

УДК 504.062:[658.567.1:622.713]

## КОМПЛЕКСИРОВАНИЕ И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ ПЕРЕРАБОТКИ ЖЕЛЕЗОРУДНЫХ ОТХОДОВ ОБОГАТИТЕЛЬНЫХ ФАБРИК

*Шорохова А.В., старший преподаватель кафедры бизнеса и инноваций (shoroxova\_a@mail.ru)  
Новичихин А.В., д.т.н., доцент, зав. кафедрой транспорта и логистики (novitchihin@pochta.ru)*

Сибирский государственный индустриальный университет  
(654007, Россия, Кемеровская обл., г. Новокузнецк, ул. Кирова, 42)

**Аннотация.** Проведен анализ существующих отечественных и зарубежных технологий по переработке и утилизации железорудных отходов.

Для условий Кемеровской области обоснованы эффективные технологии утилизации отходов с получением дополнительной продукции, соответствующей требованиям потребителей. Эффективные технологии комплексированы в сценарии, обеспечивающие полный цикл рационального природопользования. Выполнена постановка задачи формирования сценариев переработки отходов. Разработаны сценарии поэтапной переработки железорудных отходов с извлечением полезных компонентов химическими методами, восстановлением нарушенных земель и созданием рекреационных зон на освобожденных территориях. Предложены рекомендации и технологические решения по круглогодичной переработке железорудных отходов химическими методами, в том числе в зимний период. Представлены карты отработки хвостохранилища с поэтапной переработкой и восстановлением нарушенных земель. Количество этапов определяется в зависимости от объема инвестиций и годовой производительности комплекса по переработке отходов с возможной одновременной отработкой нескольких секций. После полной выемки железорудных отходов из хвостохранилища проводятся подготовительные работы для постройки рекреационных зон – поиск тендера и выбор проекта зон отдыха, демонтаж и продажа оборудования, зданий и сооружений, восстановление земляного покрытия, посадка газона, саженцев деревьев и кустарников. Работы по восстановлению территории проводятся во время функционирования перерабатывающего предприятия; ввод в эксплуатацию зон отдыха осуществляется после его ликвидации. Осуществлено математическое моделирование сценариев переработки железорудных отходов обогатительных фабрик в условиях Кемеровской области по следующим показателям эффективности: экономический эффект; процесс восстановления нарушенных земель; объем загрязнений; численность населения горнопромышленных районов с нормативными социокультурными показателями; предотвращенный объем загрязнения на душу населения. Инструментарием модельных экспериментов является программный комплекс, реализационный в среде Scilab. Из предложенных сценариев выполнен отбор Парето-оптимальных решений графическим способом. Отбор приоритетных из Парето-оптимальных сценариев осуществляется ранжированием, основанным на уровнях социально-экологической безопасности (низкий, умеренный и высокий) в условиях Кемеровской области.

**Ключевые слова:** комплексирование технологий, сценарии, социально-экологическая безопасность, переработка, утилизация, рациональное природопользование, железорудные отходы, математическое моделирование.

**DOI:** 10.17073/0368-0797-2017-6-486-492

В Кемеровской области наиболее массовыми «неугольными» отходами являются хвосты обогащения железных руд [1, 2], что оказывает существенное негативное влияние на социально-экологическую обстановку в регионе с учетом объемов их переработки. В общей массе отходов, кроме тонкодисперсной «пустой» породы, содержатся тонны золота, десятки тонн серебра и сотни тысяч тонн железа, поэтому отвалы фабрик целесообразно рассматривать как техногенные месторождения. Дальнейшее распространение железорудных хвостов может привести к экологической катастрофе в регионе.

Железорудные отходы располагаются в хвостохранилищах, оборудованных пульпонасосными станциями оборотной воды с насосами и водоводами. Отходы обогащения располагаются, как правило, на расстоянии около 5 км от предприятий переработки. Основание хвостохранилищ состоит из естественного уплотненного слоя глины, что препятствует попаданию отходов в

почву и грунтовые воды. Содержание железа в отходах составляет более 15 %, из них порядка 3 % магнетита и около 2 – 4% пирита [1].

На основе анализа лучших отечественных и мировых практик [3 – 8] существуют следующие технологии переработки железорудных отходов: механические, гравитационные, флотационные, химические и магнитные методы обогащения (табл. 1).

