

Интеллектуальная система оценки качества руды

О. Д. Иващук¹, Е. В. Нестерова¹, С. В. Игрунова¹, О. О. Иващук², В. И. Федоров¹, А. Ю. Родионов¹

¹ Белгородский государственный национальный исследовательский университет, Белгород, Россия

² Каспийский университет технологий и инжиниринга им. Ш. Есенова, Актау, Казахстан

Аннотация. В работе предложен комплексный подход к выбору технологических решений по рудоподготовке, позволяющий объединить интеллектуальные и количественные методы для обоснования решений по управлению добычей и обогащением полезных ископаемых. Интеллектуальная система включает в себя базу данных для принятия оптимальных решений, модели, основанные на нейронных сетях и классических математических методах, технических средствах, технологических операций и организационных приемов, позволяющих осуществить мероприятия по управлению качеством руд. Предложен новый подход к классификации фрагментов фракций руды, на основе нейронной сети, имеющей функционал нахождения зерен минералов руды на изображении с последующей оценкой степени ее раскрытия, что позволило увеличить эффективность распознавания изображений срезов руды не менее чем на 5% по сравнению с аналитическим способом анализа руды.

Ключевые слова: комплексный подход, обогащение руды, интеллектуальная система, нейронная сеть.

DOI 10.14357/20718594230409

EDN MJTSYB

Введение

Продукция горнодобывающего производства представляет собой минеральное сырье для металлургических и других производств. От качества продукции, получаемой из рудников, шахт и карьеров зависят производственные и экономические показатели как ее потребителей, так и самих горных предприятий. Руда при обогащении подвергается механической обработке, поэтому минералы в процессе обогащения не изменяют своих основных химических свойств и состава. Обогащение руд - совокупность методов разделения металлов и минералов друг от друга по разнице их физических и/или химических свойств. Из железных руд промышленное значение имеют главным образом красный железняк (оксида железа Fe_2O_3 от 60 до 70%) и магнитный железняк (оксида железа Fe_3O_4 от 55 до 60%) [2].

К основному процессу обогащения относится разделение минералов, в результате которого полезные компоненты выделяются в виде концентратов, а порода и примеси удаляются в

виде хвостов. На обогатительной фабрике железная руда проходит подготовительную, обогатительную и вспомогательную обработку, причем после каждого этапа руда исследуется на наличие примесей железа.

Обеспечение высокой эффективности использования материальных и энергетических ресурсов и экологической результативности в добыче железных руд при производстве железорудного сырья и железа прямого восстановления влияет на количество выбросов загрязняющих веществ, водопользования и обращения с отходами. Отходы обогатительных фабрик образуются при добыче и обогащении железной руды. В связи с этим, основная задача подготовительного этапа – классификация железной руды по крупности зерен минералов, входящих в породу [1, 2]. После каждой операции руда подвергается анализу на наличие минералов [3].

Целью данного исследования является совершенствование процесса классификации качества руды с помощью комплексного подхода, включающего интеллектуальные и классические математические методы, лежащие в основе

разработанной интеллектуальной системы. Предлагаемая интеллектуальная система, в основе которой лежит модель нейронной сети, позволит классифицировать руду по физико-химическим характеристикам на обогатительной фабрике в режиме реального времени. Это позволит без задержки оптимизировать технологические параметры дробления и увеличить производительность обогатительной фабрики.

1. Современные средства и подходы к оценке качества руды

В научной литературе подробно описаны подходы к обогащению железных руд, применяемые в условиях высокой финансовой затратности и энергоемкости. Проверка эффективности работы оборудования включает традиционные методы, использующие, как физико-химические модели, модели оптимального управления производственными процессами, так и методы интеллектуального анализа [4-6].

Причинно-следственные связи параметров математических моделей, оптимизирующих управление технологическими процессами обогатительной фабрики, зависят от многих факторов, связанных с человеческой деятельностью. Автоматизированные методы обработки данных, включающие интеллектуальный анализ о химическом и гранулометрическом составе руды, позволяют рассчитать корреляционные зависимости, снизить человеческий фактор и отбраковать остатки [7]. Так, техническим результатом разработки Топчаева В.П. и др. «Интеллектуальная система автоматического мониторинга качества и количества потока руды в процессах подготовки к обогащению» является повышение эффективности мониторинга и надежности работы устройства, содержащего автоматические весоизмерители руды и камеру с видеодрайвером [8]. Недостатком этой системы является невозможность получения прогностической информации о параметрах руды. Она не идентифицирует контролируемые качественные показатели, поэтому не обеспечивает требуемую точность и оперативность контроля или мониторинга.

