

## Построение цифровой модели усреднительного рудного склада

В.В. Ческидов ✉, Д.С. Мошков, Д.В. Чумаченко, К.С. Гах, Н.А. Ботов

Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», г. Москва, Российская Федерация  
✉ vcheskidov@misis.ru

**Резюме:** Устойчивость работы обогатительных фабрик сегодня сдерживается не только снижением средних содержания ценных компонентов в руде, но и ростом ее неоднородности. При вовлечении относительно бедных и сложных по строению участков месторождений усиливаются колебания по содержанию полезных компонентов и вредных примесей, возрастает разброс по крупности, влажности, прочности и другим технологически важным параметрам рудного материала. Усреднительные склады потенциально способны заметно сгладить эти неоднородности и стабилизировать качество потока на фабрику, но на практике их эффект оказывается ниже планируемого: часто склад работает как площадка хранения и перегрузки, а не как инструмент стабилизации качественных характеристик сырья. Главная причина – отсутствие количественной оценки того, как именно происходит усреднение внутри конкретного штабеля. В статье предлагается подход на основе пространственно-временного имитационного моделирования распределения рудного материала в пределах склада. Модель описывает конфигурацию площадки, способы формирования слоев, чередование типов сырья из разных забоев, заданные качественные характеристики поступающих партий и технологию отгрузки. Это позволяет наглядно реконструировать картину распределения параметров, а также посчитать степень сглаживания исходной неоднородности: изменение дисперсии содержаний, сокращение амплитуды временных колебаний и чувствительность результата к геометрии склада и режимам его формирования. В результате проведенного исследования был разработан алгоритм компьютерного моделирования, который количественно показывает, как осуществляется перемешивание руды в конкретных условиях, и дает основу для выбора конфигурации буферно-усреднительных площадок и рациональных режимов формирования штабеля.

**Ключевые слова:** горное дело, шихтоподготовка, усреднительный склад, качество минерального сырья, обогатительная фабрика, блочная модель, стабилизация характеристик руды, изменчивость свойств руды, штабель

**Для цитирования:** Ческидов В.В., Мошков Д.С., Чумаченко Д.В., Гах К.С., Ботов Н.А. Построение цифровой модели усреднительного рудного склада. *Горная промышленность*. 2026;(3):35–39. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-3-35-39>

## Building a digital model of a homogenization yard

V.V. Cheskidov ✉, D.S. Moshkov, D.V. Chumachenko, K.S. Gakh, N.A. Botov  
National University of Science and Technology "MISIS", Moscow, Russian Federation  
✉ vcheskidov@misis.ru

**Abstract:** Operational stability of processing plants is currently constrained not only by a decrease in the average ore grades, but also by its increasing heterogeneity. When relatively lower-grade and structurally complex areas of deposits are mined, fluctuations in the ore grade and content of impurities increase, as well as variations in size, humidity, strength, and other technologically important parameters of the ore material. Homogenization yards have the potential to noticeably mitigate these heterogeneities and stabilize the ore grades off-loaded to the processing plant, but in practice their effect is often lower than the planned one, i.e. often a homogenization yard works as a storage and intermediate site rather than as a tool to stabilize quality characteristics of the raw materials. The main reason is the lack of a way to quantitatively assess how exactly homogenization occurs within a particular stockpile. The paper proposes an approach based on spatial and temporal simulation of the ore material distribution within the yard. The model describes the site configuration, layer formation methods, alternation of the raw material types from different faces, the specified quality characteristics of the delivered batches and the stockpiling technology. This makes it possible to visually reconstruct distribution of the parameters, as well as to calculate the degree of smoothing of the initial heterogeneity, i.e. a change in the dispersion of the contents, a reduction in the range of temporary variations, and sensitivity of the result to the geometry of the yard and the mode of its formation. Instead of the generalized assumptions, a tool is developed that quantifies how ore is mixed under specific conditions and provides a basis for choosing a proper configuration of the intermediate and homogenization yards and rational stockpiling modes.