В условиях Кемеровской области для железорудных отходов гравитационные методы переработки являются неэффективными, поскольку разница в плотности между полезными компонентами и породой невысока. Флотационные методы переработки требуют высоких капитальных вложений, основаны на гидрофильности и гидрофобности частиц, что экономически и экологически нецелесообразно по причине большого содержания серы в хвостах. Наиболее приоритетным методом переработки является химический [14, 16], позволяющий извлечь полезные компоненты, в том числе желе-

## Технологии переработки и утилизации железорудных отходов

Table 1. Iron ore wastes processing and utilization technologies

Технология	Источники образования отходов
Производство кирпичей и строительных материалов [9]	Вскрышные породы рудников, породные отвалы обогатительных фабрик
Производство пористых заполнителей в качестве добавок при получении бетона и цемента [9]	Дробленые породные отходы добывающих и обогатительных производств
Строительство дорог, промышленных площадок, насыпей и других объектов [10]	Вскрышные породы рудников, породные отвалы обогатительных фабрик
Производство органоминеральных удобрений [11, 12]	Отходы добывающих и обогатительных производств
Использование в гидротехническом строительстве (в качестве насыпного материала для дамб, фильтрующего и сорбирующего материала) [11, 12]	Вскрышные породы рудников, породные отвалы обогатительных фабрик
Извлечение редкоземельных элементов флотационными [13], гравитационными, магнитными, гидрометаллургическими, химическими и бактериальными методами [11, 14, 15]	Отходы добывающих и обогатительных производств
Механизированная технология проведения выработок, позволяющая оставлять пустую породу на месте ее получения или размещать на закрываемых рудниках в пространство околоствольных дворов и вертикальных стволов [11, 12]	Вся порода или ее часть размещаются в выработанном пространстве рудника в качестве закладочного материала

зо из пирита. В результате существенно уменьшается содержание серы в железном концентрате. Таким образом, продукция, полученная из отходов, будет отвечать требованиям металлургической промышленности и других потребителей.

На базе разработанного организационно-технологического механизма управления социально-экологической безопасностью горнопромышленных районов [17] предлагается отбор и комплексирование безотходных технологий переработки железорудных отходов, обеспечивающих полный цикл рационального природопользования, в сценарии и определением их оптимального множества.

В этой связи задачу формирования сценариев переработки отходов можно сформулировать следующим образом:

**Задача.** Задан перечень вариантов по переработке отходов и рекультивации нарушенных земель  $j, j \in [1; J]$ . Каждый вариант характеризуется определенным набором технологий  $Th(j)$  и показателей  $F(j) = \{F_1(j), l \in [1; L]\}$ . При  $L = 5$  имеем: экономический эффект  $F_1$ ; площади нарушенных и восстановленных земель  $F_2$ ; объем загрязнений в результате негативной деятельности производства  $F_3$ ; численность населения района с нормативными социокультурными показателями  $F_4$ ; предотвращенный объем загрязнений на душу населения района  $F_5$ .

**Требуется** сформировать набор сценариев  $A_n, n \in [1; M]$  по переработке отходов с созданием рекреационных зон на рекультивированных землях из множеств  $j$ -х

вариантов,  $j \in [1; J]$ , которые снижают негативные последствия производства в соответствии с нормативными показателями  $\{F_1^*\}$ :

$$\sum_{i=1}^T \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \sum_{j=1}^J Kp_{imni} \rightarrow \min \text{ при } A_n = \bigcup_{j=1}^J Th(j)$$

при условиях

$$\begin{aligned} F_1^*(A) < F_1(A); F_2^*(A) < F_2(A); F_3(A) > F_3^*(A); \\ F_4^*(A) < F_4(A); F_5^*(A) < F_5(A), \end{aligned} \quad (1)$$

где  $Kp$  – капитальные затраты для внедрения безотходных технологий, руб.

В соответствии с поставленной задачей разработана процедура формирования и комплексирования сценариев по переработке отходов с созданием рекреационных зон на освобожденных территориях, позволяющая комплексировать существующие технологии [17]. Сценарии переработки железорудных отходов в условиях обогатительных фабрик Кемеровской области представлены в табл. 2.

Разработанные сценарии переработки железорудных отходов предусматривают выход на проектную мощность в 2020 г., поэтапное восстановление освобожденных территорий с 2020 г., строительство рекреационных зон (озелененные парки отдыха) с 2031 г.

