методи дослідження параметрів рудопотоку, аналіз досвіду та експлуатації кар'єрів, проведення пасивного експерименту і статистичної обробки даних), так і нові форми наукового дослідження (імітаційне моделювання за допомогою розроблених програмних моделей).

Результати. В результаті проведеного дослідження розроблені моделі та алгоритми формування технологічних схем стабілізації якості корисної копалини при відкритій розробці родовищ. За отриманими результатами розроблено в Embarcadero RAD Studio XE програмний продукт "ІС підтримки прийняття рішень при формуванні ефективних технологічних схем стабілізації якості корисної копалини", що складається з модулів "Тривимірний редактор забою – Розвал", "Валова виїмка", "Екскавация", "Автотранспорт" та "Усреднювальний склад".

Наукова новизна. В результаті проведеного дослідження вирішено важливе наукове завдання щодо стабілізації якості руд в кар'єрі, отримані нові математичні моделі впливу параметрів роботи видобувних ділянок, внутрішньокар'єрних усереднювальних складів і транспортних потоків; на основі математичних моделей розроблені нові алгоритми й реалізовані програмні пакети для оптимізації роботи вибійних ділянок, міжвибійних вантажопотоків і роботи усереднювальних складів. Використання інформаційної системи дозволило підвищити точність визначення меж селективної і валової виїмки, оптимізувати конструкції та параметри складів, а також систематизувати порядок відсипки корисної копалини транспортом.

Практична значимість. Програмне забезпечення дозволяє забезпечити підвищення якості одержуваного на збагачувальний комплекс з кар'єрів рудопотоку за рахунок оптимізації технологічної схеми виїмки і вдосконалення технології формування усереднювальних штабелів. Це дозволяє домогтися економічного ефекту за рахунок поліпшення вилучення корисного компонента й зменшення затрат на збагачувальний переділ.

Ключові слова: *інформаційна система (ІС), стабілізація якості корисної копалини, селективна виїмка, організація вантажопотоків, усереднювальний склад*

ARTICLE INFO

Received: 15 September 2017

Accepted: 28 November 2017

Available online: 30 November 2017

ABOUT AUTHORS

Mikhail Zarubin, Candidate of Technical Sciences, Head of the Department of Automatisation, Information System and Safety, Rudny Industrial Institute, 38 50 let Oktyabrya St, 111500, Rudny, Kazakhstan. E-mail: zarubin_mu@mail.ru

Larissa Statsenko, Doctor of Philosophy, Project Manager of the Institute for Mining and Energy Resources, University of Adelaide, S134b Engineering South, 5005, Adelaide, Australia. E-mail: larissa.statsenko@adelaide.edu.au

Venera Zarubina, Candidate of Economical Sciences, Head of the Department of Economic and Management, Rudny Industrial Institute, 38 50 let Oktyabrya St, 111500, Rudny, Kazakhstan. E-mail: zarubina_v@mail.ru

Evgeniy Fionin, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Metallurgy and Mining, Rudny Industrial Institute, 38 50 let Oktyabrya St, 111500, Rudny, Kazakhstan. E-mail: fioninea@mail.ru