**Keywords:** mining, charge preparation, homogenization yard, grades of mineral raw materials, processing plant, block model, stabilization of ore characteristics, variability of ore properties, stockpile

**For citation:** Cheskidov V.V., Moshkov D.S., Chumachenko D.V., Gakh K.S., Botov N.A. Building a digital model of a homogenization yard. *Russian Mining Industry*. 2026;(3):35–39. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-3-35-39>

**Введение**

В последние десятилетия многие горнодобывающие предприятия столкнулись с ухудшением сырьевой базы: в переработку все чаще поступают руды с низким содержанием целевых компонентов, более сложной структурой оруденения и выраженной неоднородностью физико-механических свойств (в том числе по прочности). Это напрямую повышает вариативность технологических параметров питания фабрики и усложняет прогнозирование результатов переработки при фиксированных настройках переделов [1]. Поэтому при оценке работы горно-обогатительного комплекса уже недостаточно опираться на средние значения: для фабрики критичен временной профиль качества – амплитуда и частота колебаний, поскольку даже умеренные «скачки» по содержанию или минеральному составу могут вывести схему из оптимального режима, снизить извлечение и увеличить потери [2].

Традиционный ответ на рост изменчивости – шихтоподготовка в буферно усреднительных складах, которые предназначены для выравнивания подачи по объему и стабилизации качества. Практическая значимость таких объектов для сглаживания неоднородности рудопотока и их роль в системе стабилизации качества рассматриваются как в отраслевых работах по усреднению на промежуточных складах, так и в публикациях по автоматизации управления качественными характеристиками внутрикарьерных потоков [3]. Однако фактический эффект нередко оказывается ниже ожидаемого: склад используется как площадка хранения/перегрузки, а динамика качества на выходе остается труднопрогнозируемой. Существенная причина – отсутствие количественной модели, описывающей перемешивание слоев внутри конкретного штабеля и отгрузку рудного материала, а не только баланс входа-выхода [4].

В трудах ряда исследователей приведены рекомендации по геометрии штабеля, порядку укладки и правилам отгрузки, степень усреднения при этом оценивают укрупненно, например, через изменение дисперсии показателя на входе и выходе [5]. Такая постановка во многом оправдана, но внутренняя структура штабеля нередко задается чрезмерно схематично (допущение об «идеальном перемешивании» или условные слои), из-за чего расчетные метрики слабо связаны с реальным поведением характеристик рудного материала внутри склада [6]. На уровне цифровых моделей рудопотока и «цифровых двойников» складские мощности нередко описываются упрощенными схемами FIFO/LIFO, это удобно для логистики, но почти не отвечает на вопрос, как меняется качество отгружаемой массы при конкретной технологии формирования штабеля [7]. В этом контексте актуальным является подход, где для эффективного моделирования штабеля требуется переход от упрощенных схем к более структурированным представлениям склада [8]. В качестве примера одним из вариантов в прикладных работах по формированию усреднительного склада предлагаются матричные представления штабеля, это позволяет увязать график поступления партий руды с их размещением в пространстве и последующей отгрузкой.

Между тем эффект усреднения определяется именно пространственно-временной организацией: порядком укладки партий руды, заполнением зон склада, движением техники и режимами отгрузки. Для описания таких процессов требуется переход от чисто статистических оценок к имитационному моделированию перемещения и взаимодействия сыпучей среды [9], что позволяет использовать реальные производственные данные и при этом

сохранять связь между производственными процессами и характеристиками минерального сырья. В качестве методической базы здесь применимы как различные подходы к описанию движения сыпучих сред (в т.ч. гипопластические модели), так и дискретные методы, позволяющие анализировать структурообразование, смешение и сегрегацию на уровне отдельных элементов (например, одной партии руды, привезенной автосамосвалом на склад) [10]. При формировании конструкции штабелей авторами ряда работ подчеркивается, что корректное воспроизведение поведения гранулированных материалов связано с явным учетом контактов частиц и условий разгрузки на складе<sup>1</sup>, это создает основу для моделирования формирования штабеля и появления «выбросов» характеристик качества рудного сырья при отгрузке [11; 12]. Практическая применимость такого интеграционного подхода была успешно продемонстрирована в работе по оптимизации усреднения потоков руды, где условное геостатистическое моделирование пласта сочеталось с динамическим моделированием работы усреднительного склада, что позволило количественно оценить вклад в качество конечного продукта.