В соответствии с особенностями химических, технологических характеристик и пространственного расположения хвостохранилищ железорудных обогати-

Сценарии переработки железорудных отходов до 2035 года

Table 2. Iron ore wastes processing scenarios up to 2035

Характеристика	Показатель
Сценарий СМ. Строительство (2017 – 2018 гг.) и ввод комплекса по переработке хвостов с получением материалов для строительных нужд (отсыпка дорог, насыпей, дамб и прочее) в 2019 г.	Производительность комплекса 0,7 млн. т/год (100 т/ч). Объем инвестиций 30 млн. руб
Сценарий ЖКСВ. Строительство (2017 – 2018 гг.) и ввод комплекса по переработке хвостов с получением 60 – 62 % железорудного концентрата методом кучного выщелачивания серной кислотой в 2019 г.	Производительность комплекса 0,7 млн. т/год (100 т/ч). Объем инвестиций 64 млн. руб. Выход концентрата 60 тыс. т/год
Сценарий ЖКБВ. Строительство (2017 – 2018 гг.) и ввод комплекса по переработке хвостов с получением 60 – 62 % железорудного концентрата методом биологического выщелачивания тионовыми бактериями в 2019 г.	Производительность комплекса 0,7 млн. т/год (100 т/ч). Объем инвестиций 54 млн. руб. Выход концентрата 60 тыс. т/год
Сценарий ЗКБВ. Строительство (2017 – 2018 гг.) и ввод комплекса по переработке хвостов с получением 60 % золоторудного концентрата методом биологического выщелачивания тионовыми бактериями в 2019 г.	Производительность комплекса 0,7 млн. т/год (100 т/ч). Объем инвестиций 60 млн. руб. Выход концентрата 40 кг/год
Сценарий ЗКЦВ. Строительство (2017 – 2018 гг.) и ввод комплекса по переработке хвостов с получением 65 – 70 % золоторудного концентрата методом кучного выщелачивания (ционирование) в 2019 г.	Производительность комплекса 0,7 млн. т/год (100 т/ч). Объем инвестиций 96 млн. руб. Выход концентрата 48 кг/год
Сценарий МКБВ. Строительство (2017 – 2018 гг.) и ввод комплекса по переработке хвостов с получением 65 % медного концентрата методом биологического выщелачивания тионовыми бактериями в 2019 г.	Производительность комплекса 0,7 млн. т/год (100 т/ч). Объем инвестиций 96 млн. руб. Выход концентрата 56 т/год
Сценарий СКБВ. Строительство (2017 – 2018 гг.) и ввод комплекса по переработке хвостов с получением 65 % концентрата серебра методом биологического выщелачивания тионовыми бактериями в 2019 г.	Производительность комплекса 0,7 млн. т/год (100 т/ч). Объем инвестиций 60 млн. руб. Выход концентрата 80 кг/год

тельных фабрик сценарии предусматривают извлечение полезных компонентов круглогодично методом кучного выщелачивания. Хвосты обогащения орошаются слабым раствором серной кислоты  $H_2SO_4$ . В зимний период времени предлагаются следующие технологические решения: линию орошения покрыть 2-м слоем руды для изоляции от низких температур [14, 16].

Вследствие пространственной удаленности хвостохранилища от фабрики и климатических особенностей Кемеровской области раствор с полезными компонентами рекомендуется транспортировать по имеющимся трубопроводам на фабрику для дальнейшего восстановления и обезвоживания [18].

Технологический комплекс по восстановлению и осаждению полезных компонентов, полученных из хвостов обогащения, предлагается разместить в цехе обогащения. Дальнейшее обезвоживание рекомендуется проводить на имеющемся оборудовании, породу использовать для строительных целей в качестве минеральных добавок к асфальтобетону и земляного покрытия. В случае отсутствия спроса на строительные материалы – рекультивировать отходы после извлечения полезных компонентов с высадкой саженцев деревьев и кустарников.

Структура и последовательность работ по отработке отвала (рис. 1) осуществляется так: площадь хвостохра-

нилища разделяется на несколько секций. Количество секций и их размер определяются объемом инвестиций и мощностью перерабатывающего предприятия. На первом этапе производится отработка первой секции отстойника: выемка отходов с последующей рекультивацией площади первой секции.