Прогнозная оценка, включающая классификацию, характеристику крупности продуктов дробления на основе математических моделей циклов помола, позволяет улучшить эффективность оборудования обогатительной фабрики,

но в то же время не учитывает гранулометрический состав руды [9, 10].

В работах других авторов уже встречался комплексный подход, включающий имитационную модель с учетом физико-механических свойств, описывающих прочностные характеристики руды, текстуру горной породы [11].

Применение нейросетевых алгоритмов для распознавания графических образов руды, полученных сканированием, является альтернативным методом минимизации влияния человеческого фактора в задачах изображений [12-14].

В работах [15-18] в нейро-нечетких сетевых моделях, оценивающих параметры процесса обогащения, не учитываются количественные параметры руды, влияющие на технологические показатели процесса дробления.

В работах [5, 6, 19] авторами разрабатываются модели с использованием как стандартных методов математической обработки данных, так и методов интеллектуального анализа, позволяющие прогнозировать изменение эффективности работы мельниц обогатительной фабрики горно-обогатительного комбината.

Анализ научной литературы показал перспективность использования нейронных сетей для разработки информационных систем по оценке качества руды. В сравнении с традиционными подходами, современные методы, такие как нейронные сети, демонстрируют повышенную эффективность и точность в данной области [20].

Для получения более точной информации требуется применение методов химического анализа и визуального исследования образцов руды, которые требуют высокой квалификации специалистов и больших временных затрат. Совместное использование интеллектуальных и математических классических методов для анализа изображений руды позволяет качественно прогнозировать измельчаемость, обогащаемость и другие характеристики технологической ценности руды.

Ярким примером успешного применения такого подхода является оптико-геометрический анализ в технологической минералогии, объединяющий в себе методы оптической и электронной микроскопии, с применением компьютерных средств обработки и анализа изображений [21, 22], включающий в себя ручные и автоматизированные методы анализа. Выше указанные методы крайне трудоемки, и сопровождаются существенными погрешностями в результатах

оценки структурно-фазовых характеристик руды: характеристик минералов, их морфологию, характер сростаний, степень и модальность раскрытия, распределение сростков по качеству в зависимости от режимов подготовки руды и т.д.

В настоящее время автоматизированные методы оптико-геометрического анализа характеристик минеральных комплексов руды опираются на использование специализированных функций анализа цифровых изображений, которые реализованы уже в целом ряде лабораторных установок (в частности в анализаторе «Минерал С7» производства ООО «СИАМС»), сформированного на базе оптического минералогического микроскопа отраженного и проходящего света, цифровой камеры и блока обработки информации.

Точность распознавания изображения минералов на анализаторе зависит от их оптических свойств, оказывающих определяющее влияние на их контрастность на общем фоне цифровой фотографии. Эта проблема может быть уменьшена путем использования изображений в обратнорассеянных электронах. Как показал наш опыт, в этом случае зачастую получаемые изображения имели характеристики не позволяющие выполнить качественное распознавание зерен минералов с помощью классических методов анализа изображений.

Успешное решение задачи оценки характеристик минеральных комплексов руды в этом случае возможно только с применением методов глубокого обучения на основе нейронных сетей, результатом которого будет выделение нераспознанных зерен минералов с последующей их обработкой классическими методами анализа изображений.

В этой связи применение комплексного подхода, предлагаемого авторами для оценки качества руды в количественном виде, позволит объединить интеллектуальные и количественные методы для обоснования решений по управлению качеством руды и повышением точности и эффективности этого процесса в интеллектуальной системе.

2. Разработка интеллектуальной системы

Основные этапы разработки интеллектуальной системы: выбор модели нейронной сети, со-

ставление алгоритма обучения нейросетевой модели, разработка пользовательского интерфейса. Разработка системы основана на моделях нейронных сетей для автоматической оценки качества руды, включающей определение перечня требований и контролируемых характеристик, размера выделяемых зерен, их тип показателей, необходимость исключения зерен, часть которых не попадает на изображение, также степень раскрытия, доля свободной поверхности, доли поверхностей сростаний с другими минералами, распределение зерен по классам крупности, факторы формы зерен. Их совокупность характеризует степень раскрытия, выбор методов для определения значений показателей качества, определение численных значений срезов. Сопоставление полученных данных с характеристиками, полученными классическими методами анализа изображений (пороговыми, адаптивными), в том числе ручными, предполагающими подсчет и измерение объектов путем визуального контроля через окуляры оптического микроскопа, что позволит оптимизировать процессы добычи и обогащения. Ручной метод, включающий химический анализ и визуальное исследование, является долгим и трудоемким процессом по получению информации, необходимой для оперативного управления процессом обогащения руды.