В целом можно заключить, что в современных условиях деятельности добывающих предприятий с учетом имеющегося научного задела требуется формализованная модель склада как самостоятельного объекта, которая связывает геометрию и технологию укладки/отгрузки с выходной временной структурой качества, а также система показателей, учитывающая не только средние значения, но и временную устойчивость и чувствительность к типичным сбоям.

**Методы**

Для разработки и анализа модели рудных буферно-усреднительных складов применялся метод компьютерного имитационного моделирования. Логика процесса была реализована на языке программирования Python версии 3.13.5 с использованием библиотеки Pandas 2.3.3 для чтения и записи CSV файлов.

Разработанный алгоритм позволяет осуществлять построение усреднительного штабеля, представляемого в виде набора блоков. Таким образом усреднительный склад представляется как блочная модель, имеющая три уровня абстракции.

Исходными данными для работы алгоритма являются:

- характеристики поступающих на склад партий руды: при работе алгоритма осуществляется моделирование потока автосамосвалов, где каждая  $i$ -я партия характеризуется средними содержаниями полезного компонента, вредных примесей и других характеристик, каждый из показателей задается в соответствии с данными распределения, полученными на стадии эксплуатационной разведки или задаваемыми на основании известных зависимостей, при этом для значения каждого параметра задается стохастическая компонента, которая вычисляется как случайная величина, имеющая нулевое математическое ожидание и заданное среднее квадратическое отклонение;
- габариты самосвалов, которые доставляют руду на склад, включая ширину и вместимость кузова;
- насыпная плотность и угол естественного откоса рудной массы;
- геометрия склада задается как прямоугольная пло-

<sup>1</sup> Моделирование поведения частиц в Ansys Rocky. Режим доступа: <https://www.cadfm-cis.ru/list/stati/modelirovanie-povedeniya-chastits-v-ansys-rocky/> (дата обращения: 11.01.2026).

щадка с фиксированными размерами и высотой штабеля, точка отсыпки для каждого автосамосвала определяется по алгоритму последовательной укладки слоев.

Алгоритм работы модели представляет собой пошаговую симуляцию. Генерация входного потока осуществляется следующим способом:

- для каждого рейса автосамосвала генерируется значение содержания полезного компонента и других характеристик, которые учитываются моделью, имитирующей изменчивость руды, поступающей из разных забоев карьера;
- осуществляется моделирование укладки каждой партии руды в массиве: объем размещаемой руды разделяется на элементарные блоки (ячейки), блок является первым уровнем абстракции и содержит в себе информацию о присвоенных координатах ( $x, y, z$ ) и векторе отслеживаемых параметров, размер блока в исходной модели –  $10 \times 10 \times 10$  см;
- после формирования склада осуществляется укрупнение исходных блоков, длина и ширина которых равна 50 см, а высота соответствует средней мощности штабеля на участке, входящего в границы блока по поверхности.

Также в процессе работы алгоритма по созданию модели склада осуществляется формирование слоев. В данном случае слой является вторым уровнем абстракции. Он представляет собой геометрическую фигуру, которая состоит из блоков. Для нее можно задать такие параметры, как: положение в пространстве, высота, которая должна соответствовать общей высоте склада, ширина прямоугольной верхней площадки, которая будет являться шириной кузова самосвала, отсыпавшего этот слой, также задается угол естественного откоса сыпучего материала, который будет определять наклон моделируемого слоя в пространстве.

Склад является третьим уровнем абстракции и формируется из множества слоёв. В программе предусмотрены два варианта построения склада – ручной и автоматический. При ручном построении имеется возможность определять геометрические параметры слоя отдельно, включая его положение в пространстве и конфигурацию. При автоматическом построении задаются общая высота, объем привозимой породы или грузоподъемность автосамосвала и насыпная плотность руды, параметры угла естественного откоса для расчёта характеристик слоя. А затем задаются параметры одного из трёх вариантов моделирования:

- общий объём породы, который должен быть размещен на складе, и ширина (или количество слоев в ширину) склада;
- общая ширина и длина отвала;
- количество отгрузок (порций поставляемой руды) и их распределение по фронту отсыпки.

Алгоритм контролирует заполнение склада по принципу «снизу вверх» и «от начала к концу», при этом формируются слои, соответствующие последовательности прибытия автотранспорта. Это обеспечивает создание слоистой неоднородности, характерной для реального процесса.