На следующих этапах после полной выемки отходов из хвостохранилища на территории предприятия проводятся подготовительные работы для создания зон отдыха. В зависимости от объема инвестиций и годовой производительности установки по переработке отходов возможно осуществление отработки одновременно нескольких секций хвостохранилища, например первой и последней.

После полной выемки отходов из отстойника (этап  $n - 5$ ) осуществляется поиск тендера на проект рекреационных зон. Подготовительные работы для постройки рекреационных зон (этапы с  $n - 5$  по  $n$ ) состоят из выбора проекта рекреационных зон; демонтажа и продажи оборудования, демонтажа (модернизации) зданий и сооружений; восстановления земляного покрытия прилегающих территорий; посадки газона, саженцев деревьев и кустарников. Этапы проводятся во время функционирования перерабатывающего предприятия. Ввод в эксплуатацию зон отдыха осуществляется после ликвидации

предприятия (этапа  $n$ ). Таким образом, осуществляется полный цикл рационального природопользования.

Инструментарием модельных экспериментов является программный комплекс, состоящий из пяти моделей социально-экологической безопасности:

«Экономика» ( $F_1$ ), «Экология» ( $F_2$ ), «Экологоемкость производства» ( $F_3$ ), «Социум» ( $F_4$ ) и «Предотвращенный ущерб» ( $F_5$ ) [19]. Программный комплекс реализован в среде Scilab, результаты модельных экспериментов представлены на рис. 2.