Для первичной обработки данных были взяты образцы руды Стойленского ГОКа. Эффективность планирования и проведения операций по добыче железной руды зависит от точности и скорости проведения анализа содержания железа в руде. Предлагаемый комплексный подход к определению качества руды и содержания в ней металлов включает химический и спектральный методы, гравиметрический анализ и алгоритм, основанный на интеллектуальном анализе снимков срезов рудной массы.

Для разработки интеллектуальной системы классификации качества руды и извлекаемости железа с помощью комплексного подхода необходимо:

- создать алгоритм обработки данных рудных месторождений и их классификации с использованием нейронных сетей;
- сформировать базу данных, включающую типы руд и их характеристики;
- провести обучение нейронной сети на обширном объеме данных для достижения высокой точности оценки качества руды;

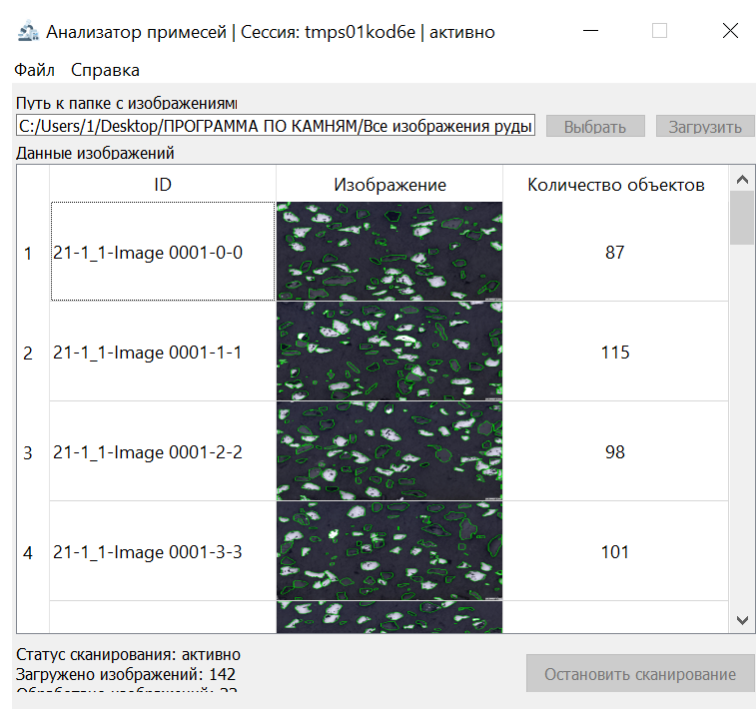


Рис. 1. База данных срезов руды

- разработать пользовательский интерфейс, с возможностью обучения нейронной сети с учетом новых данных.

Классификация изображений срезов руды на основе обнаружения объектов проводилась с использованием интеллектуальных методов анализа данных на базе архитектуры нейронных сетей YOLO (You Only Look Once), которая относится к алгоритмам быстрого обнаружения объектов в реальном времени. На вход подается пакет всех изображений, которые проходят через сеть один раз, что не могут выполнить другие алгоритмы [19, 20].

Разработанная интеллектуальная система, где обученная модель с весовыми коэффициентами позволит: провести анализ и нормализацию характеристик руды, включая содержание полезных компонентов, примесей и других параметров; классифицировать качество руды на основе полученных данных с оценкой показателей от 0 до 100 %; спрогнозировать характеристики руды на основе имеющихся данных. Для обучения нейронной сети была создана обширная база данных, содержащая информацию о качестве руды и ее характеристиках (Рис. 1).

Особое внимание уделялось корректности и разнообразию данных в обучающей выборке, чтобы обеспечить высокую эффективность работы системы.

Первоначальное тестирование системы показало ее высокую точность и надежность в оценке качества обработки руды. При этом, система может быть доработана и улучшена с увеличением объема обучающей выборки и оптимизацией нейронных сетей.

Принцип работы алгоритма заключается в том, что на вход ему подаются изображения срезов рудной массы, полученные с помощью технологического оборудования. Затем сама руда детектируется на изображении, показанном на Рис. 2.