В модели имеется два вида слоёв. Первый вид – опорный, от которого начинается отсыпка. И второй вид – наклонный, который является основным в модели склада. На рис. 1 синим цветом показан опорный слой, зелёным и коричневым показаны наклонные слои.

Для имитации процесса усреднения используется так называемая ядерная функция, которая позволяет осуществить прогноз значений характеристик руды, которая будет попадать в ковш при черпании экскаватором или

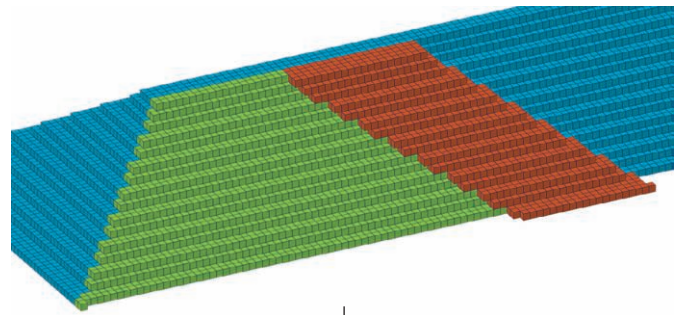


Рис. 1  
Виды слоёв в модели склада

Fig. 1  
Types of layers in the yard model

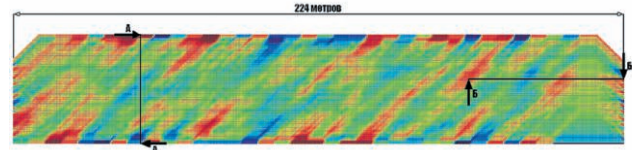


Рис. 2  
Усреднённый склад, вид сверху

Fig. 2  
A homogenization yard, top view

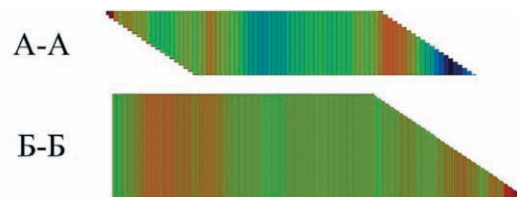


Рис. 3  
Разрезы по усреднённой модели (А-А – поперечный разрез, Б-Б – продольный разрез; размер основания блока  $50 \times 50$  см)

Fig. 3  
Sections based on the averaged model (А-А – a cross-section, Б-Б – a longitudinal section; the block base dimensions:  $50 \times 50$  cm)

погрузчиком. На рис. 2 показан вид сверху на усреднённый склад, на рис. 3 показаны продольный и поперечный разрезы усреднённого склада, цветом указано содержание полезного компонента в руде. При реализации процесса погрузки считаем, что ковш движется вертикально по забою, что обеспечивает усреднение уложенных слоев по вертикали. В функции ядерного усреднения задается размер окна, то есть количество блоков, которые подвергаются усреднению, или абсолютные размеры получаемых блоков. С учетом размера погрузочного оборудования и выбранного размера блока при моделировании отсыпки оптимальным выглядит выбор размера окна в горизонтальной плоскости –  $5 \times 5$  блоков. Алгоритм сканирует блочную модель и объединяет все блоки, попадающие в проекцию сетки по вертикали, в единые укрупненные параллелепипеды. Содержание полезного компонента и других параметров рудного материала при этом определяется как средневзвешенное значение.

В результате реализации алгоритма формируется трехмерный массив данных, где каждая ячейка содержит информацию о пространственном положении и значениях параметров, которые рассматриваются в модели.