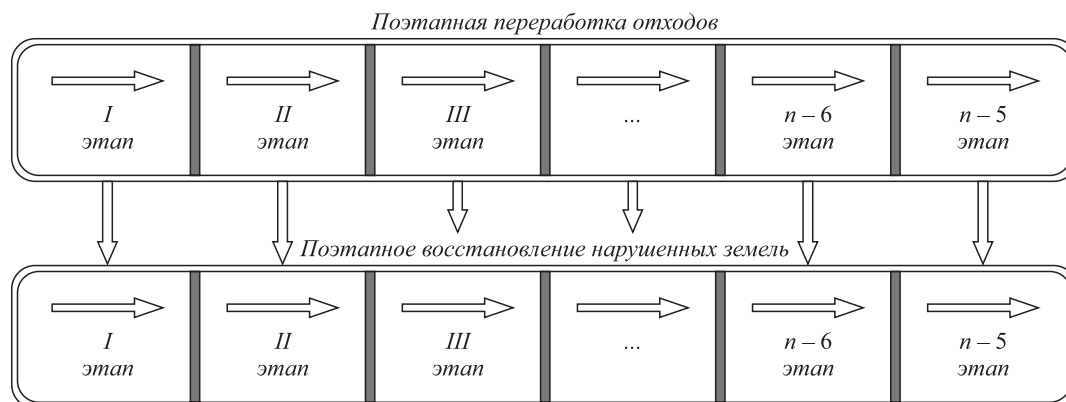


Рис. 1. Карты отработки хвостохранилища

Fig. 1. Maps of tailing dumps processing

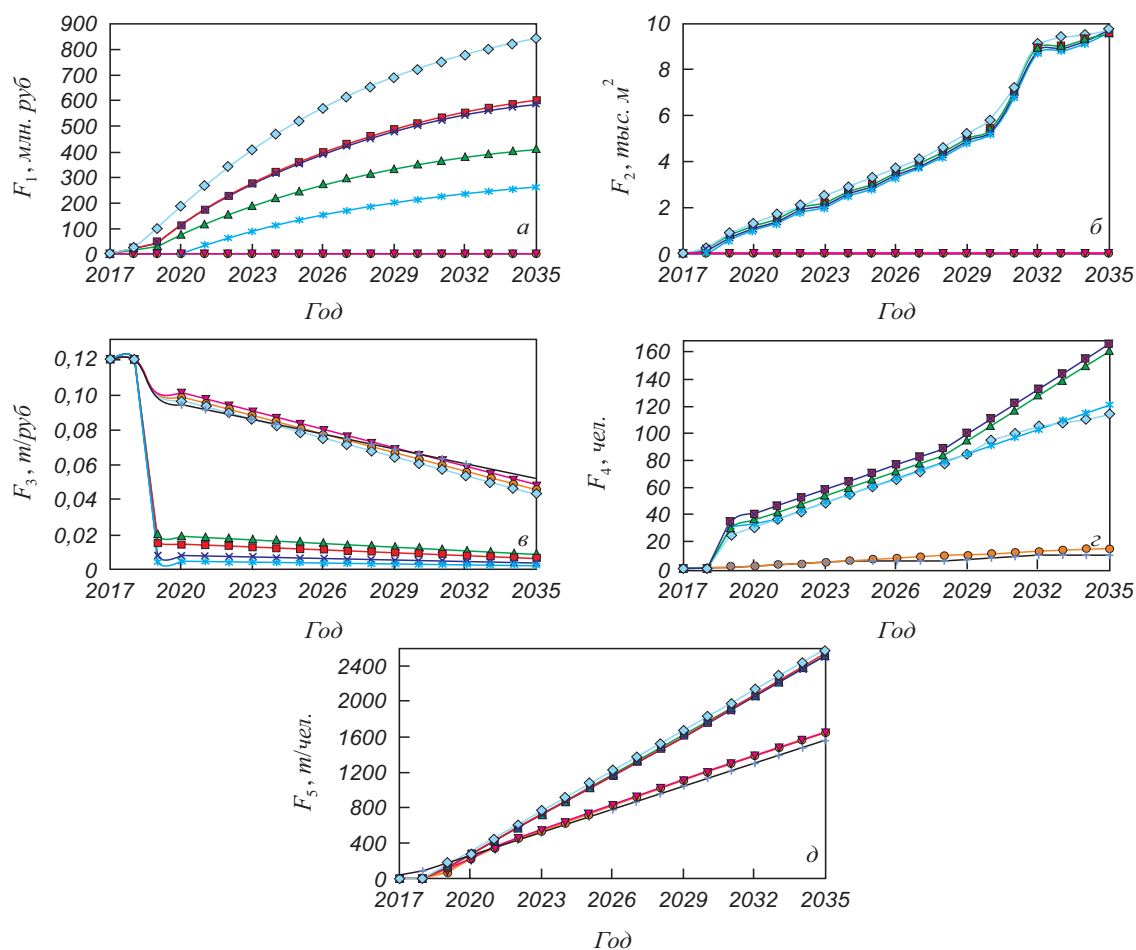


Рис. 2. Результаты математического моделирования сценариев переработки железорудных отходов обогатительных фабрик в Кемеровской области:

◆ – СМ, ■ – ЖКСВ, ▲ – ЖКБВ, × – ЗКБВ, \* – ЗКЦВ, ● – МКБВ, ▼ – СКБВ, + – ограничение

Fig. 2. The results of mathematical modeling of processing scenarios of concentrating plants iron ore wastes in the Kemerovo region:

◆ – CM, ■ – ICSL, ▲ – ICBL, × – GCBL, \* – GCCL, ● – CCBL, ▼ – SKBL, + – limitation

Планируемые показатели сценариев переработки отходов представлены в табл. 3. Из разработанных сценариев (табл. 2) осуществляется отбор Парето-оптимальных решений графическим способом [20] (рис. 3). В качестве показателей оптимальности обоснованы следующие: экономический эффект ( $F_1$ ), площади нарушенных и восстановленных земель ( $F_2$ ), численность населения с нормативными социокультурными показателями ( $F_4$ ). При этом показатели объем загрязнений ( $F_3$ ) и предотвращенный объем загрязнения на душу населения ( $F_5$ ) приняты в качестве ограничений.

Парето-оптимальными сценариями переработки железорудных отходов являются СМ, ЖКСВ, ЗКБВ. Для отбора приоритетных из Парето-оптимальных сценариев осуществляется их ранжирование, основанное на

уровнях социально-экологической безопасности: низким (Н), умеренном (С) и высоком (В). Значения границ показателей между низким и умеренным, умеренным и высоким уровнями соответственно определяются экспертным методом. Из Парето-оптимальных сценариев к рангу 1 относят ЖКСВ и ЗКБВ.