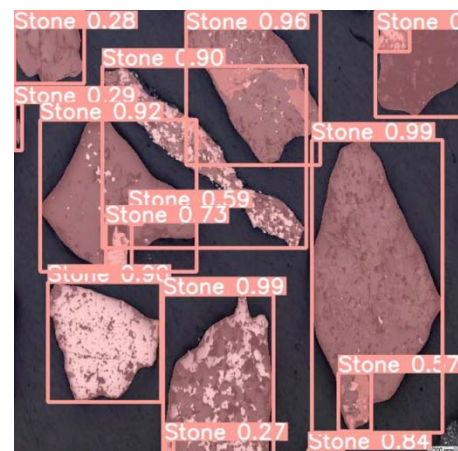


Рис. 2. Детектирование и сегментация руды

Табл. 1. Доли веществ для каждого промежутка

☒ Percent	Bounds	5	13	22	31	40	49	58	67	77	88	Save
Name	0-5	5-13	13-22	22-31	31-40	40-49	49-58	58-67	67-77	77-88	88-100	
21-1_1	0.475	0.023	0.011	0.011	0.01	0.014	0.02	0.048	0.142	0.227	0.02	
21-1_2	0.636	0.02	0.016	0.013	0.02	0.035	0.065	0.083	0.071	0.036	0.006	
21-1_3	0.641	0.019	0.022	0.018	0.023	0.028	0.037	0.037	0.068	0.085	0.021	
21-1_6	0.359	0.038	0.032	0.03	0.027	0.048	0.057	0.106	0.174	0.118	0.011	
21-1_7	0.29	0.075	0.049	0.058	0.046	0.07	0.085	0.093	0.17	0.061	0.003	
21-1_8	0.298	0.093	0.093	0.056	0.118	0.05	0.05	0.118	0.062	0.043	0.019	
21-1_9_sshivka	0.397	0.088	0.132	0.103	0.088	0.088	0.029	0.044	0.015	0.015	0	

Табл. 2. Количество объектов для каждого промежутка

☒ Percent	Bounds	5	13	22	31	40	49	58	67	77	88	Save
Name	0-5	5-13	13-22	22-31	31-40	40-49	49-58	58-67	67-77	77-88	88-100	
21-1_1	398	19	9	9	8	12	17	40	119	190	17	
21-1_2	875	27	22	18	27	48	89	114	98	50	8	
21-1_3	796	24	27	22	29	35	46	46	85	106	26	
21-1_6	506	53	45	43	38	67	81	149	246	166	16	
21-1_7	171	44	29	34	27	41	50	55	100	36	2	
21-1_8	48	15	15	9	19	8	8	19	10	7	3	
21-1_9_sshivka	27	6	9	7	6	6	2	3	1	1	0	

На фотографиях срезов руды могут присутствовать металлические включения – слойки. По их текстурным характеристикам производится анализ обработанной руды. Определяется, какая доля магнетита, по сравнению с другими веществами, содержится в руде. В результате, алгоритм дает оценку степени раскрытия руды, которая может быть использована для управления процессом добычи и улучшения качества производимой продукции. После окончания вычислений результаты показываются в таблице (Табл. 1).

С помощью чекбокса Percent можно выбирать между просмотром результатов таблицы в виде доли от общего количества и количества объектов на данном промежутке (Табл. 2).

Таким образом, разработанная информационная система, основанная на нейронных сетях YOLO, представляет собой эффективный инструмент для автоматизации процесса оценки качества руды, что способствует повышению эффективности добычи и обогащения полезных ископаемых.

Модель позволила увеличить эффективность распознавания изображений срезов руды не менее чем на 5% по сравнению с традиционным способом анализа руды.

Заключение

Была разработана интеллектуальная система, имеющая функционал нахождения зерен минералов руды на изображении с последующей оценкой степени ее раскрытия.

Комплексный подход дал возможность обрабатывать большие объемы данных и выявлять скрытые зависимости между различными параметрами руды, на основе имеющихся данных прогнозировать и предсказывать ее характеристики, что позволит оптимизировать процесс добычи и обогащения.

Таким образом, интеллектуальная система, представленная совокупностью сведений о количественных и качественных показателях железа в руде, содержит блок реализации системы управления качеством руды, включающий в себя базу данных для принятия оптимальных решений, модели, основанные на нейронных сетях и классических математических методах, технических средствах, технологических операций и организационных приемов, позволяющих осуществить мероприятия по управлению качеством руд.

Литература

1. Закондырин А. Е. Наилучшие доступные технологии в горнодобывающем секторе: актуальные проблемы и пути их решения // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2020. С. 55-64.
2. Кондратьев В.Б. Горная промышленность, инновации и экономический рост: опыт развивающихся стран // Горная промышленность. 2020. № 3. С. 98-104.
3. Воробьев Н. Д. Уравнение кинетики измельчения по удельной поверхности // Вестник БГТУ имени В. Г. Шухова. 2013. № 1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/uravnenie-kinetiki>