Для перехода от числовой модели к геометрической и визуальной интерпретации данные экспортируются из Python в формат, совместимый с современными горно-геологическими информационными системами. Трехмерный массив преобразуется в таблицу формата .csv, где каждая строка соответствует элементарному блоку, а столбцы содержат информацию о положении центра блока, его раз-

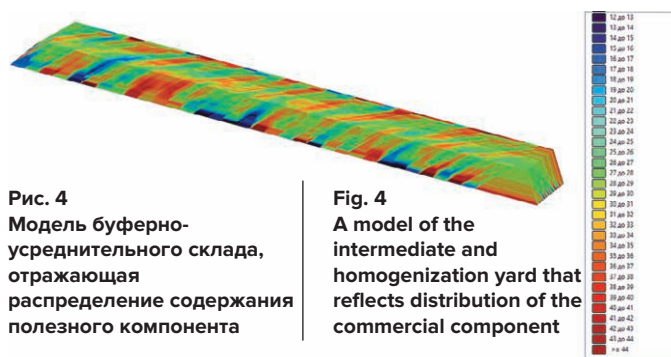
мере, а также вектор параметров (содержание полезных компонентов, вредных примесей и т.д.). Визуализация полученной модели может быть осуществлена в любой из горно-геологических информационных систем или других программах, которые могут отображать блочные модели. В частности, данные могут быть импортированы в проект Micromine, где на его основе создается точечный объект (wireframe), представляющий собой облако точек, заполняющее объем штабеля.

**Результаты**

В рамках проведенного исследования были разработаны алгоритмы для построения блочных моделей двух типов.

Первая блочная модель содержит в себе информацию о геометрии склада, о том, где и в каком порядке производится отсыпка слоёв, а также о параметрах породы в каждом слое. На рис. 4 представлен общий вид смоделированного штабеля после завершения цикла отсыпки руды автосамосвалами. Визуализация позволяет оценить геометрию штабеля и пространственное распределение качественных характеристик рудного материала.

Вторая модель содержит информацию об усреднённых блоках для дальнейшего моделирования процесса отгрузки руды из буферно-усреднительного склада.



**Рис. 4**  
Модель буферно-усреднительного склада, отражающая распределение содержания полезного компонента

**Fig. 4**  
A model of the intermediate and homogenization yard that reflects distribution of the commercial component

Полученные в результате исследования данные демонстрируют неоднородную структуру рудного штабеля, которая соответствует начальному этапу усреднения. Данный этап заключается в создании пространственной последовательности размещения рудного материала с разными характеристиками. Однако ключевое усреднение достигается при последующей отгрузке руды при черпании. Штабель представляет собой насыпь, состоящую из относительно однородных наклонных слоев, а при вертикальном черпании пересекаются сразу несколько таких слоев, что обеспечивает перемешивание материала, а соответственно, и усреднение его характеристик.

**Обсуждение результатов**

Разработанная модель отражает технологический процесс формирования штабеля и может служить основой для оценки исходной неоднородности рудной массы пе-

ред складированием в штабель и после усреднения в нем перед отгрузкой. Полученное трехмерное распределение параметров в рудной массе является исходной информацией для прогноза характеристик минерального сырья, поступающего на питание обогатительной фабрики, и позволяет планировать все показатели рудопотока на стадии краткосрочного планирования.

Основным направлением дальнейших исследований является развитие модели: создание и интеграция модуля отгрузки руды с буферно-усреднительным складом. Интеграция модуля отгрузки позволит перейти от статической оценки распределения сырья к динамическому моделированию всего технологического цикла буферно-усреднительного склада и даст инструмент для оптимизации его работы с целью обеспечения стабильного качества сырья, поступающего на обогатительную фабрику.

**Заключение**

В рамках данного исследования был разработан алгоритм компьютерного моделирования процесса формирования рудного штабеля на буферно-усреднительном складе. Модель, созданная на языке Python, может быть визуализирована в специализированном горно-геологическом программном обеспечении, например, Micromine. Модель достоверно воспроизводит ключевой технологический этап – послойную отсыпку руды автосамосвалами, приводящую к созданию пространственно-неоднородного массива с предсказуемым распределением полезного компонента и других характеристик руды.

Основные научные и практические результаты работы заключаются в следующем:

1. Создан эффективный инструмент для прогноза показателей и анализа рудопотока на стадии краткосрочного планирования. Разработанная имитационная модель позволяет прогнозировать распределение качественных характеристик внутри штабеля на этапе отсыпки.
2. Интеграция с горно-геологическими информационными системами обеспечивает наглядное представление результатов в виде 3D-моделей и разрезов, что значительно упрощает интерпретацию сложных пространственных данных и позволяет визуально контролировать процесс, а также принимать управленческие решения на основе инструментов специализированного программного обеспечения.