**Выводы.** На основе анализа технологий переработки и утилизации железорудных отходов сформированы комплексные сценарии устранения и ликвидации негативных воздействий обогатительных фабрик на социально-экологическую безопасность горнопромышленных районов. Математическое моделирование процессов утилизации техногенных ресурсов позволяет обосновать компромиссные решения по согласованию интересов собственников, органов регионального управления и инвесторов. Комплексирование и математическое моделирование технологий переработки железорудных отходов обеспечивают структурный синтез поэтапных процессов утилизации отходов, рекультивации нарушенных земель и создания рекреационных зон, снижение эколого-экономических затрат перерабатывающих производств и реализацию полного цикла рационального природопользования, повышение уровня социально-экологической безопасности.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Статистическая информация по вопросам охраны окружающей среды по регионам Сибирского федерального округа (СФО) за 2015 год [Электронный ресурс] / Экология и природные ресурсы Кемеровской области. Режим доступа: <http://ecokem.ru/wp-content/uploads/2016/09/СФО-за-20151.pdf> (Дата обращения 22 мая 2017 г.)
2. Регионы России. Социально-экономические показатели 2015: Статистический сборник. – М.: Росстат, 2015. – 900 с.
3. Putz H. J. Final fate of residues from the German recovered paper processing industry // 7 Research Forum on Recycling, Quebec City, Sept. 27–29. PARTAC. 2004. P. 239 – 244.
4. Mouravykh A.I. A chapter from the book «Security of Russia. Environment protection problems, sustainable development and ecological security». – Moscow, 2000. – 150 p.
5. Spladding L. Environmental Management for Business. John Wiley and Sons Inc. 1996.
6. Finch J.A. Column Flotation: A Selected Review, Part IV – Novel Flotation Devices // Minerals Engineering. 1995. Vol. 8. № 6. P. 587 – 602.
7. Koch A., Assis T., Magnaghi C.P. The Illustrated Method of Archimedes: Utilizing the Law of the Lever to Calculate Areas, Volumes, and Centers of Gravity. Montreal: C. Keys Inc., 2012. – 48 p.
8. Mineral processing plant design, practice and control, vol. 1. SME Symposium proceedings, Vancouver BC, Canada, Oct. 20 – 24, 2002. – 1264 p.
9. Нагин А.С. Проблема сырьевого обеспечения нерудными материалами строительных компаний // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2010. № 1. С. 55 – 59.
10. Калаева С.З., Макаров В.М., Ерехинская А.Г. Нанотехнология получения магнитных жидкостей из железосодержащих отходов // Нанотехника. 2008. № 3. С. 80 – 82.

Т а б л и ц а 3

#### Показатели сценариев переработки железорудных отходов на 2035 г.

Table 3. Indicators of iron ore wastes processing scenarios in 2035

Сценарий	$F_1$ , млн. руб	$F_2$ , тыс. м <sup>2</sup>	$F_3$ , т/руб	$F_4$ , чел.	$F_5$ , т/чел.
СМ	841,02	9,6500	0,043	114	2587,0
ЖКСВ	601,50	9,5000	0,006	166	2547,0
ЖКБВ	412,11	9,5000	0,009	161	2524,9
ЗКБВ	590,50	9,7000	0,003	164	2516,9
ЗКЦВ	263,00	9,3000	0,002	121	2501,9
МКБВ	5,00	0,0001	0,045	15	1645,2
СКБВ	2,00	0,0001	0,048	10	1656,2

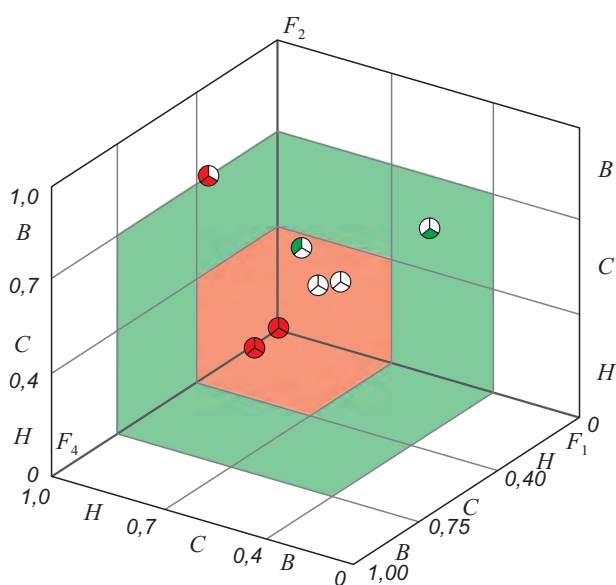


Рис. 3. Определение Парето-оптимального множества сценариев переработки железорудных отходов

Fig. 3. Determination of Pareto-optimal set of iron ore wastes processing scenarios