- izmelcheniya-po-udelnoy-poverhnosti (дата обращения: 19.10.2023).
4. Чантурия Е.Л., Гзогян С.Р., Рязанцева М.В., Томская Е.С., Вишкова А.А., Новикова Н.Г., Краснов А.Н. Современное состояние и способы повышения эффективности обогащения железистых кварцитов // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2012. № 12. 48 с.
 5. Ивашук О. Д., Игрунова С. В., Нестерова Е. В., Штана А. И., Дунаева В. А. Многокомпонентный подход к оценке эффективности валковых мельниц обогатительных фабрик // Информационные технологии в науке, образовании и производстве (ИТНОП-2023). 2023. Белгород: НИУ «БелГУ». С.164-170.
 6. Ivashchuk O.D., Ivashchuk O.A., Fedorov V.I., Shtana A.I., Rodionov A.U. Formation of a complex method for analyzing multidimensional production data of a processing plant // Economic Annals-XXI. 2021. 194 (11-12). P. 36-48.
 7. Шнайдер Д.А., Калинина Е.А. Повышение производительности дробильно-обогатительной фабрики на основе оптимизационной модели // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2019. Т. 19. № 3. С. 156–164. URL: <https://core.ac.uk/download/pdf/480670796.pdf> (дата обращения: 25.10.2023).
 8. Салихов З.Г., Топчаев В.П., Топоров В.И., Аксельрод В.Ю., Демин А.В., Салихов М.З. Интеллектуальная система автоматического мониторинга качества и количества потока руды в процессах подготовки к обогащению: пат. 2605861С2 Рос. Федерация. № 2014139902/03; опубли. 27.12.2016. Бюл. № 12. 14 с. URL: <https://patents.google.com/patent/RU2605861C2/ru> (дата обращения: 25.10.2023).
 9. Арсентьев В.А., Биленко Л.Ф., Панарин С.Н., Пыжик Т.Ф. Управление фракционным составом дробленого щебня обогащение руд // Руда и металлы. Москва, 2010. № 5. С. 3-6.
 10. Маляров П.В. Интенсификация процессов измельчения в условиях Талнахской обогатительной фабрики (ТОФ) // Обогащение руд. 2008. № 6. С. 6-10.
 11. Pelevin A.E. Iron ore beneficiation technologies in Russia and ways to improve their efficiency // Journal of Mining Institute. 2022. V. 256. P. 579-592.
 12. Рыльникова М.В., Клебанов Д.А., Макеев М.А., Кадочников М. В. Применение искусственного интеллекта и перспективы развития аналитических систем больших данных в горной промышленности // Горная промышленность. 2022. № 3. С. 89–92.
 13. Wentong W., Han L., Lingling L., Yilin L., Xiaodong W., Zhuohua L., Jinglun W., and Yi C. Application of local fully Convolutional Neural Network combined with YOLO v5 algorithm in small target detection of re-mote sensing image // PloS ONE. 16(10). URL: <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0259283> (дата обращения 25.10.2023).
 14. Guo H. Big Earth data: A new frontier in Earth and information sciences, Big Earth Data. 2017. V. 1. No 1-2. P. 4-20. URL: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/20964471.2017.1403062> (дата обращения 25.10.2023).
 15. Кузнецов В.В., Чижова И.А. Опыт разработки и применения интеллектуально-графических компьютерных систем // Руды и металлы. 2021. № 1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/opyt-razrabotki-i-primeneniya-intellektualno-graficheskikh-kompyuternykh-sistem> (дата обращения: 25.10.2023).
 16. Силкина Г.Ю., Шевченко С.Ю. Искусственный интеллект в моделях функционирования и инновационного развития промышленных предприятий // Стратегическое управление развитием цифровой экономики на основе умных технологий. СПб: ПолитехПресс. 2021. С. 459-501.
 17. Туз А.А., Богатиков В.Н. Построение модели процесса измельчения в агрегате непрерывного действия с замкнутым циклом ОАО «Ковдорский ГОК» с применением нейросетевых моделей // Труды Кольского научного центра РАН. 2013. № 5 (18). С. 189-198.
 18. Жигалов А.А., Ивашук О.А., Ивашук О.О., Мереке Б.Ж. Подходы к биометрической детекции сельскохозяйственных животных на основе нейросетевого аппарата // Информационные технологии в науке, образовании и производстве (ИТНОП-2023). Белгород: НИУ «БелГУ». С. 153-56.
 19. Абрамов Н.С., Макаров Д.А., Талалаев А.А., Фраленко В.П. Современные методы интеллектуальной обработки данных ДЗЗ // Программные системы: теория и приложения. 2018. 4 (39). С. 417-442.
 20. Технологические аспекты рационального недропользования: роль технологической оценки в развитии и управлении минерально-сырьевой базой страны / Т.В. Башлыкова, Г.А. Пахомова, Б.С. Лагов и др.; под науч. ред. Ю.С. Карабасова. М.: МИСИС, 2005. 576 с.
 21. Ожогина Е.Г., Котова О.Б., Чантурия Е.Л. Роль технологической минералогии в прогнозной оценке качества минерального сырья и его глубокой и комплексной переработке // Горный журнал. 2007. № 2. С. 15-22.
 22. Petrosov D.A., Lomazov V.A., Petrosova N.V. Model of an artificial neural network for solving the problem of controlling a genetic algorithm using the mathematical apparatus of the theory of petri nets // Applied Sciences (Switzerland). 2021. V. 11, No 9. URL: https://www.researchgate.net/publication/368002387_Model_of_an_Artificial_Neural_Network_for_Solving_the_Problem_of_Controlling_a_Genetic_Algorithm_Using_the_Mathematical_Apparatus_of_the_Theory_of_Petri_Nets (дата обращения 25.10.2023).