Перспективным направлением дальнейших исследований является развитие модели за счет создания и интеграции модуля отгрузки руды. Это позволит замкнуть технологический цикл «отсыпка–хранение–отгрузка» в единой цифровой среде и провести комплексную оценку эффективности работы всего буферно-усреднительного склада. Оптимизация параметров отгрузки экскаватором на основе такой комплексной модели станет значимым шагом к обеспечению стабильного и качественного снабжения обогатительной фабрики однородной рудной массой.

**Список литературы / References**

1. Brochot S., Durance M.-V., Fourniguet G., Guillauneau J.-C., Villeneuve J. Modelling the minerals diversity: a challenge for ore processing simulation. In: *Proceedings of the 1995 EUROSIM Conference, Vienna, Austria, September 11–15, 1995*, pp. 861–866. Available at: <https://www.caspeo.net/wp-content/uploads/2020/02/1995-eurosim-usim-pac-mineral-processing-simulation-material-description.pdf> (accessed: 02.03.2026).
2. Wills B.A., Finch J.A. *Wills' Mineral Processing Technology: An Introduction to the Practical Aspects of Ore Treatment and Mineral Recovery*. 8<sup>th</sup> ed. Oxford: Elsevier; 2016. 498 p.

3. Варламова С.А., Затонский А.В. Об усреднении состава руды на промежуточном складе. *Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Естественные и технические науки*. 2013;(9-10):12–18. Режим доступа: <http://www.nauteh-journal.ru/files/a7815bec-4c00-4050-b9b0-f443f5850a31> (дата обращения: 02.03.2026).  
Varlamova S.A., Zatonский A.V. About the homogenization of an ore composition in the intermediate warehouse. *Modern Science: Actual Problems of Theory & Practice. Series: Natural and Technical Sciences*. 2013;(9-10):12–18. (In Russ.) Available at: <http://www.nauteh-journal.ru/files/a7815bec-4c00-4050-b9b0-f443f5850a31> (accessed: 02.03.2026).
4. Стаценко Л.Г., Брановец Н.Е. Разработка модуля «усреднительный склад» информационной системы стабилизации качества полезного ископаемого в карьере. *Инновации в науке*. 2013;(19):187–199.  
Statsenko L.G., Branovets N.E. Development of a module “blending stock yard” of information system for stabilizing ore quality in open pit mine. *Innovatsii v Nauke*. 2013;(19):187–199. (In Russ.)
5. Ашимбаев А.А., Талбаева Э.К., Бекбосунов Р.Р. Моделирование процесса усреднения руд в целях изучения влияния основных факторов на его показатели. *Известия Кыргызского государственного технического университета им. И. Раззакова*. 2013;(28):179–182.  
Ashimbaev A.A., Talbaeva E.K., Bekbosunov R.R. Modelling the ore blending process to investigate impact of the key factors on its performance indicators. *Izvestiya Kyrgyz State Technical University named after I. Razzakov*. 2013;(28):179–182. (In Russ.)
6. Воронин Р.П., Быстров В.В. Компьютерное моделирование процессов формирования усреднительного склада горнодобывающего предприятия. *Труды Кольского научного центра РАН. Серия: Технические науки*. 2022;13(2):124–133.  
Voronin R.P., Bystrov V.V. Computer modeling of the processes of formation of a blending warehouse of a mining enterprise. *Transactions of the Kola Science Centre of RAS. Engineering Sciences Series*. 2022;13(2):124–133. (In Russ.)
7. Горбатенко В.Д., Ческидов В.В., Якубов М.М. Моделирование показателей качества поступающего на обогатительную фабрику минерального сырья при разработке Лебединского месторождения железистых кварцитов. *Горный журнал*. 2022;(6):15–20. <https://doi.org/10.17580/gzh.2022.06.02>  
Gorbatenko V.D., Cheskidov V.V., Yakubov M.M. Modeling quality of concentration factory feedstock in ferruginous quartzite mining at the Lebedinskoe deposit. *Gornyi Zhurnal*. 2022;(6):15–20. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/gzh.2022.06.02>
8. Петрович С.И., Файзулин М.А., Стукалова Н.Г. Разработка мероприятий по достоверному учету количества и качества добываемого минерального сырья. В кн.: Буктуков Н.С. (ред.) *Научно-техническое обеспечение горного производства: Труды Института горного дела им. Д.А. Кунаева*. Алматы; 2016. Т. 88. С. 29–36.
9. Everett J.E., Howard T.J., Jupp K. Simulation modelling of grade variability for iron ore mining, crushing, stockpiling and ship loading operations. *Mining Technology: Transactions of the Institutions of Mining and Metallurgy*. 2010;119(1):22–30. <https://doi.org/10.1179/037178410X12633834652>
10. Потапов И.И., Решетникова О.В. Применение стационарной гипопластической модели для моделирования движения сыпучей среды. *Вычислительные технологии*. 2019;24(6):90–98. Режим доступа: <http://www.ict.nsc.ru/jct/getfile.php?id=1944> (дата обращения: 02.03.2026).  
Potapov I.I., Reshetnikova O.V. The use of a stationary hypoplastic model for modelling the motion of granular medium. *Journal of Computational Technologies*. 2019;24(6):90–98. (In Russ.) Available at: <http://www.ict.nsc.ru/jct/getfile.php?id=1944> (accessed: 02.03.2026).
11. Benndorf J. Application of efficient methods of conditional simulation for optimising coal blending strategies in large continuous open pit mining operations. *International Journal of Coal Geology*. 2013;112:141–153. <https://doi.org/10.1016/j.coal.2012.10.008>
12. Кожухов А.А., Омельченко Д.Р., Мельниченко И.А., Ческидов В.В., Мосейкин В.В. Создание модели распределения полезного компонента в железорудном месторождении. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2023;(8):5–17. [https://doi.org/10.25018/0236\\_1493\\_2023\\_8\\_0\\_5](https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_8_0_5)  
Kozhukhov A.A., Omelchenko D.R., Melnichenko I.A., Cheskidov V.V., Moseykin V.V. Modeling mineral component distribution in iron ore deposits. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2023;(8):5–17. (In Russ.) [https://doi.org/10.25018/0236\\_1493\\_2023\\_8\\_0\\_5](https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_8_0_5)