11. Астахов А.С. Геоэкономика (системная экономика промышленного недропользования). – М.: ООО «МИГЭК», 2004. – 488 с.
12. Астахов А.С. Экологическая безопасность и эффективность природопользования. 2-е изд., стер. – М.: Изд-во «Горная книга», 2009. – 323 с.
13. Miettinen T., Ralsom J., Fornasiero D., 2010, The limits of fine particle flotation // Minerals Engineering. 2010. Vol 23. P. 420 – 437.
14. Krauth, Richard G. 1991 Controlled Percolation System and Method for Heap Leach Mining. United States Patent 5,005,806. April 9. – 1991.
15. Gupta A., Yan D. Mineral Processing Design and Operation: An Introduction // Elsevier Science, 2006. – 718 p.
16. Thiel R.S., Smith, M.E. State Of The Practice Review of Heap Leach Pad Design Issues // Proc. GRI-18, Las Vegas, Nevada, USA. 2003. Vol. 22. P. 555 – 568.
17. Шорохова А.В., Новичихин А.В. Социально-экологическая безопасность горнопромышленных районов: разработка и конкретизация организационно-технологического механизма управления // Экономика и менеджмент системы управления. 2016. № 4.1. С. 194 – 200.
18. Lowrie R. SME Mining Reference Handbook. Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc. (SME) // Electronic edition published. 2009. 448 p.
19. Шорохова А.В., Новичихин А.В. Имитационные модели социально-экологической безопасности горнопромышленных районов // Экономика и менеджмент системы управления. 2016. № 4. С. 93 – 100.
20. Новичихин А.В., Фрянов В.Н. Формирование комплексных сценариев развития социально-экономических систем топливно-сырьевого региона // Экономика и менеджмент систем управления. 2014. № 3.1. С. 165 – 172.

Поступила 10 мая 2017 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2017. Vol. 60. No. 6, pp. 486–492.

## INTEGRATION AND MATHEMATICAL MODELING OF PROCESSING TECHNOLOGIES OF CONCENTRATING PLANT IRON ORE WASTE

*A.V. Shorokhova, A.V. Novichikhin*

### REFERENCES

**Siberian State Industrial University, Russia, Novokuznetsk**

**Abstract.** The analysis of existing domestic and international technologies of processing and utilization of iron ore wastes was carried out. For the Kemerovo region, effective technologies of waste recycling were provided for additional products meeting all consumers' requirements. These technologies were integrated into scenarios that provide a full cycle of rational nature management. The task of waste processing scenarios generation has been formulated. Scenarios for gradual processing of iron ore waste with extraction of useful components by chemical methods, reclamation of disturbed lands and creation of recreation zones in the exempt lands were developed. Recommendations and technological solutions for all-the-year processing, including winter, of iron ore waste by chemical methods are offered. The maps of tailings dumps processing with stage-by-stage processing and reclamation of disturbed lands are presented. The number of stages is determined by investments and annual capacity of waste recycling complex with possible simultaneous operation of several sections. After the complete excavation of iron ore wastes from the tailing dumps, preparatory work was carried out for construction of recreation areas, including searching for a tender, choosing the design of recreation areas, equipment, buildings and structures dismantling and selling, soil reclamation, lawns, trees and shrubs planting. Reclamation of the territory was carried out during the operation of processing plant; commissioning of recreation areas was made after the end of operation. Mathematical modeling of scenarios for concentration plants iron ore wastes processing in the Kemerovo region was carried out based on the following performance indicators: economic effect; reclamation of disturbed lands; pollution; mining area population with normative socio-cultural indicators; prevented pollution per capita. The toolkit of model experiments is a software package for Scilab environment. From the proposed scenarios, Pareto-optimal solutions were selected graphically. Selection of priorities among Pareto-optimal scenarios was carried out by ranking, based on levels of social and environmental safety (low, moderate and high) in the Kemerovo region.

**Keywords:** integration of technologies, scenarios, social and environmental safety, processing, utilization, rational nature management, iron ore wastes, mathematic modeling.