Ивашук Орест Дмитриевич. Кандидат технических наук, доцент. Доцент, Белгородский государственный национальный исследовательский университет. Области исследований: вычислительная математика, информационные технологии, искусственный интеллект, интеллектуальные системы. E-mail: ivaschuk_o@bsu.edu.ru

Нестерова Елена Викторовна. Кандидат экономических наук. Доцент, Белгородский государственный национальный исследовательский университет. Области исследований: информационные технологии, поддержка принятия решений, интеллектуальные технологии. E-mail: nesterova@bsu.edu.ru

Игрунова Светлана Васильевна. Кандидат социологических наук, доцент. Доцент, Белгородский государственный национальный исследовательский университет. Области исследований: информационные технологии, поддержка принятия решений, интеллектуальные технологии. E-mail: igrunova@bsu.edu.ru (Ответственный за переписку)

Иващук Олег Орестович. Кандидат физико-математических наук. Доцент, Каспийский университет технологий и инжиниринга им. Ш. Есенова. Области исследований: вычислительная математика, информационные технологии, искусственный интеллект, интеллектуальные системы. E-mail: ivaschuk@bsu.edu.ru

Федоров Вячеслав Игоревич. Кандидат технических наук. Доцент, Белгородский государственный национальный исследовательский университет. Области исследований: информационные технологии, поддержка принятия решений, интеллектуальные технологии. E-mail: fedorov_v@bsu.edu.ru

Родионов Алексей Юрьевич. Аспирант. Белгородский государственный национальный исследовательский университет. Области исследований: вычислительная математика, информационные технологии, искусственный интеллект, интеллектуальные системы. E-mail: 1410495@bsu.edu.ru

Intelligent System for Assessing the Quality of Ore

O. D. Ivaschuk¹, E. V. Nesterova¹, S. V. Igrunova¹, O. O. Ivaschuk², V. I. Fedorov¹, A. Yu. Rodionov¹

¹ Belgorod National Research University, Belgorod, Russia

² Caspian University of Technology and Engineering named after Sh.Yessenov, Republic of Kazakhstan

Abstract. The paper proposes an integrated approach to the selection of technological solutions for ore preparation, which allows combining intellectual and quantitative methods to justify decisions on the management of mining and mineral processing. The intelligent system includes a database for making optimal decisions, models based on neural networks and classical mathematical methods, technical means, technological operations and organizational techniques that allow for ore quality management measures. A new approach to the classification of fragments of ore fractions is proposed, based on a neural network that has the functionality of finding ore mineral grains in an image with a subsequent assessment of the degree of its disclosure, which made it possible to increase the efficiency of image recognition of ore sections by at least 5% compared to the analytical method of ore analysis.

Keywords: integrated approach, ore beneficiation, intelligent system, neural network.