**Информация об авторах**

**Ческидов Василий Владимирович** – кандидат технических наук, доцент, заместитель директора Горного института, Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», г. Москва, Российская Федерация; e-mail: [vcheskidov@isis.ru](mailto:vcheskidov@isis.ru)

**Мошков Дмитрий Сергеевич** – аспирант, кафедра геологии и маркшейдерского дела Горного института, Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», г. Москва, Российская Федерация

**Чумаченко Даниил Владимирович** – студент, кафедра геологии и маркшейдерского дела Горного института, Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», г. Москва, Российская Федерация

**Гах Кирилл Сергеевич** – студент, кафедра геологии и маркшейдерского дела Горного института, Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», г. Москва, Российская Федерация

**Ботов Николай Алексеевич** – аспирант, кафедра геологии и маркшейдерского дела Горного института, Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», г. Москва, Российская Федерация

**Информация о статье**

Поступила в редакцию: 20.02.2026

Поступила после рецензирования: 24.03.2026

Принята к публикации: 13.04.2026

**Information about the authors**

**Vasilii V. Cheskidov** – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Deputy Director of the Mining Institute, National University of Science and Technology “MISIS”, Moscow, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0001-6165-5439>; e-mail: [vcheskidov@isis.ru](mailto:vcheskidov@isis.ru)

**Dmitriy S. Moshkov** – Postgraduate Student, Department of Geology and Mine Surveying, Mining Institute, National University of Science and Technology “MISIS”, Moscow, Russian Federation

**Daniil V. Chumachenko** – Student, Department of Geology and Mine Surveying, Mining Institute, National University of Science and Technology “MISIS”, Moscow, Russian Federation

**Kirill S. Gakh** – Student, Department of Geology and Mine Surveying, Mining Institute, National University of Science and Technology “MISIS”, Moscow, Russian Federation

**Nikolay A. Botov** – Postgraduate Student, Department of Geology and Mine Surveying, Mining Institute, National University of Science and Technology “MISIS”, Moscow, Russian Federation

**Article info**

Received: 20.02.2026

Revised: 24.03.2026

Accepted: 13.04.2026