1. *Statisticheskaya informatsiya po voprosam okhrany okruzhayushchei sredy po regionam Sibirskogo federal'nogo okruga (SFO) za 2015 god* [Statistic information on environmental protection in the regions of the Siberian Federal District (SFD) in 2015]. *Ekologiya i prirodnnye resursy Kemerovskoi oblasti* [Ecology and nature resources of Kemerovo region]. Available at URL: <http://ecokem.ru/wp-content/uploads/2016/09/СФО-за-20151.pdf> (Accessed 22.05.2017). (In Russ.).
2. *Regiony Rossii. Sotsial'no-ekonomicheskie pokazateli 2015: Statisticheskii sbornik* [Regions of Russia. Social and economic indicators of 2015: Statistics collection]. Moscow: Rosstat, 2015, 900 p. (In Russ.).
3. Putz H. -J. Final fate of residues from the German recovered paper processing industry. *7 Research Forum on Recycling*. Quebec City, Sept. 27–29. PARTAC, 2004, pp. 239–244.
4. Mouravykh A.I. *Security of Russia. Environmental protection problems, sustainable development and ecological security*. Moscow, 2000, 150 p.
5. Spladding L. *Environmental management for business*. John Willy and Sons Inc. 1996.
6. Finch J.A. Column flotation: A Selected Review, Part IV – Novel Flotation Devices. *Minerals Engineering*. 1995, vol. 8, no. 6, pp. 587–602.
7. Koch A., Assis T., Magnaghi C.P. *The illustrated method of Archimedes: utilizing the law of the lever to calculate areas, volumes, and centers of gravity*. Montreal: C. Roy Keys Inc., 2012, 48 p.
8. Mineral processing plant design, practice and control. Vol. 1. *SME Symposium proceedings, Vancouver BC, Canada, Oct. 20 – 24, 2002*, 1264 p.
9. Nagin A.S. Issue of non-metallic materials provision as a resource for civil engineering companies. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'*. 2010, no. 1, pp. 55–59. (In Russ.).
10. Kalaeva S.S., Makarov V.M., Erekhinskaya A.G. Nanotechnology of production of magnetic liquids out of iron containing wastes. *Nanotekhnika*. 2008, no. 3, pp. 80–82. (In Russ.).
11. Astakhov A.S. *Geoekonomika (sistemnaya ekonomika promyshlennogo nedropol'zovaniya)* [Goeconomics (System economics of industrial mineral resources management)]. Moscow: MIGEK, 2004, 488 p. (In Russ.).
12. Astakhov A.S. *Ekologicheskaya bezopasnost' i effektivnost' prirodopol'zovaniya* [Ecologic safety and effectiveness of nature management]. Moscow: Gornaya kniga, 2009, 323 p. (In Russ.).

DOI: 10.17073/0368-0797-2017-6-486-492

13. Miettinen T., Ralson J., Fornasiero D. The limits of fine particle flotation. *Minerals Engineering*. 2010, vol. 23, pp. 420–437.
14. Krauth Richard G. *Controlled Percolation System and Method for Heap Leach Mining*. United States Patent 5,005,806. April 9. 1991.
15. Gupta A., Yan D. *Mineral Processing Design and Operation: An Introduction*. Elsevier Science, 2006, 718 p.
16. Thiel R.S., Smith, M.E. State of the practice review of heap leach pad design issues. *Proc. GRI-18, Las Vegas, Nevada, USA*. 2003, vol. 22, pp. 555–568.
17. Shorokhova A.V., Novichikhin A.V. Social and ecological safety of mining areas: development and determination of organizational and technological management mechanisms. *Ekonomika i menedzhment sistemy upravleniya*. 2016, no. 4.1, pp. 194–200. (In Russ.).
18. Lowrie R. *SME Mining reference handbook*. Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc. (SME). Electronic edition, 2009, 448 p.
19. Shorokhova A.V., Novichikhin A.V. Simulation models of social and ecological safety of mining areas. *Ekonomika i menedzhment sistemy upravleniya*. 2016, no. 4, pp. 93–100. (In Russ.).
20. Novichikhin A.V., Fryanov V.N. Generation of integrated scenarios of socio-economic systems in fuel and resource producing region. *Ekonomika i menedzhment sistem upravleniya*. 2014, no. 3.1, pp. 165–172. (In Russ.).

**Information about the authors:**

**A.V. Shorokhova**, Senior Lecturer of the Chair of Business and Innovation (shorokova\_a@mail.ru)

**A.V. Novichikhin**, Dr. Sci. (Eng.), Assist. Professor, Head of the Chair of Transport and Logistics (novichikhin@pochta.ru)

Received May 10, 2017

---