DOI 10.14357/20718594230409

EDN MJTSYB

References

1. Zakondyryn A.E. Nailuchshie dostupnye tekhnologii v gornodobyvayushchem sektore: aktual'nye problemy i puti ih resheniya [Best Available Techniques in mining Mining informational and analytical bulletin industry: topical issues and solution methods] // Gornyj informacionno-analiticheskij byulleten' [MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.]. 2020 (6-1):55-64.
2. Kondratiev V.B. Gornaya promyshlennost', innovacii i ekonomicheskij rost: opyt razvivayushchihsya stran [Mining, innovation and economic growth: the experience of developing countries] // Gornaya promyshlennost' [Russian Mining Industry]. 2020. No 3. P. 98-104.
3. Vorobyov N.D. Uravnenie kinetiki izmel'cheniya po udel'noj poverhnosti [The equation of the kinetics of grinding by specific surface]. Vestnik BGTU imeni V. G. Shuhova [Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov]. 2013. No 1. P. 49-53.
4. Chanturia E.L., Gzogyan S.R., Ryazantseva M.V., Tomskaya E.S., Vishkova A.A., Novikova N.G., A.N. Krasnov. Sovremennoe sostoyanie i sposoby povysheniya effektivnosti obogashcheniya zhelezistykh kvarcitov [Current state and methods of increasing the efficiency of enrichment of ferruginous quartzites] // Gornyj informacionno-analiticheskij byulleten' [Mining informational and analytical bulletin (scientific and technical journal). Selected articles (special issue)]. 2012. No 12. 48 P.
5. Ivashchuk O.D., Igrunova S.V., Nesterova E.V., Shtana A.I., Dunaeva V.A. Mnogokomponentnyj podhod k ocenke effektivnosti valkovykh mel'nic obogatitel'nykh fabrik [Multi-component approach to assessing the efficiency of roller mills of concentrators] // Informacionnye tekhnologii v nauke, obrazovanii i proizvodstve (ITNOP-2023): sbornik trudov IX Mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoy konferencii [Information Technologies in Science, Education and Production: Collection of Works of the IX International Conference on Science and Technology]. Belgorod: Belgorod State National Research University. 2023. P. 164-170.
6. Ivashchuk O.D., Ivashchuk O.A., Fedorov V.I., Shtana A.I., Rodionov A.U. Formation of a complex method for analyzing multidimensional production data of a processing plant // Economic Annals-XXI. 2021. No 194 (11-12). P. 36-48.

7. Shnayder D.A., Kalinina E.A. Povyshenie proizvoditel'nosti dробил'no-obogatitel'noj fabriki na osnove optimizacionnoj modeli [Productivity Increasing of the Crushing and Beneficiation Plant Based on the Optimization Model] // Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics. 2019. V. 19. No 3. P. 156–164. Available at: <https://core.ac.uk/download/pdf/480670796.pdf>. (accessed October 25, 2023).
8. Salikhov Z.G., Topchaev V.P., Toporov V.I., Akselrod V.Yu., Demin A.V., Salikhov M.Z. Intellektual'naya sistema avtomaticheskogo monitoringa kachestva i kolichestva potoka rudy v processah podgotovki k obogashcheniyu [Intelligent system for automatic monitoring of quality and quantity of ore flow in process of preparation for concentration]. Patent RF No. 2014139902/03. 2016. Available at: <https://patents.google.com/patent/RU2605861C2/ru> (accessed October 25, 2023).
9. Arsentyev V.A., Bilenko L.F., Panarin S.N., Pyzhik T.F. Upravlenie frakcionnym sostavom drobenogo schhebnya obogashchenie rud [Crushed stone fractional size analysis control] Obogashchenie rud [Ore and Metals]. 2010. No 5. P. 3-6.
10. Malyarov P.V. Intensifikatsiya processov izmel'cheniya v usloviyah Talnahskoj obogatitel'noj fabriki (TOF) [Intensification of grinding processes in the conditions of the Talnakh enrichment plant (TOF)] // Obogashchenie Rud [Ore and Metals]. 2008. No 6. P. 6-10.
11. Pelevin A.E. Iron ore beneficiation technologies in Russia and ways to improve their efficiency. Journal of Mining Institute. 2022. V. 256. P. 579-592.
12. Rynnikova M.V., Klebanov D.A., Makeev M.A., Kadochnikov M.V. Primenenie iskusstvennogo intellekta i perspektivy razvitiya analiticheskikh sistem bol'shih dannyh v gornoy promyshlennosti [Conditions and principles for sustainable development of mining companies during a period of higher risks and global challenges] // Gornaya promyshlennost' [Russian Mining Industry]. 2022. No 3. P. 69–73.
13. Wentong W., Han L., Lingling L., Yilin L., Xiaodong W., Zhuohua W., Jinglun L., Yi C. Application of local fully Convolutional Neural Network combined with YOLO v5 algorithm in small target detection of remote sensing image. PloS ONE. 2021. No 16. P. 10. Available at: <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0259283> (accessed October 25, 2023).
14. Guo H. Big Earth data: A new frontier in Earth and information sciences. Big Earth Data. 2017. V. 1. No 1-2. P. 4-20. Available at: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/20964471.2017.1403062> (accessed October 25, 2023).
15. Kuznetsov V.V., Chizhova I.A. Opyt razrabotki i primeneniya intellektual'no-graficheskikh komp'yuternykh sistem [Experience in developing and using intelligent graphical computer systems]. // Rudy i metally [Ores and metals]. 2021. No 1. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/opyt-razrabotki-i-primeneniya-intellektualno-graficheskikh-kompyuternykh-sistem> (accessed October 25, 2023).
16. Silkina G.Yu., Shevchenko S.Yu., eds. Iskusstvennyj intellekt v modelyakh funkcionirovaniya i innovatsionnogo razvitiya promyshlennykh predpriyatij [Artificial intelligence in models of functioning and innovative development of industrial enterprises] // Strategicheskoe upravlenie razvitiem cifrovoj ekonomiki na osnove umnykh tekhnologij [Strategic management of the development of the digital economy based on smart technologies] [Strategic management of digital economy development based on smart technologies]. SPb: Politekh-Press, 2021. P. 459-501.
17. Tuz A.A., Bogatkov V.N. Postroenie modeli processa izmel'cheniya v agregate nepreryvnogo dejstviya s zamknutym ciklom OAO «Kovdorskij GOK» s primeneniem nejrosetevykh modelej [Construction of a model of the grinding process in a continuous unit with a closed cycle of JSC "Kovdorsky GOK" using neural network models] // Trudy Kol'skogo nauchnogo centra RAN [Kola Scientific Center of the Russian Academy of Sciences]. 2013. No 5 (18). P. 189-198.
18. Zhigalov A.A., Ivashchuk O.A., Ivashchuk O.O., Zhumadilova M.B. Podhody k biometricheskoy detekcii sel'skohozyajstvennykh zhivotnykh na osnove nejrosetevogo apparata [Approaches to biometric detection of farm animals based on neural network apparatus]. Informatsionnye tekhnologii v nauke, obrazovanii i proizvodstve (ITNOP-2023) // sbornik trudov IX Mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy konferentsii [Information Technologies in Science, Education and Production: Collection of Works of the IX International Conference on Science and Technology]. Belgorod: Belgorod State National Research University. 2023. P. 153-156.
19. Abramov N.S., Makarov D.A., Talalaev A.A., Fralenko V.P. Sovremennye metody intellektual'noj obrabotki dannyh DZZ [Modern methods for intelligent processing of Earth remote sensing data] // Programmye sistemy: teoriya i prilozheniya [Program Systems: Theory and Applications (Design)]. 2018. V. 9. No 4 (39). P. 417-442.
20. Bashlykova T.V., Pakhomova G.A., Lagov B.S. Tekhnologicheskie aspekty racional'nogo nedropol'zovaniya: rol' tekhnologicheskoy ocenki v razvitii i upravlenii mineral'no-syr'evoy bazoy strany [Technological aspects of rational subsoil use: the role of technological assessment in the development and management of the country's mineral resource base]. 2005. M.: MISIS. 576 p.
21. Ozhogina E.G., Kotova O.B., Chanturia E.L. Rol' tekhnologicheskoy mineralogii v prognoznnoy ocenke kachestva mineral'nogo syr'ya i ego glubokoj i kompleksnoj pererabotke [The role of technological mineralogy in predictive assessment of the quality of mineral raw materials and its deep and complex processing] // Gornyi Zhurnal [Mining Magazine]. 2007. No 2. P. 15-22.
22. Petrosov D.A., Lomazov V.A., Petrosova N.V. Model of an artificial neural network for solving the problem of controlling a genetic algorithm using the mathematical apparatus of the theory of petri nets // Applied Sciences (Switzerland). 2021. V. 11. No 9. Available at: https://www.researchgate.net/publication/368002387_Model_of_an_Artificial_Neural_Network_for_Solving_the_Problem_of_Controlling_a_Genetic_Algorithm_Using_the_Mathematical_Apparatus_of_the_Theory_of_Petri_Nets (accessed October 25, 2023).

Ivashchuk Orest D. Candidate of Technical Sciences, docent. Docent, Belgorod State National Research University. Research areas: computational mathematics, information technology, artificial intelligence, intelligent systems. E-mail: ivaschuk_o@bsu.edu.ru

Nesterova Elena V. Candidate of Economic Sciences. Docent, Belgorod State National Research University. Research areas: information technologies, decision support, intelligent technologies. E-mail: nesterova@bsu.edu.ru

Igrunova Svetlana V. Candidate of Sociological Sciences, docent. Docent, Belgorod State National Research University. Research areas: information technologies, decision support, intelligent technologies. E-mail: igrunova@bsu.edu.ru

Ivashchuk Oleg O. Candidate of Physical and Mathematical Sciences. Docent, Caspian University of Technology and Engineering named after Sh. Yessenov. Research areas: computational mathematics, information technology, artificial intelligence, intelligent systems. E-mail: ivaschuk@bsu.edu.ru

Fedorov Vyacheslav I. Candidate of Technical Sciences. Docent, Belgorod State National Research University. Research areas: information technologies, decision support, intelligent technologies. E-mail: fedorov_v@bsu.edu.ru

Rodionov Alecsey Yu. Graduate student. Belgorod State National Research University. Research areas: computational mathematics, information technology, artificial intelligence, intelligent systems. E-mail: 1410495@bsu.edu.ru